

Laboratorijskim istraživanjem do izbora mjesta uvođenja stepenovanog vazduha za sagorijevanje u ložište

Lab-scale tests to optimize Over Fire Air position in Furnace

Nihad Hodžić*, Anes Kazagić**, Kenan Kadić**

* Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Vilsonovo šetalište 9, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina

** JP Elektroprivreda BiH d.d. - Sarajevo, Vilsonovo šetalište 15, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina

Apstrakt - Generalno, kvalitet miješanja reaktanata je od suštinskog značaja za proces i brzinu sagorijevanja svakog goriva, naročito čvrstog niskovrijednog i slaboreaktivnog uglja. Pri tome su odgovarajući koeficijent viška vazduha za sagorijevanje kao i mjesto i način uvođenja pojedinih porcija ukupnog vazduha u ložište jedni od ključnih uticajnih faktora na miješanje odnosno efikasnost procesa sagorijevanja i nivo emisije zagađujućih komponenti dimnih gasova u okolinu. Primjena zonskog ili stepenovanog privoda vazduha za sagorijevanje u ložište (primarni, sekundarni, tercijarni i OFA - *Over Fire Air*) danas je praktično nezaobilazna pri projektovanju novih industrijskih i energetskih kotlova ali se, prilikom rekonstrukcije, dominantno uvodi i primjenjuje i na postojećim ložištima velikih kotlova. Primjena ove primarne mjere u ložištu ne iziskuje značajnija finansijska ulaganja - troškovi investicije u uvođenje stepenovanog privoda vazduha za sagorijevanje u ložište u redovan pogon kotla su praktično zanemarivi u odnosu na višestruke pozitivne efekte i benefite primjene ovakvog sistema, od kojih se naročito izdvaja niža emisija NO_x u okolinu. Međutim, preduslov za ispravno i pouzdano projektovanje sistema za stepenovani privod vazduha u ložištu nekog kotla, jeste izbor optimalnog mjesta za uvođenje OFA vazduha u ložište. Određivanje i izbor tog mjesta zavisi od niza faktora, prije svega od vrste i karakteristika goriva, kvaliteta meljave, tehnologije sagorijevanja, konstrukcije ložišta, tipa, broja i rasporeda gorionika i slično. Na ovu temu su na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Sarajevu u sklopu Laboratorije za sagorijevanje uglja i biomase obavljena obimna istraživanja karakteristika sagorijevanja mješavina ugljeva srednjobosanskog rudarskog bazena u spraašenom stanju, uključujući i kosagorijevanje ovih ugljeva sa otpadnom drvnom biomasom (piljevina bukve i smrče). Ovdje je predstavljen dio rezultata tih istraživanja koji se odnose na emisiju NO_x i to za različita goriva i temperature sagorijevanja u zavisnosti od načina privoda i mjesta uvođenja vazduha za sagorijevanje u ložište.

Ključne riječi - sagorijevanje, koeficijent viška vazduha, OFA, emisija NO_x .

Abstract - In general, the mixing the reactants is very important to the process and the rate of combustion of each fuel, especially low-ranked coals with low reactivity. The appropriate excess air coefficient for combustion and the position and mode of supply of individual portions (air staging) of the total air in the furnace are one of the key influencing factors for the mixing, respectively the efficiency of the combustion process, and the level of emissions. Today, the air staging (primary, secondary, tertiary and over fire air-OFA) is an indispensable process in the design of new industrial and energy boilers. Also, this measures are used for the reconstruction of existing furnace of large boilers. The implementation of this primary measure in the furnace does not require significant financial resources - the costs of investing in the introduction of air staging supply for combustion in the furnace are very low in relation to the multiple positive effects and benefits of such a system, especially a lower NO_x emissions. However, the first condition for the correct and reliable design of the air staging system in the furnace is the choice of the optimal position for the supply OFA air. Determination of this position on the furnace depends on several factors, primarily the type and characteristics of the fuel, grinding quality, combustion technology, furnace structure, type, number and arrangement of burners. On this topic, the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Sarajevo, in the Laboratory for Coal and Biomass Combustion, conducted extensive research on the pulverized combustion of coal blends of the Central Bosnia Mining Basin, including co-firing of these coals with waste wood biomass (beech and spruce sawdust). Here is presented some of the results of those NO_x emission studies for different fuels and combustion temperatures, depending on the mode of supply and the positions of the combustion air supply in the boiler furnace.

Keywords: combustion, excess air coefficient, OFA, NO_x emissions.

I UVOD

Poznato je da Bosna i Hercegovina ima značajna nalazišta i rezerve uglja i da se konverzijom energije iz ovog fosilnog goriva dominantno, oko $\frac{3}{4}$ ukupne proizvodnje, dobija finalna električna energija. Po vrsti uglja, to su lignit i mrki ugalj, dok kamenog uglja nema. Prema posljednjim procjenama, bilansne i eksploatacione rezerve uglja u Bosni i Hercegovini iznose oko $4,5 \cdot 10^9$ t, od čega se oko 40% odnosi na mrki ugalj, a oko 60% na lignit, [1]. Međutim, s druge strane, kvalitet bosanskohercegovačkih ugljeva značajno varira od jednog rudarskog bazena do drugog, pa čak i od jednog rudnika do drugog u okviru istog rudarskog bazena. Osnovne karakteristike ovih ugljeva su niska toplotna moć (lignitni ugljevi u prosjeku do 9 MJ/kg, mrki ugljevi od 9 do 20 MJ/kg), visok udio mineralne mase (čak i preko 50%) i vlage (u dostavnom stanju i do oko 30%) te slaba reaktivnost, [2]. Posljedično tome, u pogonu je javljaju različiti tehničko-tehnološki problemi pri sagorijevanju bosanskohercegovačkih ugljeva, uključujući nestabilnost i prekid procesa sagorijevanja. Nestabilnost procesa sagorijevanja, kao i nivo emisije zagađujućih komponenti dimnih gasova u okolinu - naročito emisija NO_x, je u direktnoj vezi i sa načinom i mjestom uvođenja vazduha za sagorijevanje. Mrki ugalj iz rudnika srednjobosanskog rudarskog bazena se dominantno isporučuje TE Kakanj u kojoj se sagorijeva u kotlovima na koncipiranim na bazi tehnologije sagorijevanja u letu sa tečnim odvođenjem šljake iz ložišta. Poznato je da ovu tehnologiju sagorijevanja karakterišu dosta visoke temperature u ložištu, naročito u topionoj komori (1350÷1550 °C), što za posljedicu ima veoma visoke emisije zagađujućih komponenti dimnih gasova, prvenstveno emisija NO_x koja je u ovom slučaju na nivou do 900 mg/m³, te naročito emisija SO₂ koja zbog pomenutih visokih temperatura sagorijevanja i zbog značajnijeg sadržaja sumpora u uobičajenim mješavinama uglja i do 2,5%, ide čak na nivo od oko 8000 mg/m³, [3].

