

MARIJA A. ŽIVKOVIĆ¹
MIROLJUB M. ADŽIĆ²
VASKO G. FOTEV²
ALEKSANDAR M.
MILIVOJEVIĆ²
VUK M. ADŽIĆ²
DEJAN D. IVEZIĆ¹
BOŠKO D. ČOSIĆ³

¹Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija
²Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija
³Institut za fiziku, Beograd, Srbija

NAUČNI RAD

UDK 662.767.2:546.264–31

DOI: 10.2298/HEMIND100614045Z

UTICAJ SADRŽAJA UGLJEN-DIOKSIDA U BIOGASU NA EMISIJU AZOTNIH OKSIDA

U radu je prikazano eksperimentalno istraživanje i analiza uticaja sadržaja ugljen-dioksida u biogasu na emisiju azotnih oksida. Sagorevanje biogasa različitog sastava vršeno je vihornim gorionikom sa pilot gorionikom. Rezultati pokazuju da postoji uticaj sadržaja ugljen-dioksida na emisiju azotnih oksida, i to tako da sa povećanjem sadržaja ugljen-dioksida emisija azotnih oksida opada. Ovakav trend je nepromenjen u opsegu koeficijenta viška vazduha (1,2–1,8) za koje je vršeno istraživanje. Utvrđeno je da pri nepromenjenom sastavu biogasa promena toplotne snage nema uticaja na emisiju azotnih oksida.

Goriva dobijena iz biomase, poznata kao biogoriva, jesu alternativa nedostatku fosilnih goriva u budućnosti, tako da za mnoge države ona predstavljaju i mogućnost za proizvodnju energije iz sopstvenih obnovljivih izvora. Zbog toga se predviđa stalni porast potrošnje biomase u narednim godinama, kao način obezbeđenja održivog snabdevanja energijom [1]. Među gorivima dobijenim iz biomase je i biogas. Njegov sastav je takav da sadrži značajan udeo ugljendioksida, koji predstavlja inertnu komponentu, zbog čega se biogas svrstava u gasove niske toplotne moći [2,3]. Prisustvo inertne komponente u sastavu biogasa je uzrok problema koji nastaju pri sagorevanju gasova niže toplotne moći, a vezane su u prvom redu za ostvarenje stabilnog sagorevanja.

Imajući u vidu tendenciju povećanja potrošnje obnovljivih izvora energije, problem ostvarivanja stabilnog procesa sagorevanja biogasa predmet je istraživanja mnogih naučnika. Jedan od načina je besplameno sagorevanje [4,5], tehnologija koja obezbeđuje nizak nivo emisije polutanata, naročito termičkog NO_x i ugljen-monoksida, održavajući visoku termičku efikasnost sistema. Jedna od glavnih karakteristika besplamenog sagorevanja je intenzivna recirkulacija produkata sagorevanja, kojom se smanjuje koncentracija kiseonika i temperatura u zoni reakcije, odnosno dolazi do razblaženja gorive smeše što za rezultat ima inhibiciju termičkog NO_x . Detaljna analiza sagorevanja biogasa primenom tehnike besplamenog sagorevanja prikazana je na primer u [6].

Tehnika koja daje rezultate slične besplamenom sagorevanju je sagorevanje u vihornoj struji. Zahvaljujući svojim karakteristikama, vihorno strujanje se inten-

zivno koristi u procesima sagorevanja jer obezbeđuje konverziju energije u maloj zapremini, sa dobrim performansama u širokom opsegu rada. Proces mešanja koji nastaje kao posledica prirode vihornih struja takođe doprinosi odličnoj stabilnosti plamena [7].

Sagorevanje u vihornoj struji takođe dovodi do recirkulacije, razblaženja gorive smeše i snižavanje temperaturnog gradijenta, što za posledicu ima inhibiranje termičkog NO_x i nizak nivo emisije CO [8,9]. Istraživanja pokazuju da sa porastom intenziteta vihora efekat recirkulacije raste, a emisija polutanata opada [10–12]. Intenzitet vihora se obično izražava vihornim brojem S , bezdimenzionim kriterijumom, koji predstavlja odnos aksijalnog fluksa momenta tangencijalne brzine i aksijalnog potiska gasne struje.

Kako bi se proširio opseg stabilnog sagorevanja, što se pre svega odnosi na granice oduvavanja plamena, može se koristiti dopunski, pilot gorionik, koji obično sagoreva gorivo veće toplotne moći (konvencionalno gorivo).

