

## Uticaj višestepenog dovođenja vazduha po visini ložišta na procese u energetskom parnom kotlu TE Kostolac B

GORAN M. STUPAR, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd

DRAGAN R. TUCAKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Mašinski fakultet, Beograd

Originalni naučni rad

UDC: 621.18

DOI: 10.5937/tehnika2101043S

*U cilju dostizanja propisanih normi koncentracije azotnih oksida za velika ložišta na uglj od 200 mg/Nm<sup>3</sup> (u suvim gasovima na 6% O<sub>2</sub>) u termoelektrani Kostolac B, 2015. godine, primenjena je primarna mera višestepenog dovođenja vazduha po visini ložišta. U radu je prikazana analiza efekata modernizacije na rad parnog kotla u celini, proračunskim sprežanjem diferencijalnih matematičkih modela procesa sagorevanja čestica ugljenog praha, strujanja i zračenja produkata sagorevanja, kao i formiranja azotnih oksida sa integralnim termičkim i aerodinamičkim proračunskim procedurama. Ovakav proračunski sistem omogućava pouzdano predviđanje radnih karakteristika energetskih parnih kotlova i u uslovima neprojektog - podstehiometrijskog sagorevanja. Primenom ovakvog pristupa kvalitet rada samog kotla moguće je proceniti sa aspekta efektivnog, efikasnog, sigurnog i ekološki prihvatljivog načina rada. Na osnovu navedenog izvršeni su proračuni parnog kotla bloka 1 TE Kostolac B za postojeći i reorganizovani sistem sagorevanja. U radu je prikazan uticaj većeg broja parametara na rad parnog kotla sa izvedenim konceptom primarnih mera.*

**Ključne reči:** energetski parni kotao, primarne mere, sistem proračuna, efikasnost

### 1. UVOD

Kako pojedine materije koje nastaju procesom sagorevanja fosilnih goriva imaju negativan uticaj na zdravlje čoveka i prirodu u celini, neophodno je u tu svrhu dodatno prilagoditi procese u energetskim parnim kotlovima.

Jednu grupu posebno nepovoljnih materija koje pritom nastaju predstavljaju oksidi azota. Sadržaj NO<sub>x</sub> u izlaznim dimnim gasovima termoelektrani Kostolac B, pri sagorevanju lignita, prevazilazi evropsku normu od 200 mg/Nm<sup>3</sup> [1] koja će u narednom periodu i u Republici Srbiji biti obavezujuća.

Azotni oksidi najvećim delom nastaju, gotovo nezavisno od temperature, oksidacijom azota iz goriva (gorivni NO<sub>x</sub>) i manjim delom, samo pri visokim lokalnim temperaturama, oksidacijom azota iz vazduha (termički NO<sub>x</sub>) [2]. Kako je, pri sagorevanju lig-

nita, formiranje najvećeg dela NO<sub>x</sub> prvenstveno zavisi od sadržaja azota u gorivu i lokalno dostupnog kiseonika u zonama gde se vrši sagorevanje [3] neophodno je upravljati procesima u kotlu tako da se ostvare, ako je to moguće, povoljni uslovi rada i sa ovog aspekta.

Za postizanje ekoloških standarda u ovom domenu razvijene su različite metode za smanjenje sadržaja oksida azota u dimnim gasovima.

U prvu grupu spadaju primarne mere za redukciju sadržaja azotnih oksida što podrazumeva preventivno delovanje koje zahteva značajno manje troškove, naročito pri modernizaciji postojećih postrojenja.

Ovakve mere imaju takvu organizaciju sagorevanja u ložištu da se ono odvija u uslovima nepovoljnog okruženja za intenzivno nastajanje azotnih oksida [4]. Kod primene geološki mlađih ugljeva, u kakve spadaju domaći ligniti, predviđa se da je moguće približiti se ili u potpunosti zadovoljiti norme u ovoj oblasti samo primarnim postupcima.

