

Biblid: 0350-2953 (2017) 43(1): 35-44
UDK: : 631.3; 62;

Originalni naučni rad
Original scientific paper

ANALIZA UTICAJA VRSTE GORIVA I KARAKTERISTIKA GORIONIKA NA SAGOREVANJE SPRAŠENE BIOMASE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FUEL TYPES AND BURNERS CHARACTERISTICS ON PULVERISED BIOMASS COMBUSTION

**Branislav Repić¹, Aleksandar Erić¹, Borislav Grubor¹,
Dragoljub Dakić², Goran Živković¹**

¹Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča"

Laboratorija za termotehniku i energetiku, Mike Petrovića Alasa 12-14, 11351 Beograd

²Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd

e-mail: brepic@vinca.rs

REZIME

Sagorevanje sprašenog goriva je jedan od široko korišćenih načina upotrebe goriva. Za uspešno sagorevanje sprašenog goriva potrebno je obezbediti adekvatne uslove odgovarajućim izborom gorionika i goriva. Sagorevanje sprašenog goriva pomoću vrtložnih gorionika, korišćenjem efekta vihornog strujanja, je vrlo značajno i široko rasprostranjeno. Vrtloženje se široko koristi zbog njegovog povoljnog uticaja na stabilizaciju i intenziviranje procesa sagorevanja i smanjenje emisije NOx. Optimalni uslovi sagorevanja zavise od vrste goriva i karakteristika gorionika. U radu su izloženi rezultati analize uticaja konstruktivnih i radnih karakteristika gorionika i svojstava goriva (biomasa i uglj) na sagorevanje sprašenih goriva. Sprovedena su istraživanja sagorevanja nekoliko vrsta goriva (biomase i uglja) na modelima i prototipovima vrtložnih (vihornih) gorionika. Ispitivani su uticaji sledećih parametara: konstruktivni parametri gorionika (tip, difuzor), radni parametri gorionika (brzina, temperatura i količina vazduha, stepen vrtloženja, višak vazduha, koncentracija aerosmeše) i svojstva goriva (vrsta, kvalitet, sadržaj vlage, pepela, isparljivih i sagorljivih materija, finoće mlevenja i dr.).

Cljučne reči: Sagorevanje, vihorni gorionik, biomasa, sprašeno gorivo.

1. UVOD

U pogledu održivog energetskog razvoja u Srbiji, kao i u celom svetu, sve je veća potreba za korišćenjem alternativnih izvora energije. Alternativni izvori energije su u većini slučajeva obnovljivi: biomasa, energija vetra i sunca, hidro i geotermalna energija i dr. Potrebu za korišćenjem novih izvora energije diktira tržište sa jedne strane, kao i zaštita životne sredine s druge strane. Cene fosilnih goriva rastu proporcionalno smanjenju njihovih rezervi. S obzirom na to da su raspoložive rezerve fosilnih goriva u Srbiji, posebno one visokog kvaliteta, relativno ograničene, ovaj problem se još više naglašava. S druge strane, neophodno je uskladiti zakonodavstvo i praksu proizvodnje energije u Srbiji sa direktivama Evropske unije, u smislu intenziviranja korišćenja obnovljivih izvora energije.

Biomasa je jedan od ključnih obnovljivih izvora energije (Repić et al. 2013, De Wit i Faaij, 2010, Dodić i dr, 2010, Janić i dr, 2010), i četvrti je najveći izvor primarne energije u svetu nakon uglja, nafte i prirodnog gasa. U svim njegovim oblicima, biomasa obezbeđuje oko 1250 miliona tona ekvivalentne nafte (Mtoe) što je oko 14% godišnje potrošnje energije u svetu (Yang et al. 2005). Generalno, poljoprivredni ostaci se proizvode lokalno i često imaju malu gustinu. Zbog visokih troškova transporta često je neekonomično koristiti poljoprivredne ostatke kao glavno gorivo u velikim elektranama. Upotreba ostataka biomase u malim lokalnim energetskim postrojenjima ima nedostatak zbog specifično visokih investicionih troškova, veće potrebe za zaposlenima i manju energetsku efikasnost u odnosu na velika postrojenja. Biomasa predstavlja idealno gorivo u poređenju sa drugim čvrstim gorivima, a po nekim karakteristikama sagorevanja može se porediti sa tečnim gorivom. S druge strane, pojedini aspekti kao što su raspoloživost, transport, skladištenje i dr. mogu donekle predstavljati prepreku njenom širem korišćenju.