U ovom radu prikazana je analiza uticaja sadržaja ugljendioksida u biogasu na emisiju azotnih oksida. Za istraživanje je korišćen vihorni gorionik sa pilot gorionikom koji je opisan u našem prethodnom radu [12]. Gorionik je sa dva vihora: unutrašnjim i spoljašnjim. Unutrašnji gorionik opremljen je vrtložnikom koji indukuje unutrašnji vikor i ima ulogu pilot plamena. Spoljašnji gorionik je postavljen koaksijalno i strujanjem gorive smeše kroz spoljašnji vrtložnik indukuje se spoljašnji vikor. Dobijeni rezultati i analiza uticajnih parametara: sadržaja ugljendioksida u gorivu, koeficijenta viška vazduha i snage, prikazani su u ovom radu.

OPIS MERENJA

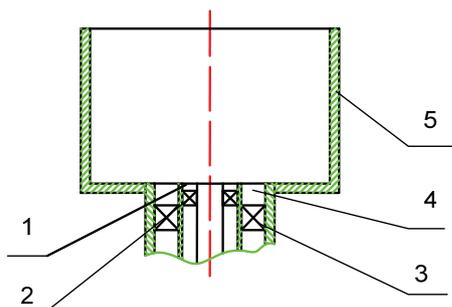
Za eksperimentalno istraživanje korišćen je vihorni gorionik opremljen pilot gorionikom, šematski prikazan na slici 1.

Autor za prepisku: M.A. Živković, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Đušina 7, 11000 Beograd, Srbija.

E-pošta: zivkovic@rgf.bg.ac.rs

Rad primljen: 14. jun 2010.

Rad prihvaćen: 29. jun 2010.



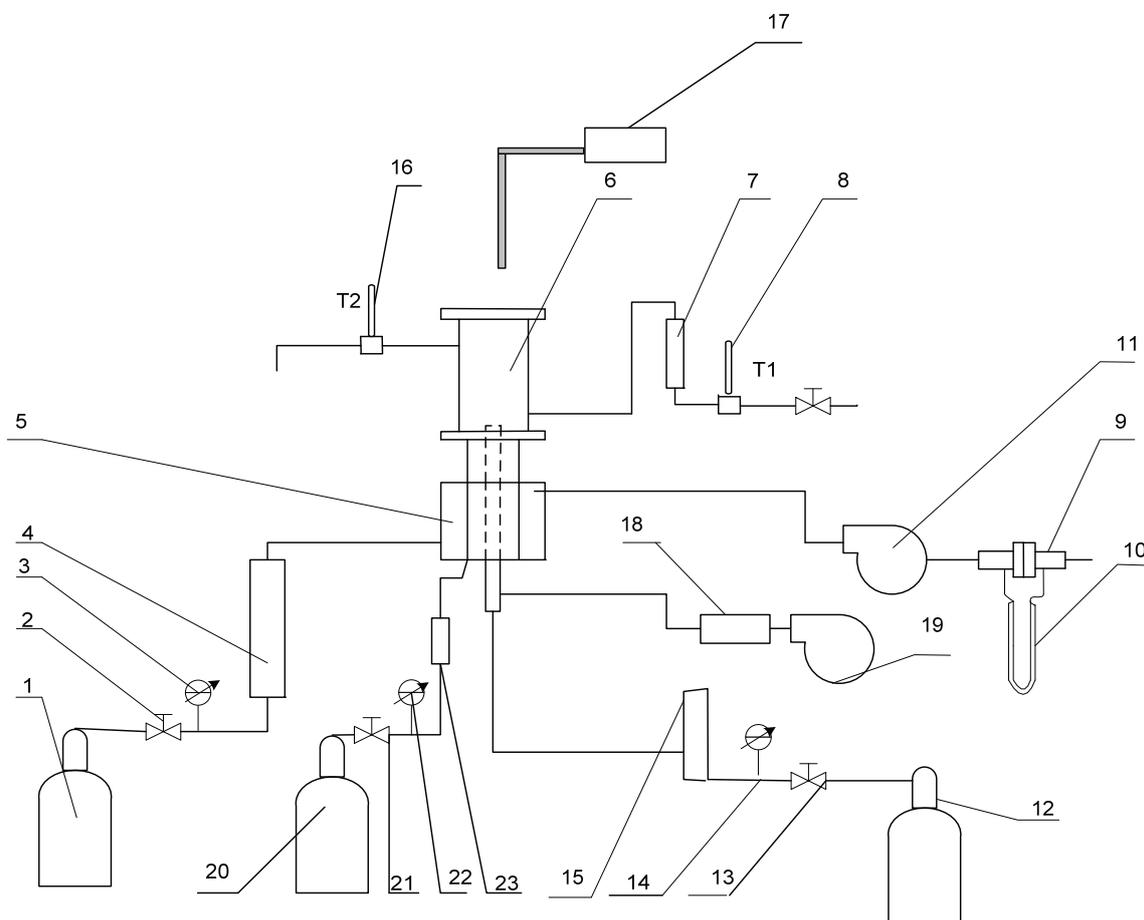
Slika 1. Šematski prikaz gorionika; 1 – pilot gorionik, 2 – unutrašnji vrtložnik, 3 – spoljašnji vrtložnik, 4 – gorionik, 5 – komora za sagorevanje.
Figure 1. Schematics of the combustor; 1 – pilot burner, 2 – inner swirler, 3 – outer swirler, 4 – burner, 5 – combustion chamber.