Kako je u ložištu neophodno stvoriti okruženje koje nema veću koncentraciju kiseonika, odnosno voditi proces tako da količina dopremljenog kiseonika u zone u kojima se vrši sagorevanje bude približna

---

Adresa autora: Goran Stupar, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16

e-mail: gstupar@mas.bg.ac.rs

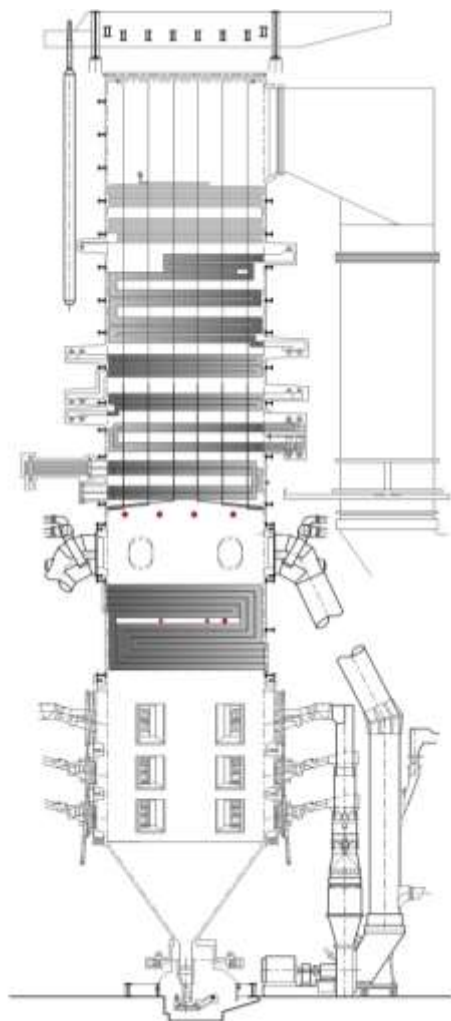
Rad primljen: 16.09.2020.

Rad prihvaćen: 25.12.2020.

onoj koja se troši za reakciju oksidacije, najprije menjivanja mera ove grupacije je višestepeno dovođenje vazduha po visini ložišta [5].

U cilju ispitivanja mogućnosti primene višestepenog dovođenja vazduha kao i analize njegovih efekata na rad parnog kotla u celini, izvršeno je modeliranje procesa sagorevanja lignita u ložištu parnog kotla bloka 1 u TE Kostolac B. Ovakav složeni matematički model povezan sa inženjerskim termičkim i aerodinamičkim procedurama u jedinstveni sistem omogućava proračune sa promenom uticajnih parametara u najširim granicama.

## 2. KARAKTERISTIKE PARNOG KOTLA



Slika 1 - Energetski parni kotao TE Kostolac B

Razmatrani parni kotao sastoji se od zagrejača vode (1), isparivača smeštenog u ložištu (4), tri stupnja pregrejača sveže pare (7, 8 i 9) i dva stupnja pregrejača naknadno pregrejanе pare (10 i 11). Regulacija temperature sveže i naknadno pregrejanе pare vrši se ubrizgavanjem vode u hladnjake postavljene između odgovarajućih grejnih površina. Dispozicija je prikazana na slici 1.

Kotao je opremljen sa osam postrojenja za pripremu ugljenog praha. Mlevenje i sušenje uglja obavlja se u ventilatorskim mlinovima (12) na čijem se izlazu nalaze inercijalni separatori. Sušenje se vrši dimnim gasovima koji se sa vrha ložišta u mlin dovode recirkulacionim kanalima (13). Regulisanje temperature u mlinu vrši se primarnim vazduhom koji se u glavu recirkulacionog kanala (14) dovodi kroz priključak (15) i hladnim recirkuliranim gasovima sa kraja kotla koji se dovode kroz priključak (16). Iza mlinuskog separatora postavljen je razdvajač aerosmeše (17) koji je deli na dve struje: primarnu i sekundarnu. Iza razdvajača postavljen je kanal za aerosmešu (18) iza koga se primarna struja odvodi u donju (19) i gornju (20) etažu glavnog gorionika, a sekundarna u gorionik za otparke (21).

Nakon rekonstrukcije nema promena na cevnom sistemu glavnog toplotnog prijemnika. Promene nastale uvođenjem primarnih mera ogledaju se u načinu dopremanja zagrejanog vazduha. Prvi nivo uvođenja vazduha (vazduh za dogorevanje - VZD) je u oblasti ozračenog pregrejača sveže pare (7), a drugi nivo neposredno pred izlaz produkata sagorevanja iz ložišta.

