

REKONSTRUKCIJA GASNOG KOTLA ZA DOMAĆINSTVA U CILJU ZNAČAJNOG POBOLJŠANJA PERFORMANSI

Prof. dr Mirosljub Adžić, dipl. inž.
Mašinski fakultet, Beograd

Doc. dr Vasko Fotev, dipl. inž.
Mašinski fakultet, Beograd

Aleksandar Milivojević, dipl. inž.
Mašinski fakultet, Beograd

Vojislav Jovičić, dipl. inž.
Mašinski fakultet, Beograd

Gordana Milekić, dipl. inž.
Mašinski fakultet, Beograd

Martina Bogner, dipl. inž.
Mašinski fakultet, Beograd

Vuk Adžić, inž.
Mašinski fakultet, Beograd

U radu je prikazana rekonstrukcija gasnog kotla za domaćinstva, sa ciljem značajnog poboljšanja performansi kako bi se zadovoljili evropski propisi o emisiji i omogućila racionalnija primena gasa u domaćinstvima.

Ključne reči: sagorevanje u poroznoj sredini, gasni kotlovi za domaćinstva, gorionici

UVOD

Sve oštriji zahtevi za očuvanje životne okoline i poboljšanje efikasnosti, doprineli su razvoju u oblasti sagorevanja i ponovnoj aktuelizaciji privremeno napuštenih tehnologija kao što je sagorevanje u poroznoj sredini. Ovaj vid sagorevanja je poznat još od početka prošlog veka, ali tek sa naglim razvojem tehnologije, pre svega keramičkih materijala, postaje ponovo interesantan.

Sagorevanje u poroznoj sredini se zasniva na predhodno ostvorenoj smeši goriva i vazduha koja se kontinualno uvodi u složenu poroznu matricu. Hemijske reakcije se odvijaju u slobodnom prostoru matrice, čiji su zidovi najčešće hemijski inertni. Istraživanja pokazuju da ovaj vid sagorevanja ima neke značajne prednosti u odnosu na klasične sisteme sagorevanja u slobodnom prostoru.

Gorionici sa poroznom sredinom imaju poboljšanu stabilnost sagorevanja u širokom opsegu koeficijenta viška vazduha sve do blizine granične vrednosti upaljivosti siromašne smeše, veliku elastičnost u radu (odnos maksimalne i minimalne toplotne snage gorionika može da pređe 10:1), sagorevanje se ostvaruje sa relativno niskom temperaturom plamena i dovoljnim raspoloživim vremenom za hemijske reakcije što ima za posledicu nisku emisiju NO_x, CO i čestica (emisija NO_x<7 [mg/kWh], a CO<25 [mg/kWh]). Ova tehnologija omogućuje sagorevanje različitih vrsta gasovitih goriva, a takođe i veliku oslobođenu toplotu po jedinici izlazne površine gorionika. Tehnologija sagorevanja u poroznoj sredini dozvoljava konstrukcije komora za sagorevanje složenih oblika, što u kombinaciji sa konvencionalnim tehnikama sagorevanja proširuje područje primene ovih gorionika. Ključni element ovog vida sagorevanja je složeni mehanizam razmene toplote porozne strukture. Zidovi matrice primaju toplotu konvekcijom od produkata sagorevanja,

zračenjem i kondukcijom od susjednih zidova, istim mehanizmima predaju toplotu susjednim slojevima matrice, a zračenjem i konvekcijom, okolini. Navedene povoljne performanse su posledica visoke toplotne provodljivosti i radijacionih svojstava zidova matrice, kao i lokalnih recirkulacionih zona koje bitno povećavaju brzinu zagrevanja sveže gorive smeše i lokalno stabilišu plamen. Sposobnost dobre stabilizacije plamena omogućuje ovim gorionicima sagorevanje širokog spektra goriva kao što su: prirodni gas, propan, butan, biogas, benzinske i dizelske frakcije, ulja za loženje i druga.