Izabrani su vrtložnici čiji su vihorni brojevi takvi da indukuju intenzivan vjor i to za pilot gorionik $S_1 = 1,98$ i za vihorni gorionik $S_2 = 1,13$.

U pilot gorioniku sagoreva butan, uz predhodno ostvarenje gorive smeše sa vazduhom. Istraživanje je vršeno sa koeficijentom viška vazduha pilot gorionika $\lambda_1 = 1,2$ i toplotnom snagom 1 kW.

Koaksijalno postavljen sekundarni gorionik kao gorivo koristi laboratorijski model biogasa predmešan sa vazduhom. Merenja su vršena tako što je zapreminsko učešće ugljen-dioksida u gorivu varirano i to $r_{CO_2} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$. Za svaki od izabranih sastava biogasa merenja su vršena za nominalne snage sekundarnog gorionika: 4, 8 i 12 kW, pri različitim koeficijentima viška vazduha.

Skica merne aparature prikazana je na slici 2.



Slika 2. Skica merne aparature; 1 – boca sa gorivom, 2 – regulacioni ventil, 3 – manometar, 4 – rotametar za gorivo sekundarne smeše, 5 – mešna komora, 6 – komora za sagorevanje, 7 – rotametar za vodu, 8 – termometar, 9 – merna blenda, 10 – U-cev, 11 – ventilator za vazduh sekundarne smeše, 12 – boca sa gorivom, 13 – regulacioni ventil, 14 – manometar, 15 – rotametar za gorivo primarne smeše, 16 – termometar, 17 – gasni analizator, 18 – kontroler protoka vazduha primarne smeše, 19 – ventilator za vazduh primarne smeše, 20 – boca sa ugljen-dioksidom, 21 – regulacioni ventil, 22 – manometar, 23 – rotametar za ugljen-dioksid.
Figure 2. Experimental set-up; 1 – pressurized gas cylinder, 2 – flow regulation valve, 3 – pressure gage, 4 – gas flow meter for secondary mixture, 5 – mixing chamber, 6 – combustion chamber, 7 – water flow meter, 8 – thermometer, 9 – measuring orifice plate, 10 – U-tube, 11 – air fan for secondary mixture, 12 – pressurized gas cylinder, 13 – flow regulation valve, 14 – pressure gage, 15 – gas flow meter for primary mixture, 16 – thermometer, 17 – gas analyzer, 18 – air flow controller for primary mixture, 19 – air fan for secondary mixture, 20 – pressurized gas cylinder for carbon dioxide, 21 – flow regulation valve, 22 – pressure gage, 23 – gas flow meter for carbon dioxide.

Sagorevanje se odvija na atmosferskom pritisku, u komori hlađenoj vodom čime se omogućava merenje toplotnog protoka kroz zidove komore.

Sastav produkata sagorevanja meren je gasnim analizatorom Testo 350 XL.