Činjenica je, također, da Bosna i Hercegovina ima i značajan energetske potencijal iz otpadne biomase koji potiče iz poljoprivredne proizvodnje te naročito šumarstva, primarne i sekundarne obrade drveta. Procjenjuje se da ukupan godišnji tehnički energetske potencijal ostataka biomase u BiH iznosi više od 33 PJ, što predstavlja ekvivalent za više od 3 miliona tona bosanskohercegovačkog lignita, [4].

Smanjenje emisije NO_x, u odnosu na klasične ili konvencionalne sisteme sagorijevanja, je u odgovarajućoj mjeri moguće postići primjenom gorionika novije generacije koji imaju za posljedicu niže emisije NO_x (vrtložni ili protočni Low-NO_x gorionici, LNB), stepenovanom privodom vazduha za sagorijevanje (OFA), stepenovanom dobavom osnovnog goriva te upotrebom dodatnog goriva kakvo je na primjer zemni ili prirodni gas - ove tehnologije su u stručnoj javnosti poznate kao *reburning tehnologije*. LNB gorionici rade na principu stepenovanog ili zonskog privoda vazduha za sagorijevanje posmatrano na nivou pojedinačnog gorionika koji na taj način rezultiraju značajnim smanjenjem emi-

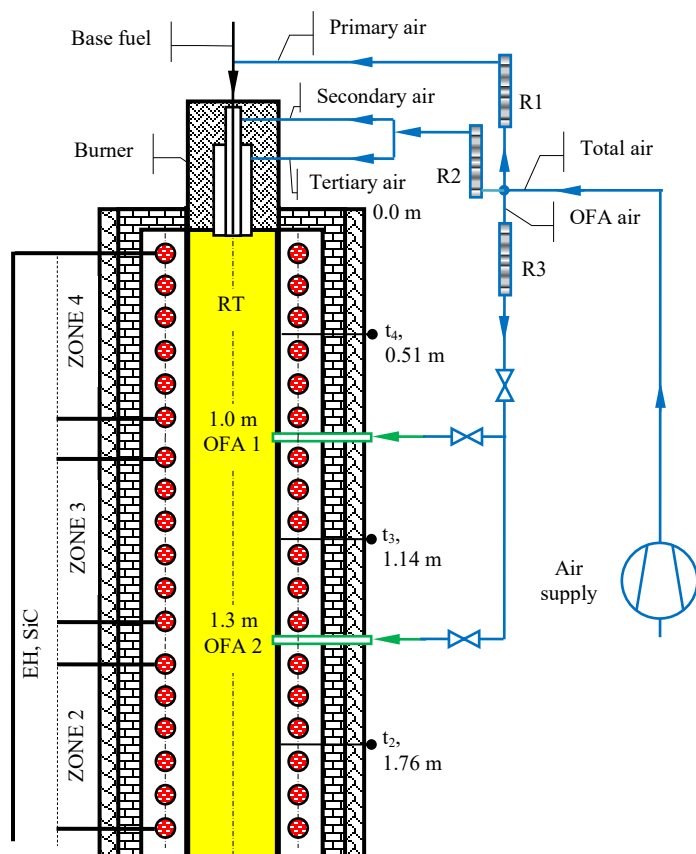
sije NO_x i kao takvi su danas skoro neizostavna oprema novih energetskih kotlova, koji su u pravilu sa nadkričnim ili ultranadkričnim parametrima pare i od kojih se zahtijeva veoma visoka fleksibilnost u pogonu, [5]. U radu [6] predstavljeni su rezultati odnosno efekti primjene stepenovanog privoda vazduha za sagorijevanje (OFA) na emisiju NO_x - u ovom slučaju, kao gorivo, korišten je osušeni lignit. Pokazano je da na ovaj način dolazi do značajnog smanjenja emisije NO_x - rezultati se odnose na ispitivanje količine OFA vazduha te udaljenosti njegovog uvođenja u zonu reakcije u odnosu na osnovni gorionik. U radu [7] je navedeno da se uz Low-NO_x gorionike emisija NO_x može smanjiti za 20%, ali da je zbog visoke temperature sagorijevanja ta emisija i dalje visoka (1036 mg/m³ pri 6% O₂ u suhim dimnim gasovima), te je za daljnje sniženje emisije NO_x preporučen zonski odnosno stepenovani privod vazduha za sagorijevanje u ložištu (tzv. OFA sistem). Slični pozitivni efekti primjene stepenovanog ili produženog sagorijevanja sa vazduhom na smanjenje emisije NO_x iskazani su i u radovima [8] i [9] - sagorijevanje uglja, kao i pri kosagorijevanju uglja i biomase, [10-14].