## 3. ANALIZA I REZULTATI SISTEMA PRORAČUNA PARNOG KOTLA

Za potrebe proračuna parametara rada složenog kotlovskeg postrojenja, nezavisno od koncepcije sagorevanja primenjene u njegovom ložištu, definisan je algoritam povezivanja integralnih proračuna kotla i numeričkih proračuna elementa čiji se rad analizira [6]. Da bi se sagledao rad kotla u celini polazi se od standardnih bilansnih integralnih metoda procene koje obezbeđuju ulaznu bazu graničnih uslova za numerički proračun definisanog matematičkog modela. Baza podataka podrazumeva skup realnih parametara rada postrojenja, to jest, skup onih veličina kojima sistem deluje na objekat čiji se rad numerički analizira. Na ovaj način formirani skup podataka čine informacije o kvantitetu i kvalitetu ulaznih struja (ugljeni prah, transportna mešavina gasova i vazduha) proračunskog domena (ložišta), odnosno njihove količine (masa), temperature (energija) i udela (koncentracija) pojedinih komponenata. Kao ulazni proračuni sistema, najpre se sprovode toplotni bilans, termički i aerodinamički proračuni, a zatim se sa zbirnim rezultatima vrši numerička simulacija procesa u ložištu kotla kao izdvojenog elementa.

### 3.1. Povezivanje proračuna parnog kotla

Putem numeričke simulacije rešavaju se jednačine stacionarnog turbulentnog dvofaznog višekomponentnog zračećeg toka (količine kretanja, održanja mase, energije i koncentracije gasovitih komponenata, mode-

liranja turbulencije, kretanja čestica, hemijskih reakcija i toplotnog procesa dominantnog mehanizma zračenja), samo u domenu gde počinje i završava se proces sagorevanja čestica ugljenog praha. Na ovaj način,

sinergijski definisan sistem omogućava praćenje rada složenog energetskog sistema u svim njegovim elementima i obezbeđuje podlogu za ispitivanje mera koje utiču na njegovu željenu funkcionalnost.

Tabela 1. Izvodi sistema proračuna parnog kotla

Redni broj	N A Z I V	Oznaka	Jedinica mere	Donja toplotna moć goriva $H_d$ [kJ/kg]					
				8373,6					
				NR	R				
					TS1	TS2	TS3	TS4	TS5*
Opterećenje kotla [%]									
				100	110	100	85	70	100*
<i>l</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
1.	Koeficijent viška vazduha iza 3. (izlaznog) pregrejača sveže pare	$\alpha_1$	-	1,22	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
2.	Stepen recirkulacije hladnih gasova	$r_2$	-	0,048	0,044	0,048	0,057	0,069	0,048
3.	Koeficijent viška vazduha na izlazu kotla	$\alpha_{iz}$	-	1,40	1,27	1,29	1,32	1,36	1,29
4.	Temperatura izlaznih dimnih gasova	$t_{iz}$	°C	174,0	169,0	168,0	168,0	164,0	170,0
5.	Gubitak u izlaznim gasovima	$q_2$	%	11,42	10,33	10,32	10,43	10,40	10,47
6.	Gubitak usled hemijske nepotpunosti sagorevanja	$q_3$	%	0	0	0	0	0	0
7.	Gubitak usled mehaničke nepotpunosti sagorevanja	$q_4$	%	2,80	2,87	3,00	3,20	3,40	3,00
8.	Gubitak usled spoljašnjeg rashlađivanja	$q_5$	%	0,20	0,18	0,20	0,24	0,29	0,20
9.	Gubitak usled fizičke toplote šljake	$q_6$	%	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
10.	Stepen korisnosti kotla	$\eta_k$	%	85,52	86,56	86,42	86,08	85,86	86,27
11.	Ukupna količina toplote apsorbovana u parnom kotlu	$Q_k$	kW	774029	778023	712268	639188	543835	749603
12.	Potrošnja goriva	$B$	kg/s	106,480	105,802	97,012	87,219	74,231	102,270
13.	Koncentracija ugljen-monoksida	$(CO)_r$	mg/Nm <sup>3</sup>	-	130	75	40	0	0
14.	Koncentracija azotnih oksida	$(NO_x)_r$	mg/Nm <sup>3</sup>	470	225	190	195	170	185