REZULTATI I DISKUSIJA

Uticaj sadržaja ugljen-dioksida na emisiju azotnih oksida

Rezultati eksperimentalnog istraživanja pri nominalnoj snazi 9 kW prikazani su na slici 3. Zapaža se da razlike u sastavu biogasa (u smislu zapreminskog učešća ugljen-dioksida) dovode do razlike emitovanih azotnih oksida u toku procesa sagorevanja, pri ostalim nepromenjenim radnim parametrima. Takođe, razlike u nivou emisije postoje u celokupnom opsegu koeficijentata viška vazduha za koje su vršena merenja. Najveći nivo emisije NO_x odgovara biogasu sa najmanjim učešćem ugljen-dioksida. Sa porastom učešća ugljen-dioksida, emisija azotnih oksida opada pri nepromenjenom koeficijentu viška vazduha.

Srednjene vrednosti emisije NO_x u funkciji sadržaja ugljen-dioksida (10, 20, 30 i 40 vol.%) i koeficijenta viška vazduha ($\lambda = 1,2$ i $\lambda = 1,4$) prikazani na slici 4.

Sa dijagrama se vidi da sa povećanjem učešća ugljen-dioksida i povećanjem koeficijenta viška vazduha, emisija NO_x opada.

Prisustvo ugljen-dioksida u gorivu smanjuje emisiju azotnih oksida delujući na oba osnovna mehanizma nastajanja NO_x :

Zeljđovičev,



i Fenimorov,

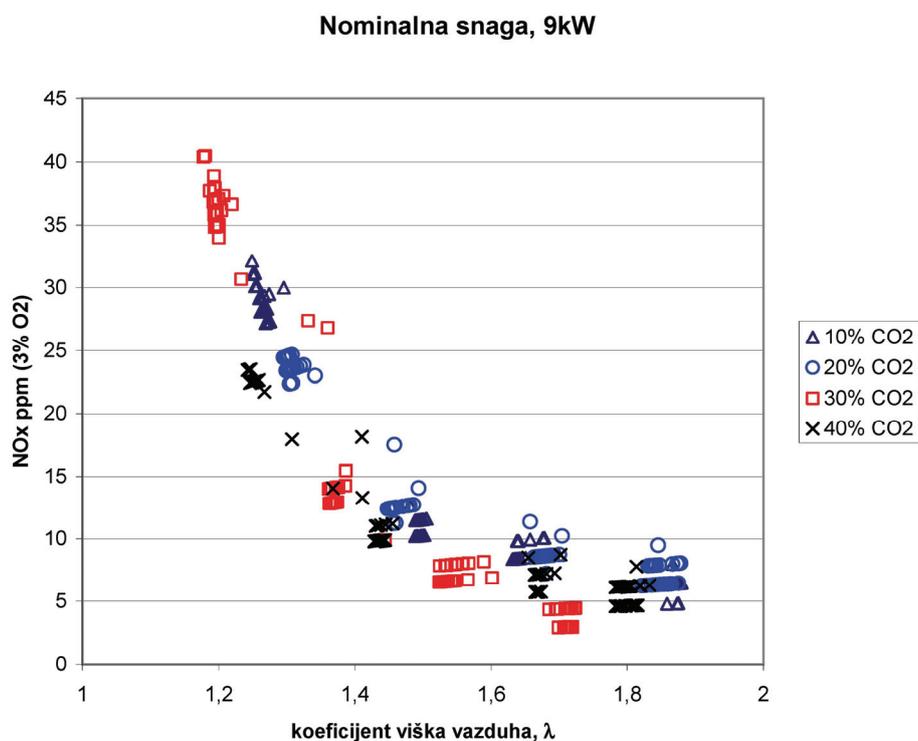


Objašnjenje je sledeće:

– prisustvo inertne komponente u gorivoj smeši doводи do smanjenja koncentracija O, OH i CH i

