

Kotlovi za sagorevanje goriva u fluidizovanom sloju

MIRJANA S. LAKOVIĆ, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš

MILICA M. JOVIĆ, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš

BRANISLAV V. STOJANOVIĆ, Univerzitet u Nišu,

Mašinski fakultet, Niš

Pregledni rad

UDC: 621.181

662.612.3

DOI: 10.5937/tehnika1504625L

Sagorevanje goriva u fluidizovanom sloju je proces sagorevanja koji je trenutno aktuelan i kojem se svakog dana daje veća pažnja i postoje brojna istraživanja koja su usko povezana sa ovom tehnologijom. Ova tehnologija sagorevanja je dosta zastupljena i stalno se usavršava zbog niz prednosti koje ona pruža, a pre svega i zbog smanjene emisije štetnih gasova. U ovom radu se prikazuju kotlovi za sagorevanje u fluidizovanom sloju, koje su njihove karakteristike i prednosti. Prikazan je razvoj kotlova za ovaj vid sagorevanja u Republici Srbiji. Objavljen je i sam pojam sagorevanja u fluidizovanom sloju. Kotlovi za ovaj vid sagorevanja mogu se unaprediti i samim tim povećaće se njihov stepen korisnosti. Detaljnije karakteristike date su za kotlove sa mehurastim i cirkulacionim fluidizovanim slojem kao i njihovo međusobno poređenje.

Ključne reči: kotlovi, sagorevanje, fluidizovani sloj

1. UVOD

Razvoj sagorevanja u fluidizovanom sloju (FS) počeo je sa Vinkler patentom za gasifikaciju lignita (1922 godine) [1, 2]. Tehnologija se koristi za različite primene od tada. Ovaj cilj vremenom je evoluirao u "čistu energiju za budućnost". Od uvođenja 1970-e, tehnologija je prihvaćena u različitim industrijskim sistemima. Iako su prva pilot postrojenja sa sagorevanjem u fluidizovanom sloju puštena u rad 60'tih i 70'tih godina prošlog veka, punu tehnološku zrelost sagorevanja u fluidizovanom sloju se postiže polovinom osamdesetih i od tada ova tehnologija je opšte prihvaćena pre svega zbog velike fleksibilnosti u pogledu goriva. Poznata je po svojoj sposobnosti da spali nekvalitetana goriva sa niskom vrednošću toplotne moći, zatim goriva sa visokim sadržajem pepela i visoke vlažnosti. Druge prednosti su smanjenje emisije štetnih gasova, ponovno korišćenje neopasnog nusproizvoda iz procesa odsumporavanja (npr. gips) i mogućnost da se ova tehnologija može primeniti u već izgrađenim postrojenjima. Gorivo, koje čini 1-3% mase ukupnog materijala sloja, sagoreva u usijanom sloju inertnog materijala (kvarcni pesak, pepeo, krečnjak/-sor bent) koji se usled prostrujavanja vazduha sa dna ložišta nalazi u stanju lebdenja i pokazuje svojstva sli-

čna tečnosti - nalazi se u stanju fluidizacije [3].

Fluidizacija je takvo stanje, koje nastaje kada fluid opstrujava čestice čvrstog materijala u smeru suprotnom od gravitacije i prividno smanjuje njihovu masu. U trenutku prelaska sloja iz stanja mirovanja u fluidizovano stanje sila otpora prolaza gasa kroz sloj čestica jednaka je težini čestica u sloju. Pošto je fluid međusobno razdvojio čestice sloja, sloj više ne može da izdrži smičuću silu i počinje da se ponaša kao tečnost. Sloj čvrstog sitnozrnog materijala, koji ima ovakve karakteristike naziva se fluidizovani sloj.

Brza disperzija unetog goriva u velikoj masi temperiranog inertnog materijala, intenzivno mešanje goriva, velika površina za razmenu i brz prenos toplote dodirnom sa česticama sloja omogućavaju sagorevanje goriva na nižoj temperaturi (760-900°C) u odnosu na kotlove sa sagorevanjem u letu. Niža temperatura sagorevanja znači značajno smanjeno formiranje termičkog NO_x, dok se efikasno zadržavanje sumpora i halogena u ložištu postiže uvođenjem krečnjaka ili dolomita u sloj.