Ograničavajući faktori su maksimalna radna temperatura materijala matrice, moguća degradacija matrice usled toplotnih šokova za vreme nestacionarnog rada gorionika, kao i stabilnost plamena. Ovo su osnovni kriterijumi koji definišu maksimalnu toplotnu snagu gorionika.

Prenos toplote gorionika sa poroznom sredinom u okolinu se ostvaruje konvekcijom i zračenjem. Deo prenet zračenjem zavisi od više činilaca, a pre svega od vrste goriva, koeficijenta viška vazduha, specifične snage gorionika, vrste materijala, strukture, geometrije, koeficijenta emisije poroznog sloja, temperature i emisionih karakteristika okoline. Udeo prenete toplote zračenjem u odnosu na ukupnu toplotu oslobođenu sagorevanjem goriva, zavisno od gore pomenutih parametara, se kreće od oko 20 do preko 70%. Dobre performanse ovoj tehnologiji sagorevanja pružaju odlične mogućnosti za široku primenu. Zbog srazmerno malih dimenzija, male emisije zagađujućih produkata sagorevanja, relativno velike specifične toplotne snage i pogodnosti široke regulacije snage, ovi gorionici su pogodni za primenu u sistemima za zagrevanje kako industrijskih i stambenih objekata tako i u sistemima za pripremu sanitarne tople vode. Prednost ovih sistema je u tome što kombinovanjem sa modernim sistemima numeričkog upravljanja postaju još efikasniji i ekonomičniji.

U radu je prikazana rekonstrukcija jednog gasnog kotla za domaćinstva, zamenom klasičnog gorionika gorionikom sa poroznom sredinom. Dobijeni rezultati pokazuju bitno smanjenje emisije polutanata i povećanje dinamičkog opsega rada.

OSNOVI PRINCIPA SAGOREVANJA U POROZNOJ SREDINI

Prethodno pripremljena smeša goriva i vazduha se uvodi u difuzor, a zatim kroz zonu sa malim porama (reda veličine 1 [mm]), čiji je zadatak dvostruk: da ravnomerno raspodeli protok smeše po izlaznoj površini (koja je istovremeno i ulazna površina zone sagorevanja) i istovremeno da spreči uvlačenje plamena u komoru za mešanje. Problemi stabilizacije plamena u šupljinama porozne sredine i sprečavanja uvlačenja plamena u zonu mešanja su vezani za fundamentalnu karakteristiku - rastojanje gašenja. Rastojanje gašenja plamena je definisano Peclet-ovim brojem, Pe:

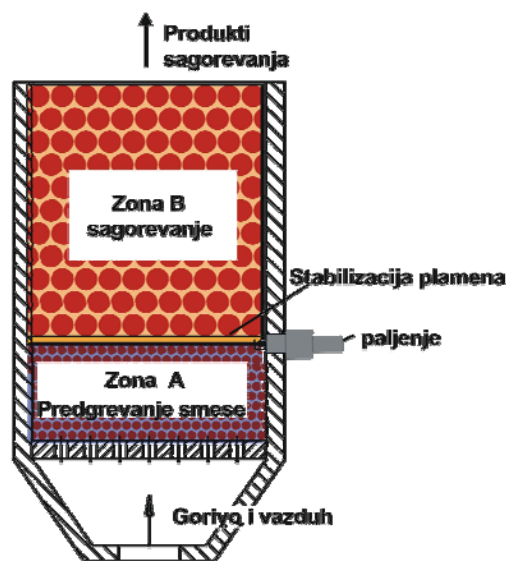
$$Pe = \frac{S_l \cdot d_m \cdot c_p \cdot \rho}{\lambda}$$

gde su:

S_l - brzina prostiranja laminarnog plamena, d_m - rastojanje gašenja plamena (kritični prečnik pora), c_p - specifični toplotni kapacitet smeše goriva i vazduha, ρ - gustina smeše goriva i vazduha, λ - koeficijent toplotne provodljivosti smeše goriva i vazduha.

Kritična vrednost Pe broja pri kome je moguće sagorevanje u poroznoj sredini zavisi od vrste goriva i za metan treba da bude veća od 65.