Podvrgavanjem različitih mješavina uglja, kao i različitih mješavina uglja i otpadne drvene biomase, sagorijevanju pri različitim temperaturama te uz primjenu primarne mjere u ložištu stepenovanog privoda vazduha za sagorijevanje uključujući i porciju OFA vazduha na različitim udaljenostima od osnovnog gorionika, moguće je utvrditi odgovarajući odziv procesa putem mjerenja parametara i njihove analize, odnosno moguće je doći do relevantnih zaključaka o uticaju mjesta uvođenja OFA vazduha na sam proces i posljedično tome uticaj na emisiju NO_x u okolinu. Na osnovu tih zaključaka moguće je kvantificirati i sublimirati karakteristike sagorijevanja ovih goriva uključujući i prednosti konverzije primarne energije iz goriva u uslovima tehnologije sagorijevanja čvrstih goriva u letu pri stepenovanom privodu vazduha za sagorijevanje, [15].

II LABORATORIJSKO POSTROJENJE, ISPITNA MATRICA GORIVA I ISPITNI REŽIMI

Laboratorijsko postrojenje: Automatski Upravljeni Cijevni Reaktor (AUCR) smješten je u laboratoriji Mašinskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu i omogućava ispitivanje karakteristika sagorijevanja različitih čvrstih goriva u letu pri različitim ambijentalnim i tehnološkim uslovima. U najkraćem, postrojenje je projektovano i izgrađeno za rad u dosta širokom temperaturnom opsegu (praktično od temperature okoline do maksimalne temperature 1560 °C) i u uslovima različite količine i raspodjele osnovnog goriva i vazduha za sagorijevanje, uključujući i mogućnost ispitivanja *reburning tehnologija* sagorijevanja primjenom dodatnog goriva, na primjer zemnog gasa. Izabrana ili željena srednja temperatura sagorijevanja postiže se putem odgovarajućih električnih grijača montiranih duž dvije suprotne strane keramičke reakcione cijevi. U osnovi, istraživanjem na ovom AUCR postrojenju, moguće je dobiti podatke koji se odnose na efikasnost sagorijevanja, intenzitet deponovanja i karakteristike mineralnog depozita iz reakcione zone kao i šljake i pepela na izlazu iz reaktora, te emisiju komponenti dimnih gasova - uobičajeno su to komponente: O₂, CO, CO₂, NO, NO₂, NO_x i SO₂, [15]. Principijelna šema dijela AUCR postrojenja sa naznačenim stepeno-

vanim razvodom vazduha za sagorijevanje data je na slici 1. - dodatno vidjeti [10-12].



Slika 1. Principijelna šema dijela postrojenja sa naznačenim stepenanim razvodom vazduha za sagorijevanje, Ri - rorametar, mjerenje protoka porcije vazduha

Ispitna matrica goriva i ispitni režimi: U svrhu ovih laboratorijskih istraživanja zavisnosti emisije NO_x od mjesta uvođenja OFA porcije vazduha u ložište, formirana je matrica od sljedeća tri goriva, [15] - Tabela 1:

- Projektna mješavina mrkih ugljeva iz rudnika Kakanj, Breza i Zenica sa masenim udjelima komponentnih ugljeva u mješavini: 70, 20 i 10%, respektivno - oznaka goriva: K70B20Z10. Ova mješavina uglja sagorijevana je pri temperaturnim uslovima koji u principu odgovaraju tehnologiji sagorijevanja sprasenog uglja sa suhim odvođenjem šljake iz ložišta ($950 \div 1350 \text{ }^\circ\text{C}$) - intencija je odabir i primjena ove tehnologije sagorijevanja na budućem bloku 8 u TE Kakanj. Ova mješavina uglja formirana je nakon termičke i mehaničke pripreme komponentnih ugljeva (sušenja i mljevenja) u laboratorijskim uslovima.
- Uobičajena mješavina ugljeva koja se posljednjih godina spaljuje u kotlovima tri raspoloživa bloka TE Kakanj - oznaka goriva: U100. Ova mješavina uglja nastala je tokom redovnih aktivnosti homogenizacije ugljeva ili miješanja mrkih ugljeva koji se dopremaju na depo TE Kakanj iz više rudnika u Bosni

i Hercegovini (npr. rudnici: Kakanj, Breza, Zenica, Gračnica, Livno, Nova Bila, Banovići,...) i to približno procentualno isporučenim količinama uglja. Potrebna količina ovog uzorka mješavine uglja za svrhu laboratorijskog ispitivanja izuzeta je direktno iza mlinova u realnom pogonu bloka 5: meljava uglja koja ide direktno u ložište.

- Mješavina uglja U100 sa otpadnom drvnom biomasom (oznaka biomase: B100, sitna piljevina bukve i smrče u približnom omjeru po masi 50:50) i to u masenom omjeru 93:7 - oznaka mješavine uglj-biomasa: U93B7. Ova mješavina goriva je također pripremljena na depou TE pa je i potreban uzorak za laboratorijska ispitivanja izuzet u pogonu, direktno iza mlinova kao i meljava U100.

Ispitne mješavine goriva oznake U100 i U93B7 sagorijevana su u temperaturnim uslovima koji u principu odgovaraju tehnologiji sagorijevanja sprasenog uglja sa tečnim odvođenjem šljake iz ložišta ($1350 \div 1450 \text{ }^\circ\text{C}$) - ova tehnologija sagorijevanja je primijenjena na svim dosadašnjim blokovima u TE Kakanj, od kojih su još u pogonu blokovi 5 i 6 ($2 \times 110 \text{ MW}$) i blok 7 (230 MW).

Rezultati odgovarajućih analiza navedenih ispitnih goriva dati su u sljedećoj Tabeli 1.