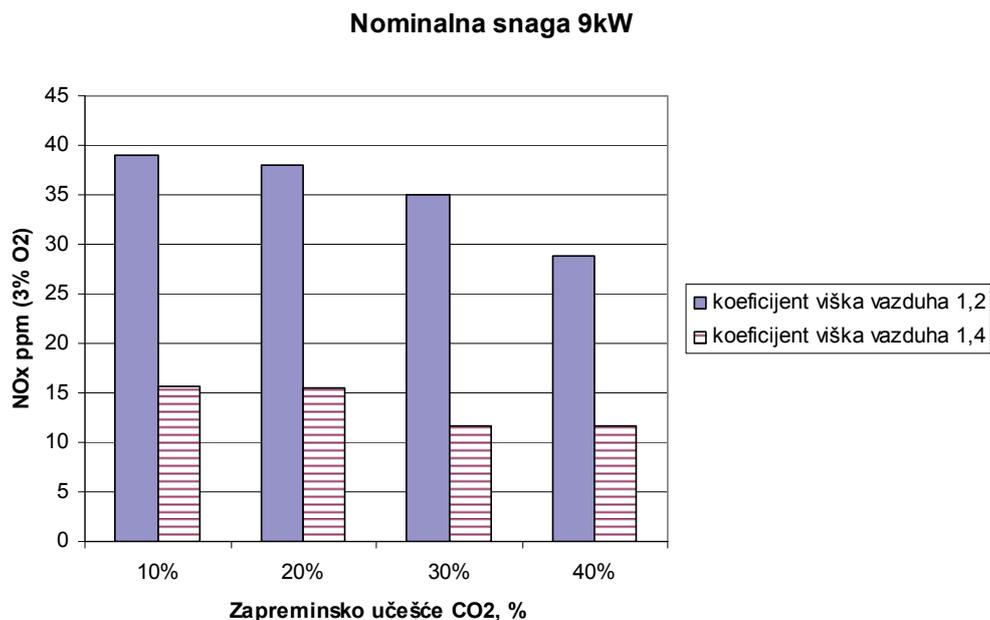
– prisustvo inertne komponente snižava temperaturu u zoni reakcije a time takođe prisustvo radikala O, OH i CH.

Radi ilustracije gornjih tvrdnji, na slikama 5 i 6 prikazani su snimci zone predmešanog plamena propana i vazduha u oblasti vidljivog spektra i blizu UV spektra, dok su na slikama 7 i 8 prikazani snimci predmešanog plamena goriva sa zapreminskim učešćem ugljen-dioksida od 40%. U pitanju su rezultati istraživanja istih autora a koji nisu obuhvaćeni ovim radom. Korišćena je



Slika 3. Uticaj sadržaja ugljendioksida na emisiju azotnih oksida.

Figure 3. The influence of carbondioxide content on nitrogen oxides emissions.



Slika 4. Uticaj sadržaja ugljen-dioksida i koeficijenta viška vazduha na emisiju azotnih oksida.

Figure 4. The influence of carbon dioxide content and coefficient of excess air on nitrogen oxides emissions.



Slika 5. Fotografija plamena u oblasti vidljivog spektra, $\lambda = 1$, $r_{CO_2} = 0$, snaga 9 kW.

Figure 5. Image of the flame in the visible spectrum for $\lambda = 1$, $r_{CO_2} = 0$, power 9 kW.



Slika 6. Fotografija plamena u oblasti blizu UV spektra $\lambda = 1$, $r_{CO_2} = 0$, snaga 9 kW.

Figure 6. Image of the flame near the UV spectrum for $\lambda = 1$, $r_{CO_2} = 0$, power 9 kW.



Slika 7. Fotografija plamena u oblasti vidljivog spektra, $\lambda = 1,4$, $r_{CO_2} = 0,4$, snaga 9 kW.

Figure 7. Image of the flame in the spectrum for $\lambda = 1,4$, $r_{CO_2} = 0,4$, power 9 kW.



Slika 8. Fotografija plamena u oblasti blizu UV spektra, $\lambda = 1,4$, $r_{CO_2} = 0,4$, snaga 9 kW.

Figure 8. Image of the flame near the UV spectrum for $\lambda = 1,4$, $r_{CO_2} = 0,4$, power 9 kW.

digitalna kamera i optički filter centriran na 430 ± 5 nm s ciljem izdvajanja i vizuelizacije emisije CH radikala u zoni plamena, ključnog radikala za formiranje NO_x Fenimorovim mehanizmom.