Prema zvaničnim podacima Ministarstva za infrastrukturu i energetiku Srbija raspolaze sa 4,3 Mtoe obnovljivih izvora energije, dok je biomasa predstavljena sa 2,7 Mtoe. 60% od toga su reziduali iz poljoprivredne proizvodnje, a ostatak je drvna biomasa. Trenutno, samo mali deo otpadne biomase se koristi u proizvodnji energije uglavnom za grejanje, i to zbog niske cena električne energije i nerešenih problema prikupljanja biomase. Takođe, ne postoji regulisano tržište biomase. Osim toga, mora se spomenuti i mala finansijska snaga potencijalnih kupaca, skupi komercijalni krediti, minimalna podrška države i dr. Zato je najbolji način za iskorišćavanje otpadne biomase za proizvodnju energije u industrijskom ili daljinskom grejanju ili u velikim poljoprivrednim kombinatima.

2. MATERIJAL I METOD

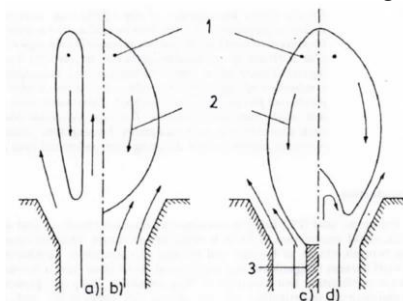
Sagorevanje goriva u sprasenom stanju predstavlja široko primenjenu tehniku sagorevanja. Za uspešno sagorevanje sprasenih goriva potrebno je obezbediti povoljne uslove pomoću gorionika za njihovo uvođenje i ložišta za obezbeđenje uslova za reakciju sagorevanja. Namena gorionika je u pravilnom ubacivanju u ložište neophodne količine goriva i vazduha, pri čemu je neophodno ostvariti efikasno mešanje goriva i vazduha, postići uslove za stabilno paljenje čestica goriva kao i minimalno obrazovanje štetnih produkata sagorevanja tzv. polutanata.

Vihorna strujanja su široko rasprostranjena i to kako u procesima i pojavama gde je sagorevanje nerazdvojni deo procesa, tako i u slučajevima odsustva sagorevanja. Sagorevanje sprasenog goriva pomoću vihornih gorionika, korišćenjem efekta vihornog strujanja, je vrlo značajno i široko rasprostranjeno (Gupta et al. 1984, Beer i Chigier, 1972). Vihorna strujanja se formiraju (Slika 1) kao rezultat obezbeđenja odgovarajućeg obrtnog kretanja strujnog toka i to pomoću lopatica, vrtložnim aparatom ili na neki drugi način. Ovakav način sagorevanja goriva se izuzetno mnogo koristi zbog povoljnog uticaja efekta vrtloženja na stabilizaciju i intenzifikaciju procesa sagorevanja. Pored značaja za efikasnost sagorevanja, vrtloženje omogućuje ekološki čistije sagorevanje goriva, zbog sniženja obrazovanja štetnih polutanata oksida SO_x, NO_x, CO₂ i dr.

Vihorna strujanja se koriste kao efikasan način kontrole plamena pri procesima sagorevanja. Istraživanja su pokazala (Gupta et al. 1984, Shagalova i Shnicer, 1976) da

vtroženje najviše utiče na: polja strujanja uslovljavajući širenje struje, proces mešanja i prigušenja brzina u struji, dimenzije, oblik i stabilnost plamena, intenzitet sagorevanja i dr. U centralnoj oblasti struje koja se širi (Slika 1) formira se zona podpritiska izazivajući povratno strujanje vrelih produkata sagorevanja ka korenu plamena sa njegove unutrašnje strane. Za uspešno ostvarenje sagorevanja spraašenog goriva, pojava obrazovanja osne recirkulacione zone je od ključne važnosti za zagrevanje i paljenje goriva i stabilizaciju plamena.

Intenzitet vjornih strujanja obično se karakteriše bezdimenzionim parametrom tzv. stepenom vrtloženja S . Prema vrednosti parametra S sva vjorna strujanja dele se na strujanja sa malim ($S < 0.6$) i velikim ($S \geq 0.6$) intenzitetom vrtloženja. Za sagorevanje spraašenih goriva od značaja su strujanja pri velikom vrtloženju, jer se jedino u tom slučaju mogu obezbediti povoljni aerodinamički uslovi za stabilno sagorevanje goriva.