Na slici 1 dat je shematski prikaz gorionika sa sagorevanjem u poroznoj sredini.

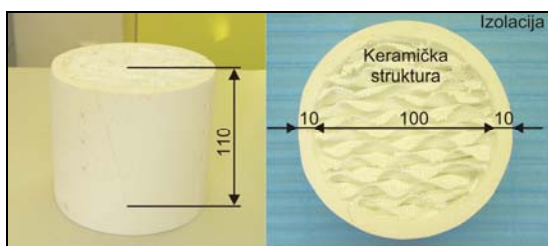


Slika 1. Shematski prikaz gorionika sa sagorevanjem u poroznoj sredini

U užem smislu gorionik čine dve zone, na slici 1 obeležene kao zona A i zona B, koje su u principu od istog materijala, ali sa bitno različitim srednjim prečnicima pora. Zona A ima

pore malog prečnika tako da je $Pe \ll 65$, dok zonu B čine pore relativno velikog prečnika što odgovara $Pe \gg 65$. Prethodno pripremljena smeša goriva i vazduha se kroz zonu A uvodi u zonu B. Svrha zone A je da ravnomerno raspodeli smešu po preseku zone B kao i da spreči prodor plamena u mešač, dok se plamen stabilizuje u zoni B u kojoj se oslobađa toplota sagorevanjem gorive smeše.

Materijali koji se koriste za izradu gorionika sa poroznom sredinom su uglavnom keramički materijali ali je moguće koristiti i pogodne legure metala. Uobičajena je upotreba oksida aluminijuma, cirkonijuma kao i silicijum karbida. To su već davno poznati materijali, ali je tek tehnološki napredak u oblikovanju složenih prostornih lamelarnih oblika keramike, omogućio brz razvoj tehnologije sagorevanja u poroznoj sredini. Na slici 2 dat je izgled keramičke matrice i izgled njene strukture. Slika 3 prikazuje izgled gorionika sa poroznom sredinom u radu.



Slika 2. Keramička matrica i njena struktura



Slika 3. Gorionik u radu

IZBOR I OPIS GASNOG KOTLA

Objekat rekonstrukcije je gasni zidni kotao za domaćinstva, tip C, sa klasičnim atmosferskim gorionikom, iz proizvodnog programa "Euroteh-Gas", Zrenjanin. Kotao je izabran kao tipičan kotao kakav se najčešće koristi za potrebe grejanja i snabdevanje sanitarnom toplom vodom prosečnog domaćinstva u Srbiji (slika 4).

Istraživanja su obuhvatila određivanje referentnih performansi kotla, ugradnju izabranog keramičkog gorionika sa poroznom sredinom, potrebu rekonstrukcije ložišta kotla i razmenjivača toplote, kao i ispitivanje performansi rekonstruisanog kotla.

Kotao "Euroteh-Gas", Zrenjanin ima zatvorenu ventilisanu komoru za sagorevanje tipa "C". Malih je dimenzija i velikog učinka, a svojim izgledom uklapa se u kuhinjski nameštaj i kupatila. Karakteriše ga automatski, bešuman i bezbedan rad. Rukovanje i održavanje je jednostavno. Kotao je snage 12 [kW]. Nameđen je za grejanje sanitarne vode i za centralno grejanje.