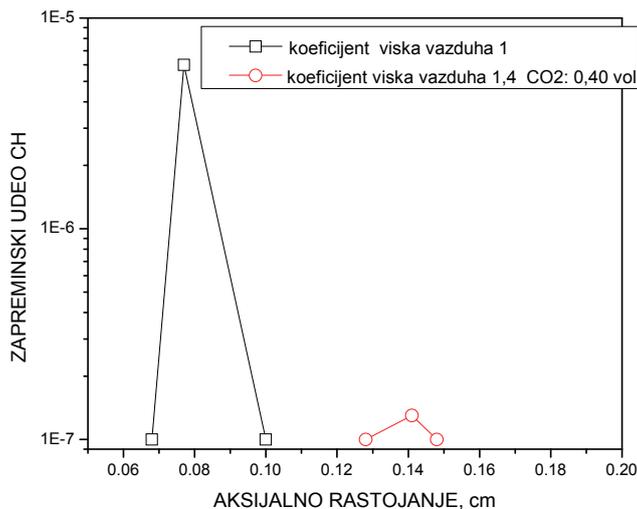
Takođe, na slici 9 date su izračunate vrednosti za preminskih udela CH radikala u zoni plamena korišćenjem programskog paketa Chemkin, za iste kombinacije koeficijenta viška vazduha i udela CO₂, u funkciji rastojanja, odnosno aksijalne koordinate fronta plamena.

Analizom rezultata dolazi se do zaključka da promena koeficijenta viška vazduha značajnije utiče na nivo emisije azotnih oksida, u poređenju sa promenom sadržaja inertne komponente. Povećanje koeficijenta viška vazduha dovodi do snižavanja temperature ispod ni-

voa značajnog za formiranje NO_x Zeldovicevim mehanizmom [13].

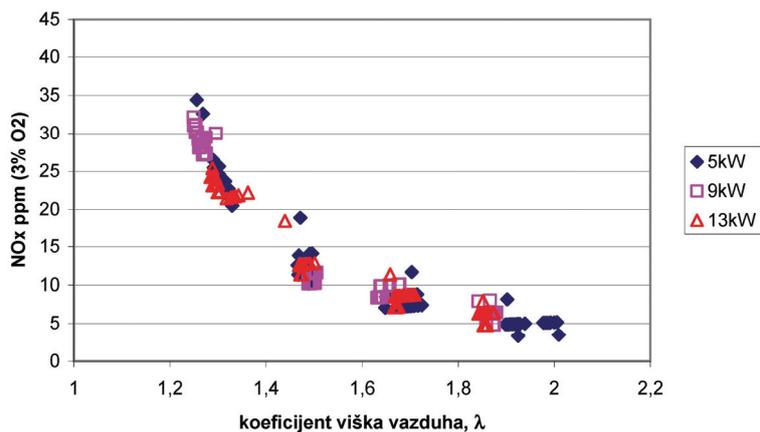
Efekat snage

Uticaj nominalne snage, pri sagorevanju biogasa određenog sastava na emisiju azotnih oksida prikazan je na slikama 10–13. Na osnovu eksperimentalnih rezultata može se zaključiti da razlika između izmerenih vrednosti pri različitim nominalnim snagama praktično zanemarljiva. Promena snage izaziva promenu dva uticajna parametra formiranja azotnih oksida. Porast snage uslovljava kraće vreme boravka u zoni hemijske reakcije, ali i porast temperature zahvaljujući manjim toplotnim gubicima, tako da se ova dva uticaja poništavaju. Kao



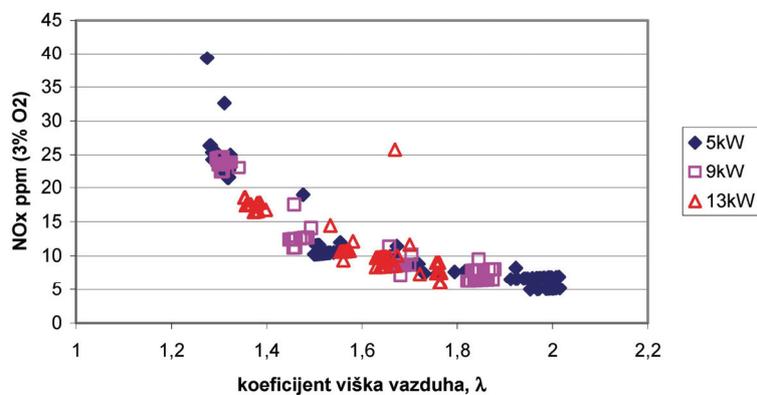
Slika 9. Zapremiski udeo CH u zoni plamena.
 Figure 9. Volumetric share of CH in the zone of the flame.