Sl. 1. Tipovi strujanja kod vjornih gorionika za spraašeno gorivo:

a) tip 1, b) tip 2, c) tip 2 priljubljen, d) tip 3

Fig 1. Flow types for pulverized fuel swirl burner:

a) type 1, b) type 2, c) type 2 jointed, d) type 3

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Optimalni radni uslovi sagorevanja goriva, korišćenjem vjornih gorionika, zavise od više veličina koje se mogu razvrstati u dve grupe: karakteristike goriva i karakteristike gorionika. Od karakteristika goriva najvažniji je uticaj vrste, kvaliteta i sastava goriva, sadržaj vlage i isparljivih materija, finoća mlevenja i dr. Najznačajnije radne karakteristike gorionika koje utiču na obezbeđenje optimalnih uslova sagorevanja su intenzitet vrtloženja, brzine i koeficijent viška vazduha i koncentracija aerosmeše. Dobro poznavanje uticaja ovih veličina je od velike važnosti za obezbeđenje optimalnih uslova sagorevanja goriva.

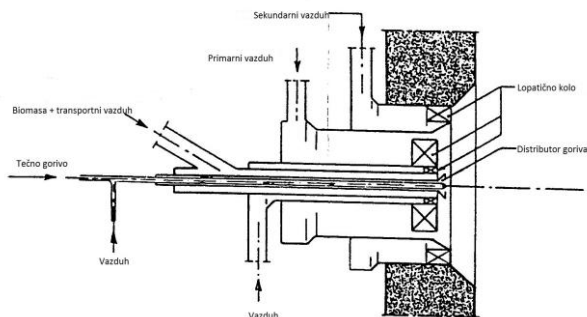
Sagorevanje goriva u spraašenom stanju ima dugu tradiciju. To se posebno odnosi na sagorevanje uglja, a u novije vreme i na sagorevanje biomase. Najznačajnije oblasti primene spraašenih goriva su termoelektrane, energetski i industrijski kotlovi i ložišta, cementare, ciglane, krečane metalurške peći i dr. Spraašena goriva se mogu koristiti na onim mestima gde su ispunjeni određeni uslovi: a) relativno visoki intenzitet zapreminskog toplotnog opterećenja ložišnog prostora; b) procesi kod kojih se stvaraju troske (pečenje kreča, pravljenje cementa, topljenje ruda koncentrata i dr.) kako bi se pepeo troskom mogao da eliminiše iz uređaja; c) uređaji i procesi kod kojih je potrebno

oksidaciono ili redukciono sagorevanje i to oni koji nisu osetljivi na oscilacije u sagorevanju; d) peći relativno dugačkog (velikog) ložišnog prostora i dr.

Gorionici su jedan od ključnih elemenata koji obezbeđuju povoljne uslove za sagorevanje sprasenog goriva. Izbor tipa gorionika i njihov razmeštaj u ložištu uslovljeni su vrstom ložišta, i primenjenim načinom pripreme sprasenog goriva, koji je u mnogome uslovljen vrstom i osobinama goriva. Pomoću gorionika, odnosno njihovim pravilnim razmeštajem, mogu se dobro organizovati ložišni procesi i to: obrazovanje mešavine gorivo-vazduh, stabilno paljenje i intenzivno sagorevanje sprasenog goriva, minimiziranje opasnosti od povratka varnica u sistem pripreme praha, rad ložišta bez lepljenja pepela i dr.

Za sagorevanje sprasenih goriva koriste se dva tipa gorionika, mlazni i vrtložni (Shagalova i Shnicer, 1976). Mlazni gorionici praktično služe za uduvavanje u ložišni prostor posebno mešavine sprasenog goriva i vazduha tzv. aerosmeša a posebno sekundarnog vazduha. Zbog načina uvođenja goriva i vazduha oni obrazuju struju velikog dometa sa malim uglom širenja i sa slabim mešanjem primarne i sekundarne struje. Uspešno sagorevanje goriva može se postići jedino međusobnim delovanjem struja više gorionika u ložišnom prostoru. Oni se, s obzirom na strujne procese, preporučuju za primenu kao glavni gorionici za sagorevanje visokoreakcionih goriva i to pre svega ugljeva – lignita i mrkih, tj. ugljeva sa visokim sadržajem isparljivih materija. Oni se ne preporučuju kod sagorevanja sprasene biomase zbog njenih specifičnih karakteristika.