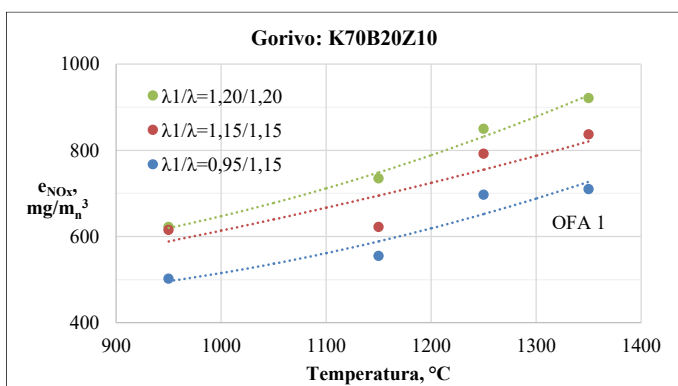
Tabela 1. Rezultati analiza ispitnih goriva, dostavno stanje, [15]

Gorivo/Oznaka	K70B20Z10	U100	U93B7
Tehnička analiza, %			
Vlaga	10,71	13,90	18,09
Pepeo	40,84	37,88	33,05
Isparljivo	27,71	28,97	31,16
Fiksni C	20,73	19,25	18,59
Sagorivo	48,44	48,22	48,86
Elementarna analiza, %			
Ugljik	34,48	36,62	33,36
Vodonik	2,33	2,60	2,52
Sumpor	2,41	2,06	1,59
Azot	0,75	0,72	0,75
Kiseonik	8,48	10,22	10,63
Toplotna moć, kJ/kg			
Gornja	13898	13351	13446
Donja	13171	12496	12510

III REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

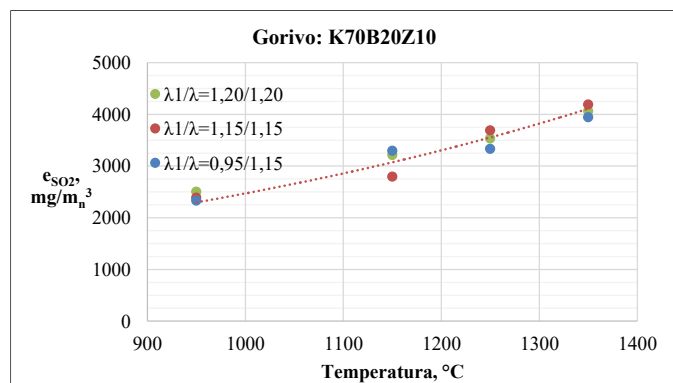
Gorivo K70B20Z10: U ovom slučaju emisija NO_x je data u zavisnosti od temperature sagorijevanja ($950, 1150, 1250$ i $1350 \text{ }^\circ\text{C}$), koeficijenta viška vazduha za sagorijevanje i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu odnosno ložište. U odnosu na temperaturu sagorijevanja, očekivano, najniža emisija NO_x izmjerena je pri najnižoj ispitnoj temperaturi $950 \text{ }^\circ\text{C}$ - generalno, emisija NO_x raste sa porastom temperature pri čemu brzina nastanka azotnih oksida naročito raste pri temperaturi iznad $1300 \text{ }^\circ\text{C}$. S druge strane, emisija NO_x je niža pri nižim vrijednostima koeficijenta viška vazduha za sagorijevanje, npr.: $e_{\lambda=1.15} < e_{\lambda=1.20}$ - u ovim ispitnim režimima ukupna količina vazduha je dovedena na gorionik kroz tri porcije: primarni, sekundarni i terciarni, tj. vrijedi: $\lambda_1/\lambda=1,15/1,15$ ili $\lambda_1/\lambda=1,20/1,20$. Za razliku od ovih

režima, ispitni režim sa OFA porcijom vazduha ($\lambda_1/\lambda=0,95/1,15$) je sa ukupnim koeficijentom viška vazduha $\lambda=1,15$ ali sa podsteometrijskom količinom vazduha koja se dovodi na gorionik - naknadni ili stepenovani privod OFA porcije vazduha u reakcionu zonu/ložište na određenoj udaljenosti iza izlazne ravni gorionika. U ovom slučaju, ta pozicija OFA 1 je na udaljenosti od 1 m. U ovim ispitnim režimima, sa stepenovanim privodom vazduha za sagorijevanje i pri svim temperaturama sagorijevanja, su u odnosu na konvencionalne režime sa klasičnim privodom ukupnog vazduha na gorionik, izmjerene najniže emisije NO_x . Tako je npr. pri temperaturi sagorijevanja $1350\text{ }^\circ\text{C}$ i pri stepenovanom privodu vazduha sa OFA ta emisija 710 mg/m_n^3 i niža je za oko 130 mg/m_n^3 pri istom koeficijentu viška vazduha i klasičnom dovodu vazduha na gorionik. Relativno smanjenje emisije NO_x za ova dva slučaja sagorijevanja je oko $\Delta e_{\text{NO}_x}=15\%$, Slika 2 - [15].



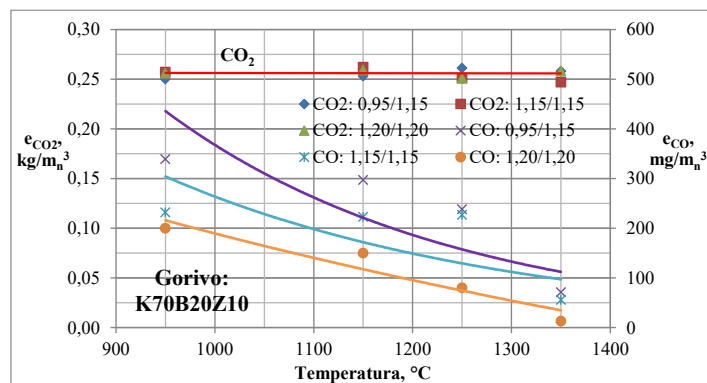
Slika 2. Emisija NO_x u zavisnosti od temperature sagorijevanja, koeficijenta viška vazduha i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu/ložište

Uticaj količine i načina raspodjele vazduha za sagorijevanje na emisiju SO_2 predstavljen je na slici 3. Iz prikaza rezultata, uzimajući u obzir kako razudnost tako i preklapanje više vrijednosti, to se može zaključiti da praktično nema promjene emisije SO_2 u odnosu na koeficijent viška vazduha i način privoda tog vazduha za sagorijevanje u reakcionu zonu/ložište. U principu, primjetan je samo značajniji porast emisije SO_2 sa porastom temperature sagorijevanja, [17].