2. KARAKTERISTIKE KOTLOVA ZA SAGOREVANJE U FLUIDIZACIONOM SLOJU

Zavisno od režima fluidizacije tj. brzine prostrujavanja gasova kroz sloj razlikuju se [1]:

- stacionaran ili mehurast fluidizovani sloj i
- cirkulacioni fluidizovani sloj.

Mehurast fluidizovani sloj je takav sloj u kome se čestice sloja intenzivno haotično kreću, ali je sloj kao

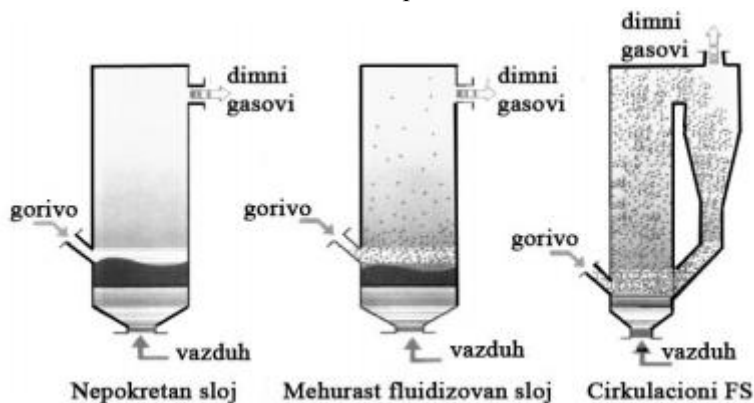
Adresa autora: Mirjana Laković, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš, Aleksandra Medvedeva 14

Rad primljen: 08.08.2014.

Rad prihvaćen: 28.01.2015.

celina nepokretan. A kod cirkulacionog fluidizovanog sloja inertni materijal sloja se nalazi u režimu brze fluidizacije i kreće se kroz celo ložište vertikalno naviše, a zatim se izdvojen iz struje produkata sagorevanja vraća na dno ložišta.

Na osnovu ove podele režima fluidizacije razlikujemo kotlove sa mehurastim i cirkulacionim fluidizovanim slojem (slika 1) koji mogu raditi u uslovima atmosferskog pritiska ili u uslovima povišenog pritiska.



Slika 1 - Stanje fluidizacije u ložištu sa fluidizovanim slojem

U sledećoj tabeli prikazana je uopredna analiza ova dva tipa kotlova.

Tabela 1. Uopredne karakteristike kotlova sa mehurastim (MFS) i cirkulacionim fluidizacionim slojem (CFS)

Parametar	MFS	CFS
Temperatura sagorevanja (°C)	760-870	800-900
Brzina fluidizacije (m/s)	1-3	3-10
Srednji parametri pare		
Protok pare (kg/s)	13-139	12-360
Temperature pare (°C)	150-543	180-580
Pritisak pare (bar)	10-160	10-275

Kotlovi sa cirkulacionim FS u odnosu na kotlove sa mehurastim FS imaju: veću efikasnost sagorevanja, efikasnije zadržavanje sumpora u sloju, manji poprečni presek ložišta i manji broj dozir-mesta po poprečnom preseku ložišta. Istovremeno, kotlovi sa CFS su znatno složenije konstrukcije.

Može se zaključiti da kotlovi sa MFS i CFS nisu međusobno konkurentni ili ako jesu to je u veoma uskom opsegu instalisanih snaga. Naime, kotlovi sa MFS imaju prednost u oblasti manjih i srednjih snaga do 50 MWth, pri sagorevanju reaktivnijih goriva, goriva sa veoma promenljivim sadržajem vlage, naročito pri sagorevanju otpada i biomase, i u slučaju umerenih propisa o emisiji. MFS kotlovi, toplovodni i parni, su našli primenu kao industrijski kotlovi (za proizvodnju toplotne ili kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije) i u sistemima centralnog i daljinskog grejanja. Kotlovi sa CFS imaju prednost u oblasti većih snaga (preko 100 MW) pri sagorevanju niskoreaktivnih ugljeva i u uslovima oštih propisa o emisiji. Gotovo da su isključivo parni, industrijski, a odskora su integrisani i u elektroenergetske sisteme. U oblasti snaga 50÷100 MWth, oba tipa kotla sagorevanja u FS su ravnopravna i koji će tip kotla biti odabran zavisi od