Kod vrtložnih (vihornih) gorionika primarni i sekundarni vazduh dobijaju vihorno kretanje pomoću vrtložnika različitih tipova. Ovi gorionici se sastoje od većeg broja koncentričnih cevi (Slika 2). Centralna cev je predviđena za smeštaj uljnog ili gasnog gorionika koji služi za potpalu sprasenog goriva. Aerosmeša se uvodi prstenasto oko cevi centralnog vazduha, dok se sekundarni vazduh uvodi prstenasto sa jednom ili više cevi. Vihorno kretanje se ostvaruje na tri različita načina i to aksijalnim, radijalnim i tangencijalnim vrtložnicima – lopaticama.



Sl. 2. Šema vihornog gorionika za sagorevanje sprasene (samlevene) biomase
Fig. 2. A schematic of a swirl burner for pulverized (grinded) biomass combustion

Prema načinu uvođenja aerosmeše i sekundarnog vazduha, a u zavisnosti od oblika vrtložnika, ovi gorionici se mogu klasifikovati na sledeće tipove (Shagalova i Shnicer, 1976): a) tangencijalno-lopatični gorionici sa tangencijalnim vrtloženjem aerosmeše i lopatičnim vrtloženjem sekundarnog vazduha. U zavisnosti od konstrukcije lopatičnih

vrtožnika oni mogu biti sa aksijalnim i tangencijalnim lopatičnim vrtožnikom, sa pokretnim i nepokretnim lopaticama; b) Tangencijalni gorionici sa tangencijalnim vrtoženjem aerosmeše i sekundarnog vazduha; c) Lopatični gorionici sa lopatičnim vrtoženjem primarnog i sekundarnog vazduha; d) Direktno tangencijalni, ili lopatični sa direktnim tj. centralnim uvođenjem aerosmeše i lopatičnim vrtoženjem sekundarnog vazduha ili njegovim tangencijalnim uvođenjem,

Oblik struje aerosmeše i vazduha koji se ubacuje u ložište zavisi od tipa i konstrukcije uređaja za vrtoženje. Zahvaljujući vrtoženju protoci aerosmeše i sekundarnog vazduha formiraju u ložištu dva koncentrično raspoređena, međusobno usečena konusa. Unutrašnji konus aerosmeše ima nešto veći ugao širenja zbog boljeg mešanja sa sekundarnim vazduhom. U centralnoj oblasti struje koja se širi formira se zona podpritiska. To uzrokuje povratno strujanje vrelih produkata sagorevanja ka korenu plamena sa njegove unutrašnje strane. Paljenje aerosmeše ostvaruje se kako po spoljašnjoj tako i po unutrašnjoj površini konusa aerosmeše, To značajno povećava specifičnu površinu zapaljenja čime se poboljšava paljenje sprasenog goriva i njegovo bolje sagorevanje. Da bi se omogućilo bolje širenje plamena i povećala recirkulacija vrelih gasova korisno je korišćenje difuzora tj. naglavka gorionika. Ugao širenja difuzora je od značaja na stabilnost plamena i određuje se eksperimentalnim putem za određenu vrstu goriva.

Paljenje aerosmeše, do postizanja stabilnih uslova sagorevanja, vrši se gorionikom na tačno gorivo smeštenim u centralnoj cevi. Paljenje tečnog goriva vrši se gasnim gorionikom smeštenim pored mazutnog, a paljenje gasa vrši se električnom varnicom. Regulacija snage gorionika uobičajeno se kreće u opsegu 80-100%. Ovaj opseg snage gorionika uslovljen je graničnim brzinama transporta aerosmeše i koncentracijom aerosmeše koja predstavlja odnos količine goriva prema količini transportnog agensa. Brzina transporta aerosmeše zbog toga nesme biti ispod dozvoljenih normativnih vrednosti (Kiselgof i Sokolov, 1958).

Na osnovu dugogodišnjih istraživanja definisana su četiri tipa plamenova uočenih pri laboratorijskim i poluindustrijskim ispitivanjima vrtožnih gorionika (Gupta et al. 1984, Repić, 1992, Beer i Chigier, 1972). To su tipovi plamena prikazani na Slici 1.

Tip 1: dugačak (mlazni) plamen, stabilizovan pomoću cevi za uvođenje goriva ili duž mlaza, formiran bez vrtoženja sekundarnog vazduha, ili sa vrlo slabim vrtoženjem.