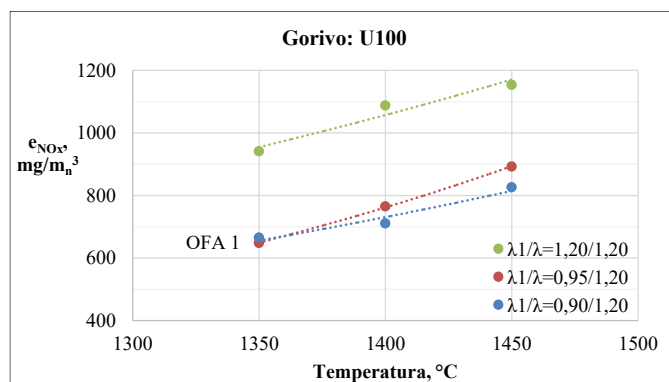
Slika 3. Emisija SO_2 u zavisnosti od temperature sagorijevanja, koeficijenta viška vazduha i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu/ložište

Emisija CO_2 , bez obzira na vrijednost koeficijenta viška vazduha i način dobave tog vazduha u reakcionu zonu, se praktično ne mijenja i u ovom slučaju u prosjeku iznosi $0,255\text{ kg/m}_n^3$, Slika 4. Stepenovani privod vazduha za sagorijevanje, pored pozitivnog uticaja na smanjenje emisije NO_x , praćen je i nešto većom emisijom ugljenmonoksida (CO). Generisanje CO pri sagorijevanju se smanjuje sa porastom temperature sagorijevanja i koeficijenta viška vazduha, Slika 4. Pri tome se može uočiti da uticaj načina privoda vazduha na emisiju CO gubi značaj sa porastom temperature sagorijevanja, [16-18].



Slika 4. Emisija CO_2 i CO u zavisnosti od temperature sagorijevanja, koeficijenta viška vazduha i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu/ložište

Gorivo U100: Za ovu mješavinu uglja emisija NO_x data je, također, u zavisnosti od temperature sagorijevanja, koeficijenta viška vazduha za sagorijevanje i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu/ložište, Slika 5. U ovom slučaju, zbog većih temperatura sagorijevanja u odnosu na prethodnu mješavinu uglja, izmjerene su još više emisije NO_x . Tako npr. pri temperaturi sagorijevanja $1450\text{ }^\circ\text{C}$ i stepenovanom privodu vazduha sa OFA, ta emisija je u prosjeku oko 860 mg/m_n^3 za razliku od oko 1155 mg/m_n^3 pri konvencionalnom sagorijevanju. Emisija NO_x pri režimu sa OFA vazduhom niža je za skoro 300 mg/m_n^3 ili za oko $\Delta e_{\text{NO}_x}=25\%$.

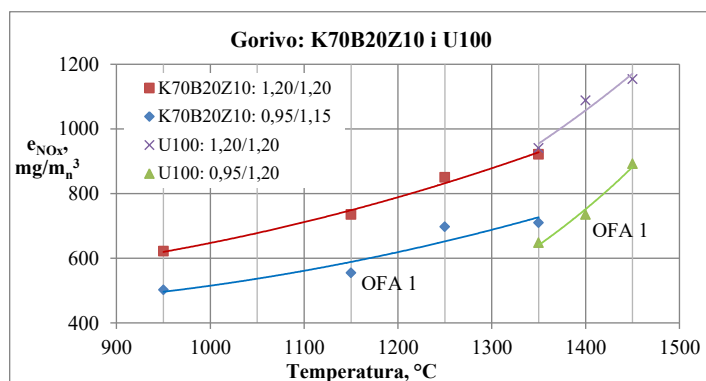


Slika 5. Emisija NO_x u zavisnosti od temperature sagorijevanja, koeficijenta viška vazduha i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu/ložište

Iako rezultati emisije NO_x pokazuju da je razlika te emisije sa porastom temperature izraženija za režime sa OFA vazduhom

($\epsilon_{\lambda_1=0,90} < \epsilon_{\lambda_1=0,95}$) to ne znači da su režimi sagorijevanja sa $\lambda_1/\lambda=0,90/1,20$ ukupno povoljniji u odnosu na režime pri stepenovanom privodu vazduha sa $\lambda_1/\lambda=0,95/1,20$. Naime, kod ukupne ocjene procesa sagorijevanja nekog goriva analizira se i ocjenjuje, pored emisije NO_x , i efikasnost procesa kroz emisiju CO te kod sagorijevanja čvrstih goriva naročito važan sadržaj sagorivih materija u šljaci i pepelu - dominantno je to čisti ugljik, C_{fix} . Prema tome, analizom procesa sagorijevanja i sa ovih aspekata, došlo je se do saznanja da su režimi stepenovanog sagorijevanja goriva U100 sa $\lambda_1/\lambda=0,90/1,20$ nepovoljniji u odnosu na režime sagorijevanja pri $\lambda_1/\lambda=0,95/1,20$. Ovo se može objasniti uzimajući u obzir isti put i vrijeme za sagorijevanje čvrstog ugljika u oba slučaja ali različitu koncentraciju kiseonika u zoni do mjesta uvođenja OFA struje vazduha i zone poslije toga - ložišna atmosfera sa različitim sadržajem kiseonika.

Sublimirajući rezultate emisije NO_x za prethodna dva goriva i temperaturne intervale sagorijevanja može se i pokazati ranije iznesena tvrdnja odnosno činjenica da je brzina promjene emisije NO_x izraženija pri sagorijevanju uglja u temperaturnim uslovima >1300 °C, Slika 6, a što je i u skladu sa Zeldovich-evim mehanizmom uticaja temperature na brzinu hemijske reakcije generisanja termičkog NO. Također, uočljiva je značajna razlika emisije NO_x s obzirom na mjesto dovoda vazduha za sagorijevanje u ložište pri čemu je ta razlika sa porastom procesne temperature sve izraženija.