konkretnih eksploatacionih uslova i tehno-ekonomskih pokazatelja. Iako kotlovi sa MFS i CFS funkcionišu na istom principu (sagorevanje u sloju temperiranog inertnog materijala), njihovi konstrukcioni parametri se veoma razlikuju i zavise pre svega od vrste goriva i zahtevanih parametara pare, propisanih regulativa o emisiji, od proizvođača, karakteristika mesta instaliranja i sl.

3. PREDNOSTI SAGOREVANJA U FLUIDIZOVANOM SLOJU

Sagorevanje u fluidizovanom sloju je tehnika koja omogućava sagorevanje uglja sa niskom emisijom NO_x i SO_x. Takođe, usled standardnih operativnih uslova dolazi do smanjenog formiranja SO₂, dok se znatan N₂O može proizvesti prilikom sagorevanja u fluidizovanom sloju, a upravo N₂O značajno doprinosi efektu staklene bašte i oštećenju ozonskog omotača [4].

Prilikom FS, devolatilizacija uglja javlja se za manje od 1s, dok oksidacija čađi može da traje i nekoliko minuta. Tokom sagorevanja uglja, gorivo je podeljeno između isparljivih čestica, katrana i čađi, a dostupnost kiseonika je uglavnom odgovorna za

smanjeno ispuštanje azotnih oksida. Iz tog razloga, i zbog niskih temperatura potrebnih za sagorevanje u FS, skoro svi oksidi azota se formiraju za vreme reakcije uglj-azot sa kiseonikom, što je dovelo do formiranja NO_x i N₂O.

Niska primarna emisija SO₂ je svojstvena sagorevanju u fluidizovanom sloju. Odstranjivanje sumpordioksida sagorevanjem uglja u pećima sa fluidiziranim ložištem smanjuje sumpordioksid za 90% dodavanjem određene količine kalcijuma [2].

Smanjenje sadržaja sumpora tokom sagorevanja ubacivanjem krečnjaka takođe ima efekta. Kako je krečnjak relativno jeftin, treba voditi računa pre svega o deponovanju viška krečnjaka.

Krečnjak na nižoj temperaturi ne reaguje samo sa SO₂ formirajući kalcijum sulfat i kalcijum sulfid već vezuje i hlorovodonike i formira tečnu ili čvrstu fazu kalcijum hlorida. Šta više, intenzivno mešanje gasova u sloju sprečava formiranje CO i nesagorelih ugljovodonika čime se dobija visoka efikasnost sagorevanja [5].

Postupak odsumporavanja gasova uz pomoć krečnjaka vrši se uvođenjem kalcijuma u ložište u obliku krečnjaka i hidratisanog kreča. Kod kotlova koji sagorevaju niskokalorična goriva, čija temperatura plamena ostaje relativno niska, ostvareni su dobri uslovi za vezivanje SO₂. Temperatura ima najveći značaj za proces iz dva osnovna razloga: kalcijum-sulfat nije stabilan iznad 1200°C i kalcinirani krečnjak može da izgubi reaktivnost pri pregrevanju zbog sinterovanja. Hidratirani kreč se ubacuje pneumatski u ložište iznad gorionika, pri čemu se postiže odsumporavanje od 60%. Negativna karakteristika ovog sistema za odsumporavanje dimnih gasova je povećanje elektrofilter-skog pepela za 12% [6].

4. RAZVOJ KOTLOVA ZA SAGOREVANJE U FLUIDIZOVANOM SLOJU U REPUBLICI SRBIJI

U Srbiji je 1975. godine započet program istraživanja i razvoja tehnologije sagorevanja u FS [3]. U

narednih pet godina, 1980. godine izgrađena su dva eksperimentalna ložišta za sagorevanja čvrstih goriva u mehurastom fluidizovanom sloju i to jedan snage 2 kWth i drugi snage 200 kWth u Institutu u Vinči. Iste godine u fabrici „Cer” u Čačku izgrađena su dva prototipa ložišta za sagorevanje u FS snaga od po 0.5 MWth i 1 MWth.