Tip 2: kombinacija dugačkog mlaznog plamena (tip 1) i plamena stabilizovanog difuzorom (tip 3). To je u osnovi dugačak plamen. Mlaz ima tendenciju odvajanja od izlaznog otvora blizu grla gorionika tako da se javlja strujanje slično onom kod anularnog strujanja bez vrtoženja. Plamen formiran ovim tipom strujanja ima fluktuacije fronta plamena i počinje na nekom rastojanju od grla gorionika.

Tip 3: kratak, visokintenzivan plamen, stabilisan u difuzoru sa zatvorenom internom recirkulacionom zonom. Ovaj oblik strujanja veoma pogoduje stabilnosti plamena, pri čemu paljenje goriva počinje na izlazu iz gorionika ili čak unutar difuzora. Ovakvo strujanje poboljšava turbulentnost plamena, omogućuje obrazovanje zona maksimalne koncentracije goriva i postizanje visokog intenziteta procesa sagorevanja.

Tip 4: dugačak, još uvek intenzivan plamen, stabilizovan u zoni difuzora. Ovaj oblik strujanja izaziva priljublivanje mlaza uz zidove ložišta što je posledica radijalnih sila izazvanih visokim parametrima vrtoženja. Plamen formiran ovim tipom strujanja

priljubljen je uz čeonu deo gorionika i zidove ložišta, što je značajno za ložišta u kojima je potrebno ostvariti intenzivno i ravnomerno zagrevanje unutrašnjih površina zračenjem.

Uticaj gorionika: U cilju istraživanja procesa sagorevanja sprasjenih goriva i određivanja radnih i konstruktivnih parametara vihornih gorionika napravljeno je i ispitano više modela ovih gorionika. Neki osnovni podaci o geometriji gorionika dati su u Tabeli 1. Tangencijalni model ostvaruje vrtloženje tangencijalnim uvođenjem sekundarnog vazduha i aerosmeše posebnim kanalima. Gorionik je tako modeliran u odnosu na realne da je vreme zadržavanja čestica u plamenu podjednako dok su brzine strujanja nekoliko puta manje.

Aksijalno-lopatični model gorionika tip 1 obezbeđuje vrtloženje kolom od 18 pomerljivih lopatica. Aerosmeša se uvodi pod uglom od 30^0 a na izlazu je postavljeno kolo sa pravim lopaticama za smanjenje neravnomernosti u koncentraciji aerosmeše. Centralna cev je predvđena za dovod centralnog vazduha i smeštaj gorionika za tečno gorivo. Modeliranje je izvršeno kao kod tangencijalnog gorionika.

Gorionik sa pokretnim blokovima za vrtloženje vazduha (Slika 3) modeliran je tako da se brzine strujanja aerosmeše i sekundarnog vazduha kreću od najmanjih pa do onih kao kod realnih gorionika. Vrtloženje sekundarnog vazduha obezbeđuje se vencem od 8 pokretnih i nepokretnih blokova. Odgovarajućim mehanizmom omogućeno je kontinualno pomeranje blokova te time i laka promena stepena vrtloženja gorionika.



Sl. 3. Slika gorionika sa blokovima (GB) i gorionika sa lopaticama (ALG2)

Fig. 3. Burner image with blocks (GB) and burner with blades (AL2)

Aksijalno lopatični model gorionika tip 2 je vrtložnog tipa sa centralnim dovodom gasa za potpalu i prstenastim dovodom aerosmeše oko cevi centralnog vazduha (Slika 3). Kroz cev aerosmeše prolazi mešavina sprasjenog goriva, primarnog vazduha i recirkulacionih gasova. Vrtloženje aerosmeše vrši se vencem od 16 lopatica. Mogući uglovi lopatica su 15 , 30 i 45^0 . Sekundarni vazduh dovodi se prstenasto oko cevi aerosmeše. Vrtloženje sekundarnog vazduha ostvaruje se vencem od 16 lopatica sa mehanizmom za kontinualnu promenu ugla lopatica a samim tim i kontinualnu promenu stepena vrtloženja gorionika.

Napravljena su i dva prototipa vihornih gorionika toplotne snage $4,5$ MW i 27 MW. Prototipovi gorionika su tako modelirani da su brzine vazduha kao kod realnih gorionika. Modeli laboratorijskih gorionika ispitani su u laboratorijskim uslovima na

eksperimentalnom ložištu. Modeli prototipova gorionika zbog svoje veličine toplotne snage ispitani su u realnim uslovima na termoelektrani.