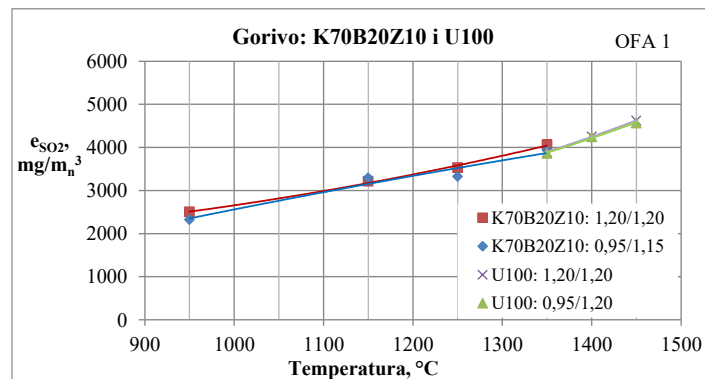


Slika 6. Trend promjene i vrijednosti emisije NO_x u zavisnosti od temperature i načina dovoda vazduha za sagorijevanje u reakcionu zonu/ložište

Ovdje, u najnepovoljnijim uslovima sagorijevanja u pogledu generisanja azotnih oksida, pri temperaturi sagorijevanja 1450 °C, vrijednost emisije je i preko 1100 mg/m_n^3 . Primjenom stepenovanog privoda vazduha za sagorijevanje ta emisija NO_x se smanjuje pa je tako, na primjer, pri temperaturi 1400 °C ta emisija NO_x smanjena sa 1088 na 735 mg/m_n^3 ili za preko 30%.

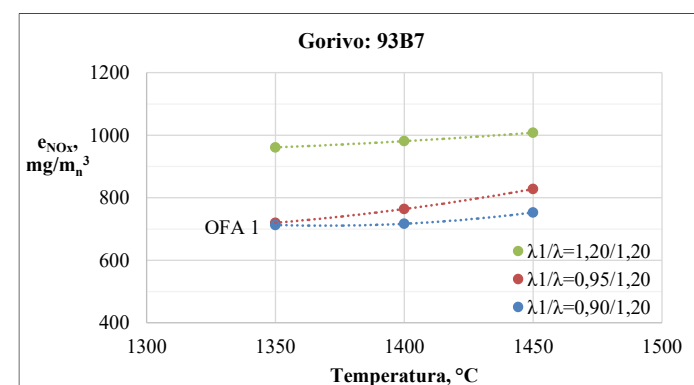
Analogno prethodnom dijagramu, za ista ova goriva K70B20Z10 i U100 i iste temperaturne i tehnološke uslove sagorijevanja na slici 7 predstavljene su rezultati koji se odnose na emisiju SO_2 . Iz prezentiranih rezultata se vidi, kao što je i ranije pokazano i konstatovano, da emisija SO_2 praktično ne zavisi od količine vazduha za sagorijevanje niti od načina dobave tog vazduha u reakcionu zonu/ložište nego isključivo od sastava goriva (sad-

ržaja ukupnog i sagorivog sumpora u gorivu) i temperature sagorijevanja. Podsjećanja radi, u poređenju sa ugljikom i vodonikom, za sagorijevanje sumpora iz goriva potrebna je najmanja količina kiseonika pri čemu sumpor veoma brzo reagira u tom procesu oksidacije.



Slika 7. Trend promjene i vrijednosti emisije SO_2 u zavisnosti od temperature i načina dovoda vazduha za sagorijevanje u reakcionu zonu/ložište

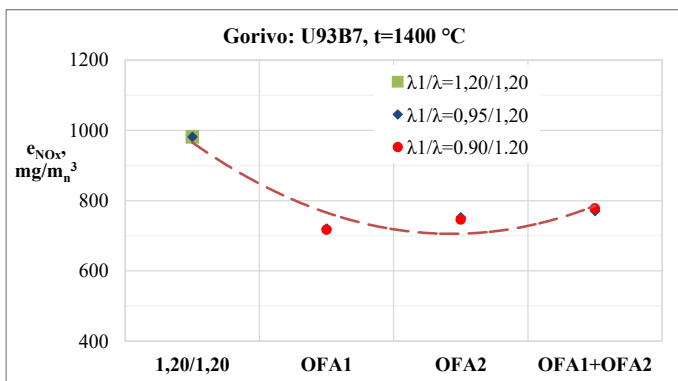
Gorivo U93B7: Za mješavinu uglja i otpadne drvene biomase i za iste dosad predstavljene postavke ispitnih režima sagorijevanja su na sljedećoj slici predstavljene rezultati emisije NO_x . I ovdje vrijede praktično isti zaključci koji su navedeni za prethodni slučaj uz dodatak da se može konstatovati da su emisije NO_x pri kosagorijevanju uglja i drvene biomase na nivou emisija pri sagorijevanju uglja - naravno, međusobno se porede režimi sa istom temperaturom sagorijevanja, istim koeficijentom viška vazduha i istim načinom privoda tog vazduha u ložište, Slika 8, [15].



Slika 8. Emisija NO_x u zavisnosti od temperature sagorijevanja, koeficijenta viška vazduha i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu/ložište

Za ovu mješavinu uglja i biomase (U93B7) zavisnost emisije NO_x od mjesta uvođenja OFA vazduha u ložište odnosno reaktor prikazana je na sljedećoj slici 9. Konkretno, ovdje se radi o rezultatima sagorijevanja na temperaturi 1400 °C i sa različitim mjestom uvođenja OFA vazduha u reakcionu cijev: pozicija OFA 1 je na udaljenosti 1 m od izlaznog presjeka gorionika, dok je pozicija OFA 2 na udaljenosti 1,3 m. Dodatno, izvedeni su i režimi sagorijevanja sa uvođenjem OFA porcije vazduha na obje pozicije istovremeno: OFA 1 + OFA 2.