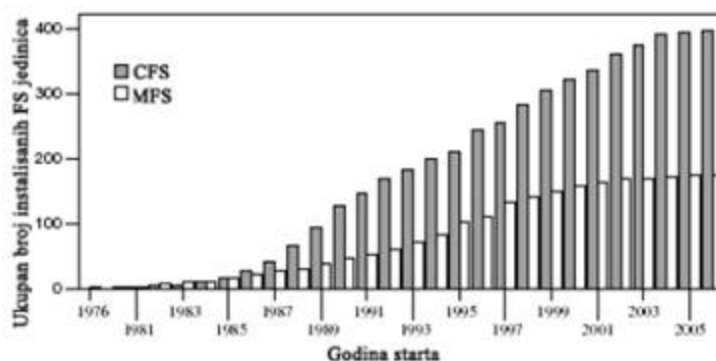
Prva dva industrijska ložišta za sagorevanje uglja u FS izgradila je i pustila u rad takođe fabrika „Cer” iz Čačka godine 1982. koji su bili snage po 4,5 MWth. Od tada je ova fabrika proizvela i pustila u rad više od 40 ložišta sa SFS snage od 1-4,5 MWth, koja sagorevaju uglj i biomasu. Iste godine Institut Vinča u saradnji sa fabrikom “Cer” i fabrikom kotlova MINEL, počinje razvoj kotlova SFS.

Godine 1986. u Institutu u Vinči pušten je u rad prvi industrijski kotao u bivšoj Jugoslaviji, snage 10 MWth. Kotao je izgrađen rekonstrukcijom postojećeg kotla na mazut. Takođe, godine 1986. dodeljena je Oktobarska nagrada grada Beograda dodeljena je za kotao u Vinči i do tada realizovane kotlove sa FS. Dve godine nakon toga fabrika kotlova MINEL pušta u rad dva parna kotla SFS, snage 2,5 MWth a fabrika MIN, Niš gradi kotao SFS snage 6 MWth. Godine 1990. Fabrika kotlova MINEL je za potrebe industrije celuloze konstruisala kotao SFS kapaciteta 20 t/h pare.

Ministarstvo za nauku i tehnologiju Republike Srbije od 2009. godine, ponovo finansira projekat sa tematikom FS. Otvaraju se perspektive za manje jedinice za sagorevanje raznog otpadnog goriva u MFS. Demonstracioni industrijski toplovodni kotao izgrađen je 2011. godine za MFS u fabrici TIPO kotlogradnja u Beogradu u saradnji sa Institutom Vinča.

5. STATUS I PERSPEKTIVE RAZVOJA KOTLOVA SA FS

Može se smatrati da je tehnologija sagorevanja u FS dostigla svoju punu zrelost za kogenerativnu i industrijsku primenu. Njen razvoj na nivou celog sveta, u svoje dve osnovne varijante (MFS i CFS) prikazan je kumulativnim dijagramom (slika 2).