Sprovedena su detaljna ispitivanja sagorevanja spraešenih goriva (biomasa, ugallj) na opisanim gorionicima. Prilikom ispitivanja u širokom opsegu menjani su radni parametri eksperimenata kao što su: ugao lopatica i stepen vrtloženja gorionika, količine i brzine primarnog, sekundarnog i centralnog vazduha kao i njihov odnos, temperature vazduha, koncentracije aerosmeše, višak vazduha u gorioniku i ložištu, uticaj difuzora, način inicijalnog paljenja aerosmeše i dr. Sređeni podaci o sprovedenim ispitivanjima za gorionik sa blokovima i za aksijalno lopatični gorionik tip 2 prikazani su Tabeli 1. Rezultati dobijeni sprovedenim ispitivanjima poslužili su za projektovanje prototipova gorionika, a mogu se praktično koristiti pri projektovanju realnih gorionika za sagorevanje spraešenih goriva.

Tab. 1. Osnovne radne i konstruktivne karakteristike modela gorionika

Tab. 1 Basic design and working characteristics of the burner model

	GB	ALG2
Geometrija gorionika, Burner geometry		
Prečnik cevi za gas, Gas tube diameter, mm	-	30/23,6
Prečnik centralne cevi, Central tube diameter, mm	42.4/37.2	63.5/57.1
Prečnik primarne cevi, Primary tube diameter, mm	60.3/54.5	108/100
Prečnik sekundarne cevi, Secondary tube diameter, mm	95.0/87.8	146/138
Dužina difuzora, Diffuser length, mm	100	160
Poluugao difuzora, Diffuser half angle, °	33	26.6
Ugao lopatica sekund. vazduha, Blade angle of sec. air, °	0-90	15-75
Jedinica, Units		
Brzina primarnog vazd., Primary air velocity, w_p m/s	5.3-23.4	2.3-4.5
Brzina sekund. Vazduha, Secondary air velocity, w_s m/s	10.5-25.6	6-44.9
Brzina centralnog vazduha, Central air velocity, w_c m/s	-	-
Odnos brzina, Ratio, w_s / w_p	0.6-3.42	1.8-14.1
Odnos protoka, Flow ratio, G_p / G_s	0.09-0.52	0.09-0.73
Momentni odnos, Momentum ratio, M_R	0.039-0.869	0.004-0.28
Stepen vrtloženja gorionika, Swirl number, S	0.12-1.12	0.55-7.50
Rejnoldsov broj, Reynolds number, Re	0.44×10^5	0.84×10^5
Potrošnja goriva, Fuel consumption, B_f kg/h	19-130	20-140
Toplotna snaga gorionika, Burner power, Q_b KW	106-720	89-621

Uticaj goriva: Širok spektar izvora biomase uslovljava različite njihove karakteristike. U Tabeli 2 prikazani su opsezi u kojima se menjaju karakteristike biomase. Vлага može varirati od 5 % kod osušene biomase pa do 50% kod sveže požnjevenih kultura. Isparljive materije kod biomase su veće nego kod uglja, u rasponu od 65 do 85%, dok je fiksni ugljenik mnogo niži, u rasponu od 7 do 20%. Pepeo je uglavnom ispod 5%, ali može biti čak 20% npr. kod pirinča. Elementarna analiza pokazuje visok sadržaj kiseonika (32-45%) u biomasi. U zavisnosti od vrste vrsta i specifičnih uslova uzgoja, nivoi drugih komponenti, kao što su N, S, Cl i K, takođe mogu biti različiti. Donja toplotna vrednost (LCV) kreće se od 15 do 22 MJ/kg, a veličina čestica može biti od praškastih čestica (~ 1 mm) do seckane biomase veličine ~ 100 mm. Oblik biomase je ne-

sferni. Nasipna gustina biomase znatno varira, od veoma suve slame (20 kg/m³) do veoma teških peleta (~ 700 kg/m³). Ovaj širok opseg u svojstvima biomase može značajno uticati na karakteristike sagorevanja goriva.