Rezultati pokazuju da je emisija NO_x , u ovom slučaju, najmanja pri dovodu OFA vazduha na poziciju 1 (OFA 1), dok je nešto veća za slučaj dovođenja vazduha na poziciju 2 (OFA 2). Pri istovremenom dovodu OFA vazduha na obje pozicije (OFA 1 + OFA 2) može se konstatovati da je emisija NO_x praktično istog nivoa kao u slučaju korištenja pozicije 2 za privod OFA vazduha, U svakom slučaju, ta emisija NO_x , bez obzira na koju se od pozicija privodi OFA vazduh, značajno je niža od emisije bez stepenovanog privoda vazduha, [15].



Slika 9. Emisija NO_x u funkciji od mjesta uvođenja OFA vazduha u reakcionu zonu/ložište

U pogledu mogućnosti smanjenja emisije NO_x , prethodni rezultati istraživanja i saznanja su od ključnog značaja za projektovanje budućih ali i eventualnu rekonstrukciju postojećih kotlova, naročito ložišta u pogledu izbora mjesta/zona za privod stepenovanog vazduha u zonu sagorijevanja. To svakako ima uticaj i na projektovanje te izbor prateće opreme kotla.

IV ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata laboratorijskih istraživanja mogu se donijeti sljedeći zaključci u vezi zavisnosti emisije NO_x i SO_2 od mjesta uvođenja vazduha u reakcionu zonu/ložište :

- Emisija NO_x raste sa porastom temperature sagorijevanja i koeficijenta viška vazduha. Niže emisije NO_x su kod stepenovanog privoda vazduha (sagorijevanje sa OFA) u odnosu na klasični privod vazduha pri kojem se ukupna količina vazduha dovodi na gorionik (konvencionalno sagorijevanje).
- Za sva ispitna goriva, temperaturu sagorijevanja i način dovoda vazduha za sagorijevanje, emisija NO_x je uvijek veća od 400 mg/m^3 i još uvijek je veća od graničnih vrijednosti emisije (GVE) definiranih u LCP i IED direktivama EU: $e_{\text{NO}_x} \leq 200 \text{ mg/m}^3$.
- Imajući u vidu prezentirane rezultate istraživanja u laboratorijskim uslovima, uključujući i prethodne zaključke, zaključuje se da je emisija NO_x za tretiranu projektnu mješavinu uglja K70B20Z10, značajno niža u odnosu na emisiju iz realnog pogona sa primijenjenom tehnologijom sagorijevanja spraćenog uglja u letu sa tečnim odvodom šljake iz ložišta. Pri procesnoj temperaturi $950 \text{ }^\circ\text{C}$ i primjeni stepenovanja vazduha za sagorijevanje ($\lambda_1/\lambda=0,95/1,15$) emisija NO_x je najniža i u prosjeku iznosi oko 500 mg/m^3 . Primjenom OFA

vazduha emisija NO_x je niža za oko 120 mg/m^3 u odnosu na emisiju pri konvencionalnom sagorijevanju sa ukupnim koeficijentom viška vazduha 1,15. Prosječna emisija NO_x pri procesnim temperaturama 1150 i $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ je: 565 i 660 mg/m^3 - respektivno, dok je na temperaturi sagorijevanja $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ oko 750 mg/m^3 - pri tome je također pokazano da su najniže emisije NO_x u uslovima stepenovanog privoda vazduha ($\lambda_1/\lambda=0,95/1,15$) a najveće pri klasičnom privodu i koeficijentu viška vazduha od 1,20: 921 mg/m^3 - emisija NO_x niža za 18,5%.

- U odnosu na sastav goriva, temperatura sagorijevanja se pokazuje kao znatno uticajni parametar na emisiju NO_x . U temperaturnom intervalu od $\Delta t=400 \text{ }^\circ\text{C}$ zabilježen je prosječan porast emisije Δe_{NO_x} od skoro 300 mg/m^3 .
- Emisija NO_x pri kosagorijevanju uglja i otpadne drvene biomase je na nivou emisije pri sagorijevanju mješavine ugljeva. Praktično nema promjene te emisije sa promjenom udjela drvene biomase u mješavini. Prosječna razlika emisije NO_x u zavisnosti od načina dobave vazduha za sagorijevanje je 250 mg/m^3 : pri klasičnom privodu vazduha prosječna emisija je 942 mg/m^3 dok je pri stepenovanom privodu vazduha 692 mg/m^3 .
- Emisija NO_x zavisi i od mjesta uvođenja OFA vazduha u ložište. Tako je emisija NO_x najmanja pri dovodu OFA vazduha na poziciju 1 (1 m od izlazne ravni gorionika ili na cca 1/3 dužine reakcione cijevi/ložišta), dok je nešto veća za slučaj dovođenja na poziciju 2 (1,3 m od izlazne ravni gorionika ili na >1/3 ukupne dužine reakcione cijevi/ložišta). Pri istovremenom dovodu OFA vazduha na obje pozicije (1 i 2) emisija NO_x je praktično na istom nivou kao u slučaju dobave na poziciju 2.
- Emisija SO_2 praktično ne zavisi od količine vazduha za sagorijevanje niti od načina dobave tog vazduha u reakcionu zonu/ložište nego isključivo od sastava goriva (sadržaja ukupnog i sagorivog sumpora u gorivu) i temperature sagorijevanja.
- Pokazano je da je u pogledu emisije CO odnosno efikasnosti procesa sagorijevanja, i stepenovanom privodom vazduha za sagorijevanje osigurati visoku efikasnost tog procesa odnosno imati dosta niske emisije CO.