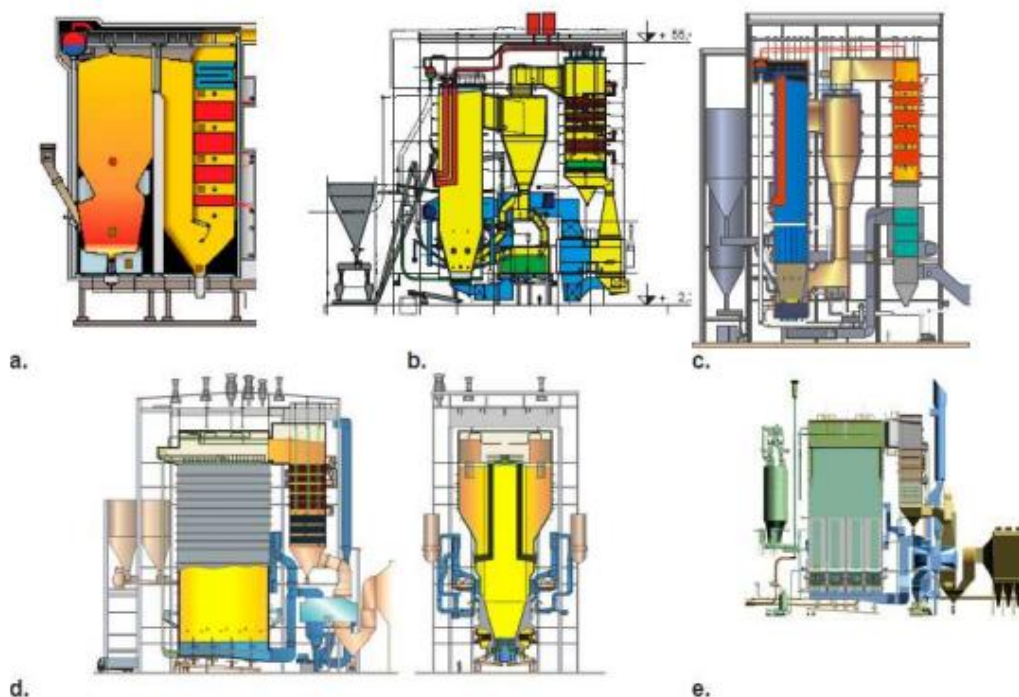
Slika 2 - Širenje tehnologije sagorevanja u fluidizovanom sloju na nivou celog sveta [1]

MFS pokazuje ravnomerniji godišnji rast instaliranih kapaciteta (skok je zabeležen ranih 90'tih) od CFS tehnologije koja eksponencijalno raste u periodu od 1986.-2003. godine i po broju instaliranih jedinica globalno prevazilazi prethodnu tehnologiju.

Šira primena tehnologije sa sagorevanjem u FS nije ograničena samo na SAD i Evropu (Veliku Britaniju, Nemačku i skandinavske države - Finsku i

Švedsku) već je ona u ekspanziji i u azijskim državama posebno Kini, Indiji i Japanu. Pokretači razvoja i širenja SFS tehnologije su regulisano tržište, propisi vezani za zaštitu životne sredine, specifičnosti koji se razlikuju od regiona do regiona, a vezani su pre svega za raspoloživo gorivo (njegov kvantitet i kvalitet).

Na slici 3 data su neka od konstrukcionih rešenja FS kotlova sa radnim parametrima.



Slika 3 - Neka od konstrukcionih rešenja FS kotlova: a. MSF kotao Metso Power ACZ za sagorevanje otpada; b. energetski CFS kotao Alstom Sulcis, Italija (340 MWe, parametri pare: 197 bara, 565/580°C, 1026 t/h), pušten u rad 2006.; c. energetski CFS kotao Metso Power CZMIC, Manitoowoc Public Utilities, Viskonsin, SAD (160 MWth, 60kg/s, 103 bara, 541 °C), sagoreva naftni koks, mrki ugalj, startovan 2005.; d. jedan od 3 kompaktna Foster Wheeler energetska CFS kotla u Turow'u u Poljskoj (3x557 MWth, 195/181 kg/s, 170/39 bara, 568/568°C) gorivo-lignit, startovane od 2003. do 2004.; e. Foster Wheeler superkritični energetski CFS kotao, Lagisza, Bedzin, Poljska (996 MWth, 361/306 kg/s, 275/50 bara, 560/580 °C), startovan 2009. godine

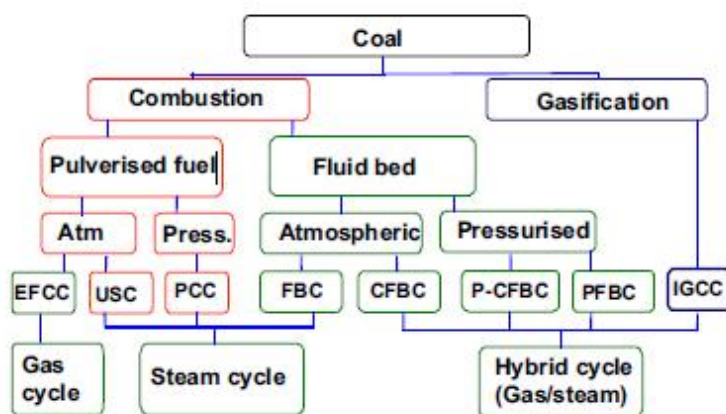
Problem globalnog zagrevanja traži nove i efikasnije metode sagorevanja u FS (superkritični energetski CFS kotao-Lagisza npr. povećanjem svoje efikasnosti smanjuje emisiju CO₂; kosagorevanje biomase i uglja je takođe način smanjenja emisija CO₂), uključujući i postrojenja sa 0-tom emisivnošću CO₂ tj. postrojenja sa takozvanim izdvajanjem i skladištenjem CO₂.