U Tabeli 3 prikazane su osnovne razlike između slame i uglja (Esteban et al. 2006). Slama ima značajno veći sadržaj isparljivih materija od uglja, a odnos fiksni ugljenik/isparljive materije se značajno razlikuju. Pored toga, slama počinje da oslobađa isparljive materije na nižim temperaturama i značajno brže od uglja, čime se smanjuje temperatura paljenja biomase u poređenju sa ugljem. Ovo takođe ukazuje na to da se posebna pažnja mora posvetiti projektovanju snabdevanja vazduhom kako bi se obezbedio dovoljan sadržaj kiseonika za brže oslobađanje isparljivih materija kako se ne bi odlagalo sagorevanje goriva (Mando et al. 2010). Međutim, ovo se donekle neutralizuje nešto nižim potrebama za kiseonikom kada je sagorevanje slame u pitanju. Takođe, toplotna moć slame je niža u poređenju sa kvalitetnijim inostranim ugljevima što zahteva veći protok biomase za istu izlaznu snagu gorionika (Tabela 3).

Tab. 2. Varijacije u svojstvima biomase

Tab. 2. Variations in biomass fuel properties

Veličina, Units			
Vlaga, Moisture, %	5-50	C, %	38-53
Isparljive materije, Volatile matter, %	65-85	H, %	4.5-7.0
Fiksni ugljenik, Fixed carbon, %	7-20	O, %	32-45
Pepeo, Ash, %	0.5-20	N, %	0.15-2.7
Donja toplotna vrednost, LCV, MJ/kg	15-22	S, %	0.02-0.35
Odnos maksim. dimenzija, Maxim. dimension ratio	1-15	Cl, %	0-0.5
Toplotna provodnost, Thermal conductivity, W/(mK)	0.07-0.5	d _p , mm	1-100
Nasipna gustina, Bulk density, kg/m ³	20-710		

Takođe, nezaobilazan je i uticaj finoće mlevenja sprasenog goriva na kinetiku sagorevanja u vihornom gorioniku. Tu se biomasa i ugalj značajno razlikuju jer se ne primenjuju isti mlinovi za mlevenje ove dve vrste goriva. Zbog toga pri izboru projektnih parametara vihornih gorionika za sagorevanje goriva u sprasenom stanju mora se uzeti u obzir i finoća mlevenja goriva koja se može postići na realnom postrojenju.

Tab. 3. Parametri biomase i uglja

Tab. 3. Coal and straw parameters

Veličina Units	Ugalj	Slama
	Coal	Straw
Isparljive materije, Volatiles matter, wt%	40.0	72.0
Pepeo, Ash, wt%	13.1	4.5
Vlaga, Moisture, wt%	9.0	10.0
Koks, Char, wt%	37.9	13.5
Donja toplotna moć, Lower Heating Value, MJ/kg	24.7	15.0
Odnos primarni vazduh/gorivo, Primary air/fuel ratio	1.9	2.2
Odnos ukupni vazduh/gorivo, Total air/fuel ratio	9.47	5.24
Višak vazduha, Excess air ratio	1.14	1.10
(Sekundarni vazduh+tercijerni vazduh) / primarni vazduh (Secondary air+Tertiary air) / Primary air	5.0	1.3

4. ZAKLJUČAK

Biomasa je jedan od ključnih obnovljivih izvora energije i četvrti je najveći primarni izvor energije u svetu. Tehnologije korišćenja biomase su određene karakteristikama goriva. Sagorevanje sprašenog goriva je jedan od široko primenljivih načina korišćenja biomase. Za uspešno sagorevanje sprašenog goriva potrebno je obezbediti adekvatne uslove odgovarajućim izborom gorionika i ložišta. Sagorevanje sprašenog goriva pomoću vihornih gorionika je široko rasprostranjeno. Optimalni uslovi sagorevanja zavise od karakteristika gorionika i goriva. Vihorni gorionici se široko koriste u ložišnoj tehnici za različite vrste goriva. U cilju istraživanja procesa sagorevanja sprašenog goriva u laboratorijskim uslovima korišćeni su vihorni gorionici različitih vrsta i snaga, od 0,1 do 0,7 MW. Za ispitivanja je su korišćena laboratorijska postrojenja koja omogućavaju promenu radnih parametara u širokom opsegu. Sprovedena su ispitivanja sagorevanja nekoliko vrsta goriva (biomase i uglja) na modelima i prototipovima vrtložnih gorionika. Ispitivani su uticaji sledećih parametara: konstruktivni parametri gorionika (tip, difuzor), radni parametri gorionika (brzina, temperatura i količina vazduha, stepen vrtloženja, višak vazduha, koncentracija aerosmeše i dr.) i svojstva goriva (vrsta, kvalitet, sadržaj vlage, pepela, isparljivih i sagorljivih materija, finoće mlevenja i dr.). Takođe vršeno je određivanje dodatnih parametara neophodnih za projektovanje i dimenzionisanje vihornih gorionika.