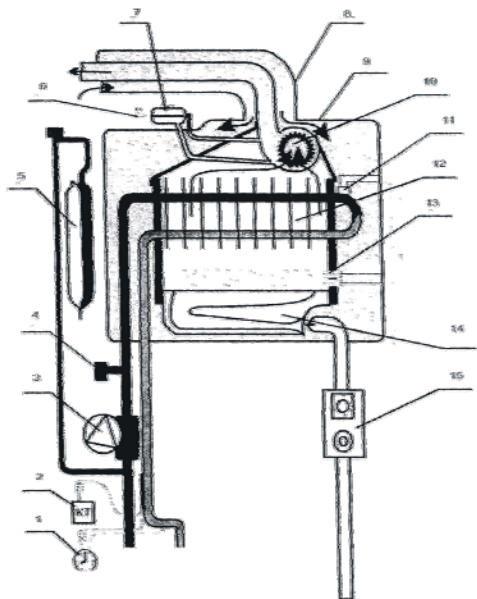


Slika 4. Kotao bez oplate na probnom stolu

Kotao se preko priključka za dovod gasa, vezuje na gasnu mrežu ili bocu sa propanbutanom, dok se na priključak za ulaz vode za grejanje dovodi voda iz vodovodne mreže. Kotao ima elektronsko paljenje. Atmosferski lamelni gorionik, izrađen od nerđajućeg čelika, zagreva vodu preko bakarnog razmenjivača toplote smeštenog u komoru za sagorevanje. Produkti sagorevanja se odvođaju prinudnom ventilacijom, pomoću ventilatora. Regulacija se vrši leptirastim ventilom. Sagorevanje i dotok vazduha se obavljaju u zatvorenoj nepropusnoj komori. Automatika kotla otvara i zatvara dotok gasa u gorionik, odnosno uključuje i isključuje gorionik prema položaju termostata na kotlu. Temperatura i pritisak grejne vode prikazuju se na termomanometru. Šema kotla je data na slici 5.

Elementi kotla sa šeme na slici 5:

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1) termomanometar | 9) nepropusna komora |
| 2) kotlovski termostat | 10) ventilator |
| 3) pumpa | 11) sigurnosni termostat |
| 4) indikator protoka | 12) izmenjivač toplote |
| 5) ekspanzioni sud | 13) elektrode za paljenje |
| 6) automatski odzračnik | 14) atmosferski gorionik |
| 7) presostat ventilatora | 15) gasni ventil |
| 8) dimovodne cevi | |



Slika 5. Šematski izgled kotla "Euroteh-Gas" Zrenjanin

Na slici 6 je prikazan referentni gorionik izabranog kotla u radu.

Odabrani kotao opremljen je pomenutim atmosferskim lamelnim gorionikom, snage 12 [kW], za koji je projektovano odgovarajuće ložište i odabran razmenjivač toplote.



Slika 6. Referentni gorionik kotla

MERENJA PERFORMANSI KOTLA I ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

Merenjem su određene radne karakteristike kotla (snaga, stepen korisnosti i emisija) u referentnom stanju i poređenje performansi istog kotla, ali sa gorionikom sa poroznom sredinom. Sve temperature su merene termo-

parovima K-tipa. Protoci gasa i vode mereni su pomoću baždarenih rotametara. Analizatorom gasa tipa TESTO 350XL meren je sastav produkata sagorevanja.

Rezultati dobijeni ispitivanjem kotla sa atmosferskim gorionikom su prikazani u prvoj koloni u tabeli 1. Izmerene vrednosti pokazuju da emisije CO i NO_x zadovoljavaju granične vrednosti emisije prema DIN 4702, prema kome su dozvoljene granice: CO_{max}<100 [mg/kWh], i NO_{xmax}<200 [mg/kWh] (tabela 1). Stepenn korisnosti ovog uređaja takođe zadovoljava minimalnu vrednost od 0,85.

Probni sto i šematski prikaz merne instalacije prikazani su na slikama 7 i 8.

Emisija [mg/kWh]	DIN 4702	Švajcarska	Blue Angel
NO _x	200	80	60
CO	100	60	50

Tabela 1. Propisane dozvoljene emisije za CO i NO_x

REKONSTRUKCIJA KOTLA

Cilj rekonstrukcije kotla je da se ugradnjom gorionika sa keramičkom poroznom strukturom dodatno smanji emisija CO i NO_x i bitno poveća dinamički opseg rada a da se pri tome ne pogorša stepen korisnosti kotla.

Ugradnja gorionika

S obzirom na dimenzije ložišta ugrađen je gorionik sa poroznom sredinom prečnika 100 [mm]. Na slici 7 prikazana je unutrašnjost gasnog kotla sa gorionikom sa poroznom sredinom na probnom stolu.