10% CO₂

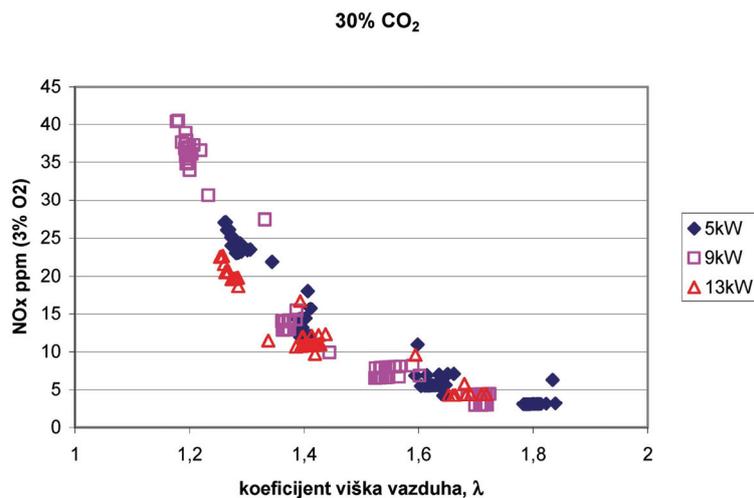


Slika 10. Uticaj snage na emisiju oksida azota za sadržaj ugljen-dioksida u biogasu od 10%.
 Figure 10. The influence of power on the NO_x emissions for the carbon dioxide content in biogas of 10%.

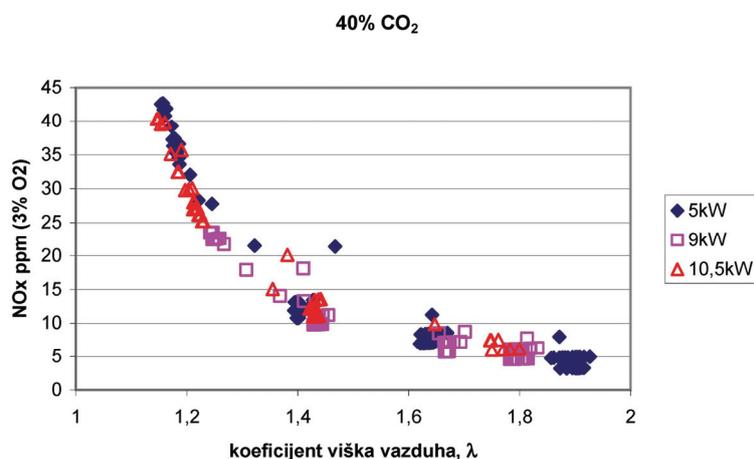
20% CO₂



Slika 11. Uticaj snage na emisiju oksida azota za sadržaj ugljen-dioksida u biogasu od 20%.
 Figure 11. The influence of power on the NO_x emissions for the carbon dioxide content in biogas of 20%.



Slika 12 Uticaj snage na emisiju oksida azota za sadržaj ugljen-dioksida u biogasu od 30%.
Figure 12. The influence of power on the NO_x emissions for the carbon dioxide content in biogas of 30%.



Slika 13 Uticaj snage na emisiju oksida azota za sadržaj ugljen-dioksida u biogasu od 40%.
Figure 13. The influence of power on the NO_x emissions for the carbon dioxide content in biogas of 40%.

rezultat uticaj snage na emisiju NO_x pri sagorevanju biogasa praktično je zanemarljiv. Slične analize uticaja snage dobijene su pri istraživanju vihornog gorionika sa centralnim telom [11], kao i vihornog gorionika sa pilot gorionikom pri radu sa tečnim naftnim gasom [12].

ZAKLJUČAK

U radu je prikazano eksperimentalno istraživanje uticaja sadržaja ugljendioksida u biogasu na emisiju azotnih oksida. Dobijeni rezultati pokazuju da je sadržaj ugljendioksida u biogasu uticajan faktor emisije NO_x. Sa porastom sadržaja ugljen-dioksida smanjuje se emisija, a takva tendencija je nepromenjena u celom opsegu koeficijenata viška vazduha za koje su vršena merenja. Treba naglasiti da je taj uticaj značajno manji od uticaja promene koeficijenta viška vazduha. Razlog je mnogo veći uticaj koeficijenta viška vazduha na produkciju radikala koji su ključni za formiranje oksida azota, O, OH

i CH. Takođe, dobijeni rezultati pokazuju da nominalna snaga praktično nema uticaja na emisiji azotnih oksida.

Dobijeni rezultati značajni su za bolje razumevanje procesa sagorevanja i primenu gasova sa većim sadržajem balasta, čiji je predstavnik biogas, a mogu se primeniti i na druge gasove koji u svom sastavu imaju ugljen-dioksid kao inertnu komponentu.