Trenutno su, što se SFS tehnologije tiče, razvijena dva procesa: sagorevanje u atmosferi obogaćenoj kiseonikom i oksidacija goriva u dvostepenom hemijskom reaktoru.

Sagorevanje u atmosferi obogaćenoj kiseonikom podrazumeva proces sagorevanja goriva u smeši čistog kiseonika i recirkuliranih dimnih gasova, gde se

temperatura sagorevanja reguliše količinom recirkuliranih dimnih gasova. Kiseonik potreban za proces sagorevanja se dobija u uređaju za separaciju vazduha. Ovaj proces primenjen na tehnologiju sagorevanja u FS još je uvek u demonstracionoj fazi na pilot postrojenjima male snage [7].

Drugi proces baziran na SFS tehnologiji je oksidacija goriva u dvostepenom reaktoru, u kome se čestice oksida metala (gvožđe, nikel, bakar ili mangan) koriste za transport kiseonika iz vazduha do goriva. Sistem se sastoji od dva odvojena reaktora za vazduh i gorivo. Na slici 4 se vidi kako je moguće iskoristiti ugalj i koje sve metode sagorevanja uglja postoje. Sagorevanje u fluidizacionom sloju je dosta razvijena metoda ali moguće je i dalje unaprediti ovu metodu i dobiti značajna poboljšanja [8].

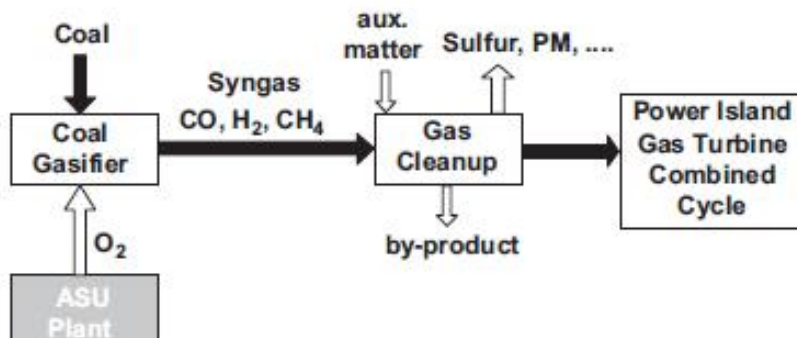


Slika 4 - Napredne tehnologije za sagorevanje uglja

1. EFCC Sagorevanje spoljnim paljenjem u kombinovanom ciklusu
2. USC Ultra-super kritična postrojenja
3. PCC Sagorevanje uglja u prahu
4. FBC Sagorevanje u fluidizovanom sloju
5. CFBC Sagorevanje u fluidizovanom cirkulacionom sloju
6. P-CFBC Sagorevanje u fluidizovanom cirkulacionom sloju pod pritiskom
7. PFBC Sagorevanje u fluidizovanom sloju pod pritiskom
8. IGCC Integrisani gasni kombinovani ciklus

Tehnologija sagorevanja metodom IGCC predstavlja budućnost u pogledu razvijanja tehnologije FS. Sama tehnologija IGCC podrazumeva najpre,

pretvaranje uglja u gas (najviše CO i H₂), zatim su uklonjeni sulfat, pepeo i živa kao i drugi zagađivači i čist gas je dalje poslat u centralno postrojenje (slika 5).