V ZAHVALA

Dio rezultata prezentiranih u ovom radu proisteklo je i tokom realizacije projekta "Razvoj gorionika za pulzirajuće sagorijevanje hlađenog vodom sa prijedlogom primjene" kojeg su kroz program "Sufinansiranje naučnoistraživačkih projekata od posebnog interesa za Kanton Sarajevo u 2018. godini" finansirali Ministarstvo za obrazovanje, nauku i mlade kantona Sarajevo i Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, te im se i ovom prilikom iskreno zahvaljujem.

VI REFERENCES

- [1] Studija energetskog sektora u BiH, Konačni izvještaj, Modul 8 - Rudnici uglja, Konzorcij: Energetski institut

- Hrvoje Požar, Hrvatska; Soluziona, Španjolska; Ekonomski institut Banjaluka, BiH; Rudarski institut Tuzla, BiH, 2009.
- [2] Uticaj kvaliteta uglja na troškove proizvodnje električne energije i cijenu uglja; Studija; Naručilac: JP Elektroprivreda BiH d.d. Sarajevo, Izvršilac: Mašinski fakultet Sarajevo i Rudarski institut d.d. Tuzla, Sarajevo, 2014.
- [3] Smajević I., Hodžić N.: Betriebserfahrungen im Kraftwerk Kakanj bei der Verbrennung der starkverschmutzungsneigenden mittelbosnischen Braun-kohle, Dresden, 25.-26. Oktober 2000., 151-160,
- [4] Advanced Decentralised Energy Generation Systems in Western Balkans - ADEG, Projekt FP6, National Technical University of Athens, Institut IVD Stuttgart, Fakultet Strojstva i Brodogradnje Zagreb, Mašinski fakultet Sarajevo, Institut Vinča Beograd, IST Portugal, 2004.-2007.
- [5] Tsumura T., Okazaki H., Dernjatin P., Savolainen K., Reducing the minimum load and NO_x emissions for lignite-fired boiler by applying a stable-flame concept, Applied Energy, Volume 74, Issues 3-4, March-April 2003, p. 415-424.
- [6] Wang J., Fan W., Li Y., Xiao M., Wang K., Ren P., The effect of air staged combustion on NO_x emissions in dried lignite combustion, Energy, Volume 37, Issue 1, January 2012, p. 725-736.
- [7] Kuang M., Li Z., Liu C., Zhu Q., Experimental study on combustion and NO_x emissions for a down-fired supercritical boiler with multiple-injection multiple-staging technology without overfire air, Applied Energy, Volume 106, June 2013, p. 254-261.
- [8] Kuang M., Li Z., Ling Z., Zeng X., Evaluation of staged air and overfire air in regulating air-staging conditions within a large-scale down-fired furnace, Applied Thermal Engineering Volume 67, Issues 1-2, June 2014, p. 97-105.
- [9] Rozendaal M. Impact of coal quality on NO_x emissions from power plants. Delft: Delft University of Technology, 1999.
- [10] Kazagić A. Smajević I.: Experimental investigation of ash behavior and emissions during combustion of Bosnian coal and biomass, Energy, Volume 32, Issue 10 (October 2007), p. 2006-2016.
- [11] Kazagić A., Smajević I., Synergy Effects of Co-firing of Wooden Biomass with Bosnian Coal, Energy, Volume 34, Issue 5 (May 2009), p. 699-707.
- [12] Kazagić A., Smajević I., Duić N., Selection of sustainable technologies for combustion of Bosnian coals, Thermal Science, Volume 14, No. 3 (2010), p. 715-727.
- [13] Smajević I., Kazagić A., Musić M., Bečić K., Hasanbegović I., Sokolović Š., Delihasanović N., Skopljak A., Hodžić N., Co-firing Bosnian Coals with woody biomass: experimental studies on a laboratory-scale furnace and 110 MWe power unit, Thermal Science, 16 (2012), 3, p. 789 - 804.
- [14] Nareddy S., Moyeda D., Zhou W., Marquez A., Swanson L., Duval S., NO_x reductions Achieved Through Air Staging in Cyclone Fired Boilers, 32. International Clearwater Coal Conference, Clearwater, Florida, USA, June 1-5 2008.
- [15] Hodžić, N. Istraživanje kosagorijevanja uglja i biomase usmjereno na smanjenje emisija primarnim mjerama u ložištu, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, 2016.
- [16] Smajevic, I., Hodzic, N., Kazagic, A.: Lab-Scale Investigation Of Middle-Bosnia Coals To Achieve High-Efficient And Clean Combustion Technology, Thermal Science: Year 2014, Vol. 18, No. 3, pp. 875-888, Original scientific paper, DOI: 10.2289/TSCI
- [17] Hodžić, N., Kazagić, A., Smajević, I.: Laboratorijska istraživanja sagorijevanja u letu ugljeva srednjebosanskog bazena u suhom režimu odvođenja šljake; Indeksirani časopis: Bosanskohercegovačka elektrotehnika, Godište 8, Januar 2015.
- [18] Hodžić, N., Smajević, I., Kazagić, A.: Effects of cofiring Bosnian coal with woody biomass and natural gas on NO_x emissions under different process conditions, 10th European Conference On Industrial Furnaces And Boilers (INFUB-10) Gaia (Porto), Portugal, 07th to 10th April 2015

AUTORI

Prvi autor: Nihad Hodžić, Vanredni profesor, Dr. sc., Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Vilsonovo šetalište 9, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina, hodzic@mef.unsa.ba

Drugi autor: Anes Kazagić, Dr. sc., JP Elektroprivreda BiH d.d. - Sarajevo, Vilsonovo šetalište 15, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina, a.kazagic@epbih.ba

Treći autor: Kenan Kadić, JP Elektroprivreda BiH d.d. - Sarajevo, Podružnica TE Kakanj, 72240 Kakanj, Bosna i Hercegovina, ke.kadic@epbih.ba

Autor za korespondenciju: Nihad Hodžić, hodzic@mef.unsa.ba, +387 (0)33 729 800.