Tabela 2. Izvodi termičkog proračuna kotla potrebnih za analizu

Redni broj	N A Z I V	Oznaka	Jedinica mere	Donja toplotna moć goriva $H_d$ [kJ/kg]					
				8373,6					
				NR	R				
					TS1	TS2	TS3	TS4	TS5*
Opterećenje kotla [%]									
				100	110	100	85	70	100*
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
Toplotni prijemnik (voda i para)									
1.	Ubrizgavanje u hladnjak broj 1	$D_{H1}$	kg/s	13,999	0	0	0	6,000	0
2.	Ubrizgavanje u hladnjak broj 2	$D_{H2}$	kg/s	11,024	0,638	0,511	0,691	3,646	0,039
3.	Ubrizgavanje u hladnjak broj 3	$D_{Hr}$	kg/s	8,841	0,102	0,472	0,311	0,331	0,369
4.	Temperatura pare na izlazu iz 3. stupanja pregrejača sveže pare	$t_{PP3i}, t_s$	oC	540	502	508	534	540	540
5.	Pritisak sveže pregrejane pare	$p_s$	bar	186,0	186,0	186,0	176,0	147,9	167,0
6.	Temperatura pare na izlazu iz 2. stupanja naknadnog pregrejača pare	$t_{rs}$	oC	540	514	512	518	516	526

7.	Pritisak naknadno pregrejane pare	$p_{rs}$	bar	43,7	43,7	43,7	37,4	30,9	36,8	
Toplotni predajnik (produkti sagorevanja)										
8.	Temperatura dimnih gasova na izlazu iz ložišta	$t_l''$	oC	1066,0	948,0	940,0	926,0	900,0	940,0	
9.	Temperatura dimnih gasova iza 3. (izlaznog) pregrejača sveže pare	$t_1$	oC	967,0	839,0	827,0	812,0	781,0	836,0	
10.	Temperatura izlaznih dimnih gasova	$t_{iz}$	oC	174,0	169,0	168,0	168,0	164,0	170,0	
Apsorbovane količine toplote										
11.	Zagrejač vode	$Q_{NV}$	kJ/kg	903,2	743,2	725,5	728,7	733,9	750,1	
12.	Iparivač	Ložište	$Q_i$	kJ/kg	1778,4	2842,3	2857,4	2883,2	2957,8	2868,4
		Dopunske grejne površine			496,5	390,4	402,8	423,3	453,7	411,5
13.	Prvi stupanj pregrejača sveže pare	$Q_{PP1}$	kJ/kg	468,2	595,2	598,4	603,7	619,4	600,7	
14.	Prvi deo drugog stupnja pregrejača sveže pare	$Q_{PP21}$	kJ/kg	1749,1	604,3	590,2	578,9	536,5	612,3	
15.	Drugi deo drugog stupnja pregrejača sveže pare	$Q_{PP22}$	kJ/kg		697,3	685,2	657,6	616,2	673,0	
16.	Treći stupanj pregrejača sveže pare	$Q_{PP3}$	kJ/kg	732,2	590,5	614,6	612,9	637,6	553,1	
17.	Prvi stupanj naknadnog pregrejača pare	$Q_{NP1}$	kJ/kg	825,6	666,4	641,2	625,1	572,0	652,9	
18.	Drugi stupanj naknadnog pregrejača pare	$Q_{NP2}$	kJ/kg	559,3	441,1	454,0	457,6	457,1	434,4	
19.	Zagrejač vazduha	$Q_{ZV}$	kJ/kg	943,9	788,3	775,6	729,4	670,4	785,3	

### 3.2. Rezultati proračuna parnog kotla

Na osnovu definisanog modela proračuna izvršena su ispitivanja rada rekonstruisanog (R) parnog kotla bloka 1 pri promeni opterećenja, kao TS1-TS4 (110 %, 100 %, 85 %, 70%) i gorivo koje se trenutno koristi u elektrani, donje toplotne moći od 8373,6 kJ/kg. Validacija modela je izvršena za rad kotla pri projektnom stanju (NR), to jest, pri konvencionalnom sagorevanju bez primarnih mera za smanjenje sadržaja azotnih oksida u produktima sagorevanja [7]. Nerekonstruisan sistem predviđa dovođenje celokupnog vazduha za sagorevanje u zonu gorionika u količini od 22% većoj od teoretski potrebne za potpuno sagorevanje. Kako na koncentraciju azotnih oksida u dimnim gasovima parnog kotla najviše utiče lokalni odnos goriva i kiseonika, nameće se potreba da se sekundarni vazduh preraspodeli po visini ložišta. Usvojena primarna mera podrazumeva uvođenje sekundarnog vazduha na tri nivoa. Na ovakav način rekonstruisan kotao podrazumeva podstehiometrijsku količinu vazduha (0,96 %) u oblasti gorionika i dodatno kontrolisano uvođenje zagrejanog vazduha po nivoima dogorevanja (do 1,01% i do 1,15%). U svim testiranim radnim režimima ugljeni prah se deli po gorionicima u masenom odnosu 40:40:20, dok se transportni fluid deli prema 25:25:50.