Slika 7. Izgled kotla sa ugrađenim gorionikom sa poroznom sredinom na probnom stolu

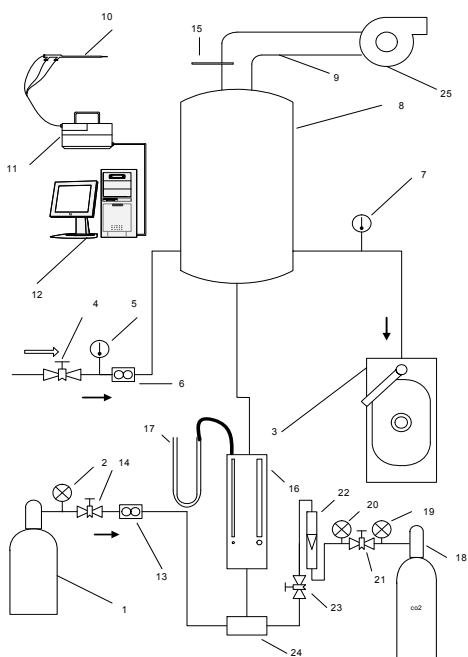
Razmena toplote gorionika

U cilju provere potrebe za rekonstrukcijom razmenjivača toplote izvršen je proračun razmene toplote. Usvojeni koeficijent viška vazduha gorionika je $\lambda=1,55$ kome odgovara povoljna emisija, relativno niska temperatura plamena i time duži radni vek gorionika, kao i stabilno sagorevanje i stabilan plamen u poroznoj sredini. Za usvojeni koeficijent viška vazduha, pri sagorevanju prirodnog gasa, izračunata je adijabatska temperatura plamena $T_1 = 1760$ [K]. Postojeći razmenjivač toplote je konvektivnog cevnog tipa sa orebrenom površinom. Na osnovu ovih podataka izračunata predata toplota zračenjem je 2,50 [kW]. To praktično znači da konkretni gorionik sa poroznom strukturom predaje oko 20% toplote zračenjem, a oko 80% konvekcijom, odnosno može da se zaključi da postojeći razmenjivač toplote zadovoljava i u uslovima prelaska na gorionik sa keramičkom poroznom sredinom. Eksperimentalna ispitivanja su potvrdila ovu pretpostavku.

ISPITIVANJA PERFORMANSI REKONSTRUISANOG KOTLA I ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

Na slici 8 dat je šematski prikaz merne instalacije.

Eksperimentalna instalacija sastoji se iz sledećih komponenta (slika 8):



Slika 8. Šema eksperimentalne instalacije

- 1 Boca sa gorivom (propan + butan)
- 2 Manometar
- 3 Slivnik
- 4 Ručni ventil
- 5 Termometar
- 6 Protokomer
- 7 Termometar
- 8 Gasni kotao
- 9 Kanal za odvod produkata sagorevanja
- 10 Sonda gasnog analizatora
- 11 Gasni analizator
- 12 Računar
- 13 Regulator pritiska
- 14 Regulacioni ventil
- 15 Merno mesto
- 16 Protokomer (Rotametar) 2
- 17 "U" cev
- 18 Boca sa CO₂
- 19 Manometar
- 20 Manometar
- 21 Regulacioni ventil
- 22 Protokomer (Rotametar) 1
- 23 Igličasti ventil
- 24 Mešač
- 25 Ventilator

Potrebno je napomenuti da je podešavanje toplotne snage ovoga sistema obavljeno na dva načina: ručnim podešavanjem protoka goriva pri konstantnom broju obrtaja ventilatora i promenom broja obrtaja ventilatora. Korišćeno gorivo je komercijalna mešavina propana i butana 45% / 55% [Vol]. Merenje protoka gasa obavljeno je prethodno izbaždarenim rotametrom. Koeficijent viška vazduha meren je analizatorom produkata sagorevanja proizvođača "Testotherm" na bazi merenja koncentracije kiseonika elektrohemijom. Za A/D akviziciju korišćen je akvizicionim sistem National Instruments „eBUS”. Merenje temperature je obavljeno termoparom (Pt-Pt-Rh 10%, S-tipa), prečnika 0,8 mm, koji je bio postavljen normalno na struju produkata sagorevanja. Merenje temperature je obavljeno na izlaznom preseku u osi gorionika neposredno iznad keramičke matrice gorionika u funkciji koeficijenta viška vazduha i toplotne snage. Temperatura okoline i gasa u boci merene su živinim termometrima. Merenje pritiska obavljeno je pomoću U cevi sa etil alkoholom, dok je atmosferski pritisak meren barometrom. Pritisak gasa u boci meren je manometrom. Sva