Slika 5 - Šematski prikaz IGCC tehnologije

Efikasnost ovog postrojenja je od 35-42%. IGCC je u osnovi najčistija tehnologija sagorevanja ugljenika sa znatno smanjenim SO_x, NO_x, i PM, sa smanjenim čvrstim otpadom i zagađujućim vodama i sa najjeftinijim putem odvajanja CO₂.

6. ZAKLJUČAK

Imajući u vidu energetska krizu, kao i stalno smanjivanje prirodnih resursa, jedan od osnovnih ciljeva istraživanja jeste racionalizacija upotrebe energenata, povećanje energetske efikasnosti postrojenja kao i smanjenje emisije štetnih gasova.

Sagorevanje u fluidizovanom sloju je tehnologija koja osvaja sve više prostora među klasičnim načinima sagorevanja. Osnovni razlog tome jeste velika fleksibilnost goriva.

Osnovna karakteristika sagorevanja u fluidizovanom sloju je da se sagorevanje goriva obavlja u fluidizacionom sloju nekog inertnog materijala. Inertni materijal (pesak, krečnjak ili pepeo uglja) ne učestvuje u hemijskim procesima sagorevanja ali svojim prisustvom stvara povoljne uslove za sam proces sagorevanja, čak i niskokaloričnih ugljeva koji se koriste u raznim postrojenjima.

Kotlovi koji rade po principu sagorevanja u fluidizovanom sloju su efikasniji i manje štetni po okolinu u odnosu na klasične, konvencionalne kotlove. Postoji mnogo varijanti kotlova za sagorevanje u fluidizovanom sloju ali posebno su se izdvojili kotlovi sa mehurastim i cirkulacionim fluidizacionim slojem. U ovom radu je dat pregled osnovnih karakteristika i tipova ovih kotlova.

LITERATURA

- [1] Koornneef, J, Jungiger, M, Faaij, A, Development of FBC-An overview of trends, performance and cost, Progress in Energy and Combustion Science 33 19-55, 2007.
- [2] Leckner B, Fluidized bed combustion: mixing and pollutant limitation, Progress in Energy and Combustion Science 24, 31-61, 1998.
- [3] M. R. Mladenović, Istraživanje termomehaničkih procesa prilikom razgradnje tečnih goriva velikih gustina u fluidizovanom sloju, doktorska disertacija, Beograd 2013.
- [4] Valentim, B, Lemos de Sousa, M. J, Abelha, P, Boavida, D, Gulyurtlu, I, "Combustion studies in a fluidized bed—the link between temperature, NO_x and N₂O formation, char morphology and coal type", International Journal of Coal Geology, 191-201, 2006.
- [5] Ravelli, S, Perdichizzi, A, Barigozzi, G, Description, Applications and Numerical Modelling of Bubbling Fluidized Bed Combustion in Waste-to-Energy Plants, Progress in Energy and Combustion Science 34, 2, 224-253, 2008.
- [6] Petrović, M, Bogdanović, B, "Mogućnosti smanjenja emisije zagađujućih materija iz termoelektrana u Srbiji", JKP "Beogradske elektrane", Beograd
- [7] Johnsson, F, Fluidized Bed Combustion for Clean Energy, Proceedings, 2007 ECI Conference, The 12th International Conference on Fluidization - New Horizons in Fluidization Engineering, Vancouver, Canada, , 2, 46-62, 2007.
- [8] Franco, A, Diaz, A, "The future challenges for „clean coal technologies“: Joining efficiency increase and pollutant emission control", Energy, Volume 34, Issue 3, 348-354, March 2009.

SUMMARY

BOILER FOR COMBUSTION FUEL IN A FLUIDIZED BED

Fuel combustion in fluidized bed combustion is a process that is current and which every day gives more attention and there are many studies that have been closely associated with this technology. This combustion technology is widespread and constantly improving the range of benefits it provides primarily due to reduced emissions. This paper presents the boilers for combustion in a fluidized bed, their characteristics and advantages. Also is shown the development of this type of boilers in Republic of Serbia. In this paper is explained the concept of fluidized bed combustion. Boilers for this type of combustion can be improved and thereby increase their efficiency level. More detailed characteristics are given for boilers with bubbling and circulating fluidized bed as well as their mutual comparison.

Key words: boilers, combustion, fluidized bed