Izvodi iz sistema i termičkog proračuna razmatranih test slučajeva prikazani su u tabelama 1 i 2. Može

se konstatovati da je uvođenje primarnih mera, na ovakav način, bitno snizilo temperaturu produkata sagorevanja na kraju ložišta, pa parni kotao ne može da postigne projektnu temperaturu ni sveže ni naknadno pregrejane pare za projektni pritisak i produkciju pare od 1000 t/h (100 %). Iz tog razloga su u tabelama 1 i 2 prikazani rezultati za radni režim TSS\* u kome je, na osnovu proračuna, određen pritisak sveže pare sa kojim bi kotao obezbedio projektnu temperaturu sveže pregrejane pare od 540°C pri produkciji od 1000 t/h (100\*%).

### 3.3. Analiza rezultata proračuna parnog kotla

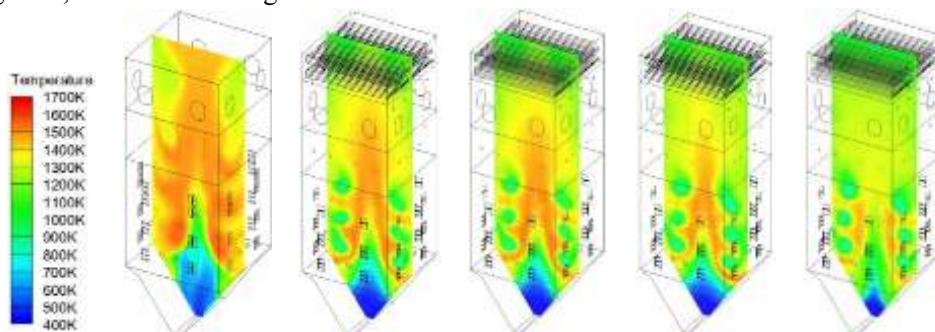
Na slikama od 2 do 4 prikazana su kako temperaturna tako i polja koncentracije kiseonika i azotnih oksida u središnjem vertikalnom preseccima proračunskih domena. Prikazani slučajevi, na različitim opterećenjima, podrazumevaju rad kotla sa 6, 5 i 4 gorionika u radu.

Uočljivo je da se u središtu prostora nalazi vazduh koji prodire kroz ložišni levak. Takođe se vidi da kiseonik iz vazduha zarobljen u središnjem vrtlogu sporije reaguje sa gorivom po celoj visini ložišta (zadržavanje kiseonika).

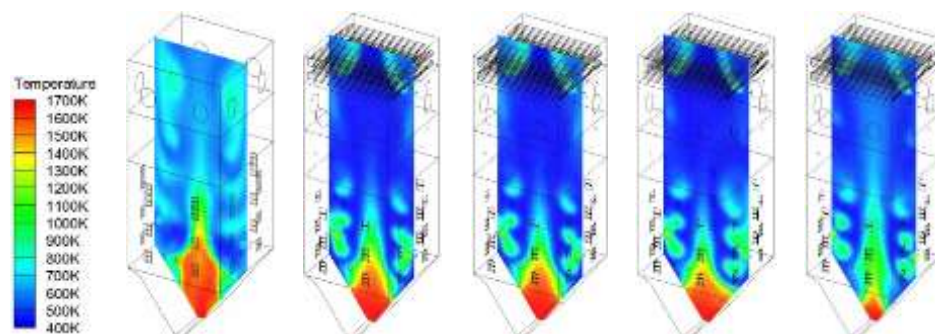
Prikazani rezultati proračuna sadržaja azotnih oksida pokazuju da azotni oksidi dominantno nastaju u zonama u kojima ima nesagorelog goriva i viška vazduha. U onim delovima ložišta u kojima ima kiseonika

ali ne i goriva ne nastaju značajne količine oksida azota, bez obzira na prisustvo azota iz vazduha. Ova pojava rezultat je toga što je za oksidaciju azota iz vazduha (termički NO<sub>x</sub>) neophodna visoka lokalna temperatura dimnih gasova. Intenzivnije stvaranje NO<sub>x</sub> dešava se u delovima ložišta u kojima, pored nesagorelog goriva, ima i neutrošenog kiseonika.