merjenja vezana za emisiju produkata sagorevanja obavljena su pomoću gasnog analizatora TESTO 350XL. Merenje koncentracija produkata sagorevanja je obavljeno u kanalu za odvod produkata sagorevanja.

U toku ispitivanja varirano je takođe i odstojanje površine samog gorionika u odnosu na površinu razmenjivača toplote, u cilju optimiranja položaja gorionika u odnosu na razmenjivač toplote. Odgovarajući položaj gorionika je utvrđen na 47 [mm] od površine rebrastog razmenjivača.

Dobijeni rezultati pokazuju da ugrađeni gorionik sa keramičkom poroznom sredinom prečnika 100 [mm] zadovoljava sve zahteve u pogledu toplotne snage, emisije, dinamičkog opsega rada i stepena korisnosti. Šta više, emisija CO i NO_x, i dinamički opseg rada su suštinski poboljšani, kotao zadovoljava najstrožije, "Blue Angel", norme emisije, a dinamički opseg rada je povećan 6 puta.

U tabeli 2 prikazani su uporedni rezultati dobijeni ispitivanjem kotla sa atmosferskim gorionikom (referentni kotao) i rekonstruisanog kotla sa gorionikom sa poroznom strukturom. Pri istoj snazi i stepenu korisnosti kotla sa gorionikom porozne strukture postignute su bitno niže emisije NO_x (6 puta), CO (4 puta) i povećan dinamički opseg rada (6 puta).

	Atmosferski gorionik	Gorionik sa poroznom strukturom
Emisija NO _x [mg/kWh]:	185	32
Emisija CO [mg/kWh]:	80	23
Stepen korisnosti kotla:	0.86	0.86
Toplotna snaga kotla [kW]:	12	12
Dinamički opseg rada:	1:1,7	1:10
Stabilno sagorevanje za koeficijent viška vazduha:	Difuzioni plamen	1,1-1,9

Tabela 2.

ZAKLJUČAK

U radu su prikazani analiza i rezultati obavljene rekonstrukcije odabranog gasnog kotla, zamenom atmosferskog gorionika, gorionikom sa poroznom sredinom.

- Ugradnjom gorionika sa poroznom sredinom, emisije CO i NO_x su bitno smanjene.

- Stanje pre rekonstrukcije:

CO=80 [mg/kWh]; NO_x=185 [mg/kWh],

a nakon rekonstrukcije:

CO=23 [mg/kWh]; NO_x=32 [mg/kWh],

čime su zadovoljene i najstrožije evropske norme.

- Bitno je povećan dinamički opseg rada, sa 1:1,7 na 1:10.

LITERATURA

- /1/ M.Adžić i S.Milivojević, "Osnovi tehnologije sagorevanja u keramičkoj poroznoj sredini", Gas, god. VII, br. 4, str.5-9, Beograd, 2002.
- /2/ F.Avdzić, M.Adžić, F.Durst, G.Atagunduz, D.Trimis, "Towards Optimal Use of Porous Medium Combustion Technology in Household Heating Systems", Clean Air Conference, Lisbon, 2003.

REDESIGN OF A HOUSEHOLD BOILER WHICH SIGNIFICANTLY IMPROVED BOILER'S PERFORMANCE

The paper is concerned with the redesign of a household boiler which significantly improved boiler's performance in order to comply with the European emission standards and to improve efficiency.

Key words: combustion in porous environment, household boilers, torch