LITERATURA

- [1] World Energy Council, 2007 Survey of Energy Resources, London, 2007.
- [2] S. Rasi, A. Veijanen, J. Rintala, Trace compounds of biogas from different biogas production plants, Energy **32** (2007) 1375–1380.
- [3] M. Oslaj, B. Mursec, P. Vindis, Biogas production from maize hybrids, Biomass Bioenerg. (2010), doi: 10.1016/j.biombioe.2010.04.016.

- [4] J.A. Wunning, J.G. Wunning, Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation, *Prog. Energy Combust. Sci.* **23** (1997) 81–94.
- [5] A. Cavaliere, M. Joannon, Mild combustion, *Prog. Energy Combust. Sci.* **30** (2004) 329–336.
- [6] A.F. Colorado, B.A. Herrera, A.A. Amell, Performance of a flameless combustion furnace using biogas and natural gas, *Bioresource Technol.* **101** (2010) 2443–2449.
- [7] N. Syred, J.M. Beer, Combustion in Swirling Flows: A Review, *Combust. Flame* **23** (1974) 143–201.
- [8] T.S. Cheng, Y.C. Chao, D.C. Wu, T. Yuan, C.C. Lu, C.H. Cheng, J.M. Chang, Effects of fuel air mixing on flame structures and NO_x emissions in swirling methane jet flames, 27th Symposium (International) on Combustion, 2–7 August, 1998, Colorado, 1229–1237.
- [9] A. Coghe, G. Solero, G. Scribano, Recirculation phenomena in a natural gas swirl combustor, *Exp. Therm. Fluid Sci.* **28** (2004) 709–714.
- [10] Y. Huang, V. Yang, Effect of swirl on combustion dynamics in a lean premixed swirl stabilized combustor, *P. Combust. Inst.* **30** (2005) 1775–1782.
- [11] M. Adžić, V. Fotev, M. Živković, A. Milivojević, Effect of a microturbine combustor type on emissions at lean premixed conditions, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Sacramento, CA, 2006, 4160–4176.
- [12] M. Adžić, M. Živković, V. Fotev, A. Milivojević, V. Adžić, Influential parameters of nitrogen oxides emissions for microturbine swirl burner with pilot burner, *Hem. ind.* (2010), doi: 10.2298/HEMIND100319019A.
- [13] R. Steele, P. Malte, D. Nikol, J. Cramlich, NO_x and N₂O in lean premixed jet-stirred flames, *Combust. Flame* **100** (1995) 440–449.

SUMMARY

INFLUENCE OF CARBON DIOXIDE CONTENT IN BIOGAS ON NITROGEN OXIDES EMISSIONS

Marija A. Živković¹, Miroljub M. Adžić², Vasko G. Fotev², Aleksandar M. Milivojević², Vuk M. Adžić², Dejan D. Ivezić¹, Boško D. Čosić³

¹Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

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

³Institute of Physics, Belgrade, Serbia

(Scientific paper)

Fuels derived from biomass are an alternative solution for the fossil fuel shortage. Usually fuels of this kind are called low calorific value fuels, due to the large proportion of inert components in their composition. The most common is carbon dioxide, and its proportion in biogas can be different, from 10 up to 40%, or even more. The presence of inert component in the composition of biogas causes problems that are related with flame blow off limits. One of the possibilities for efficient combustion of biogas is the combustion in swirling flow including a pilot burner, aimed to expand the borders of stable combustion. This paper presents an analysis of the influence of the carbon dioxide content on nitrogen oxides emissions. Laboratory biogas was used with different content of CO₂ (10, 20, 30 and 40%). The investigation was carried out for different nominal powers, coefficients of excess air and carbon dioxide content. With increasing content of carbon dioxide, emission of nitrogen oxides was reduced, and this trend was the same throughout the whole range of excess air, carried out through measurements. Still, the influence of carbon dioxide content is significantly smaller than the influence of excess air. The coefficient of excess air greatly affects the production of radicals which are essential for the formation of nitrogen oxides, O, OH and CH. Also, the results show that the nominal power has no impact on the emission of nitrogen oxides.

Ključne reči: Biogas • Sadržaj Ugljen-dioksida • Azotni oksidi
Key words: Biogas • Carbon-dioxide content • Nitrogen oxides