5. LITERATURA

- [1] Beer J.M, Chigier N. A. (1972). Combustion aerodynamics. London, UK: Applied Science Publishers Ltd.
- [2] De Wit M, Faaij A. (2010). European Biomass Resource Potential and Costs. *Biomass and Bioenergy* 34(2): 188-202.
- [3] Dodić S, Zekić V, Rodić V, Tica N, Dodić J, Popov S. (2010). Situation and Perspectives of Waste Biomass Application as Energy Source in Serbia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(9): 3171-3177.
- [4] Esteban L.S, Carrasco J.E. (2006). Evaluation of Different Strategies for Pulverization of Forest Biomasses. *Powder Technology* 166(3): 139-151.
- [5] Gupta A.K, Liley D.G, Syred N. (1984). Swirl Flows. London, UK: Abacus Press.
- [6] Janić T, Brkić M, Igić S, Dedović N. (2008). Termoenergetski sistemi sa biomasom kao gorivom. *Savremena poljoprivredna tehnika* 34(3-4): 212-219.
- [7] Kiselgof M.L, Sokolov N. V. (1958). Normy raschiota i proektirovaniya pyleprigoto-vitelnykh ustanovok. Moskva, SSSR: GEI.
- [8] Mando M, Rosendahl L, Yin C, Sorensen H. (2010). Pulverized Straw Combustion in a Low-NOx Multifuel Burner: Modelling, the Transition From Coal to Straw. *Fuel* 89(10): 3051-3062.
- [9] Repić B. (1992). Uticaj konstruktivnih i radnih karakteristika gorionika na paljenje i sagorevanje ugljenog praha. Ph.D. diss, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.

- [10] Repic B, Dakic D, Eric A, Djurovic D, Marinkovic A, Nemoda S. (2013). Investigation of the cigar burner combustion system for baled biomass. Biomass and Bioenergy 58: 10-19.
- [11] Shagalova S. L, Shnicer I. N. (1976). Szhiganie tverdovo topliva v topkakh parogeneratorov. Leningrad, SSSR: Energiya.
- [12] Yang Y. B, Ryu C, Khor A, Yates N, Sharifi V, Swithenbank J. (2005). Effect of Fuel Properties on Biomass Combustion. Part II. Modelling Approach - Identification of the Controlling Factors. Fuel 84(16): 2116–2130.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FUEL TYPES AND BURNERS CHARACTERISTICS ON PULVERISED BIOMASS COMBUSTION

Branislav Repić, Aleksandar Erić, Borislav Grubor, Dragoljub Dakić, Goran Živković

SUMMARY

Pulverized fuel firing is one of the wide modes of fuel utilization. For successful combustion of pulverized fuel it is necessary to ensure adequate conditions by the appropriate choice of burners and furnace characteristics. Combustion of pulverized fuel with swirl burners utilizing the swirl effects is very significant and widely used. Swirl flows are used extensively because of their favourable influence on stabilization and intensification of the combustion process and reduction of NO_x emission. Optimal operating conditions of pulverized fuel combustion depend on burner characteristics and fuel properties. In the paper are presented the results of investigation of influence that constructive and operating parameters of burner's characteristics and fuel properties exert on pulverized fuel combustion. Investigation of combustion of several types of fuels (biomass and coal) in swirl burner models and prototypes were performed. Influence of the following parameters was investigated: constructive parameters of burners (type, quarl), burner's operating parameters (velocity, temperature and quantity of air, swirl number, excess air, concentration of pulverized fuel), and fuel properties (type, quality, moisture, ash, volatile and combustible matters contents, pulverized fuel grinding fineness etc.).

Key words: Combustion, swirl burner, biomass, pulverized fuel.

Napomena: Rad je realizovan u okviru projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije „Razvoj i unapređenje tehnologija za energetski efikasno korišćenje više formi poljoprivredne i šumske biomase na ekološki prihvatljiv način, uz mogućnost kogeneracije“, Ev. broj projekta III42011.

Primljeno: 17. 02. 2016. god.

Prihvaćeno: 08. 03. 2016. god.