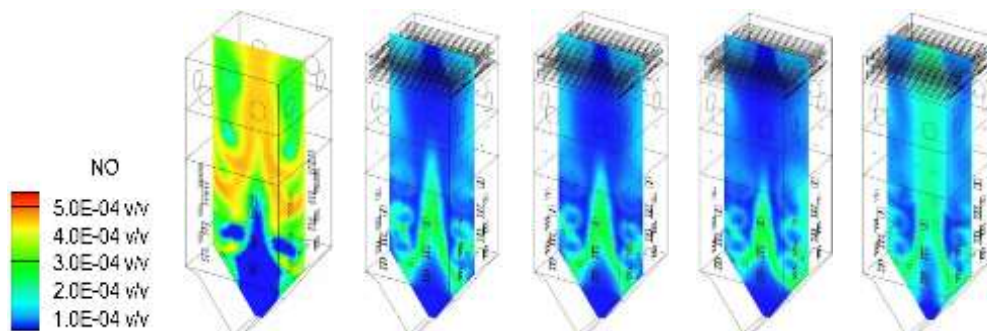
Razlog ovome je da se azot iz goriva mnogo lakše jedini sa kiseonikom (gorivni NO<sub>x</sub>). Lako se može primetiti da kod projektnog stanja u ložištu postoji prilično veća količina slobodnog kiseonika što je rezultiralo značajno većim sadržajem azotnih oksida od 470 mg/Nm<sup>3</sup>.



Slika 2 - Polje  $T$  u ložištu pri projektivnim uslovima (NR) i višestepenim dovodenjem vazduha (TS1-TS4);



Slika 3 - Polje  $O_2$  u ložištu pri projektivnim uslovima (NR) i višestepenim dovodenjem vazduha (TS1-TS4);



Slika 4 - Polje NO u ložištu pri projektivnim uslovima (NR) i višestepenim dovodenjem vazduha (TS1-TS4)

Temperaturna polja u ložištu pri radu sa modifikovanim sistemom prikazuju da je proces sagorevanja usporen u ložištu po celoj njegovoj visini i da se u potpunosti završava posle uvođenja treće struje sekundarnog vazduha, odnosno na izlazu iz ložišta. Analizom polja koncentracije kiseonika u ložištu na slici 3 uočava se da su zone povišene koncentracije kiseonika osetno manje, pa nema većih oblasti sa slobodnim kiseonikom po celoj visini ložišta što dovodi do bitno smanjene količine NO<sub>x</sub> na izlazu iz ložišta, odnosno kotla. Isto tako, kiseonik iz treće struje sekundarnog vazduha troši se za konačno dogorevanje nesagorelih

čestica i ugljen-monoksida u zoni gde produkti sagorevanja napuštaju ložište. Moguće je konstatovati da nema zadržavanja većih količina ugljen-monoksida u izlaznom preseku proračunskog domena, a da je najveća vrednost 130 mg/Nm<sup>3</sup> pri opterećenju od 110%, što je značajno manje od granične vrednosti koja iznosi 250 mg/Nm<sup>3</sup>. Sadržaj zaostalog CO za sve test slučaje prikazan je u tabeli 1. Primetno je da je koncentracija CO pri snižavanju opterećenja rada kotla opada. Može se primetiti da su skoro svi test slučajevi rada kotla sa modifikovanim sistemom sagorevanja zadovoljili propisane norme o koncentraciji azotnih

oksida u dimnim gasovima. Uočljivo je prekoračenje dovoljenog sadržaja jedino u slučaju povećanog opterećenja od 110% u vrednosti od  $225 \text{ mg/Nm}^3$ , što isključuje ovaj pogonski režim iz ekološki prihvatljivog načina rada. Pregledom rezultata može se uočiti da se koncentracija  $\text{NO}_x$  najniža pri najmanjem opterećenju i iznosi  $170 \text{ mg/Nm}^3$ . Analizom rada postrojenja sa energetskeg aspekta naglašava se da je usled promene koeficijenta viška vazduha došlo do rasta stepena korisnosti kotla i smanjena je potrošnja goriva za ista opterećenja rada kotla pre i nakon modernizacije. Dodatno se može konstatovati da stepen korisnosti opada sa snižavanjem opterećenja ali da je on uvek veći nego pri radu kotla u projektним uslovima rada. Tako da sa aspekta efikasnosti rada postrojenja najpovoljniji režim predstavlja TS1 kada kotao radi sa 110 % produkcije. Primenom, na ovakav način višestepenog dovođenja vazduha u proces sagorevanja ugljenog praha, temperature produkata sagorevanja na kraju ložišta se značajno snižavaju. Ovakva pojava rezultira usled povećanja toplotnih flukseva u ložištu u novim uslovima rada. Temperatura produkata sagorevanja na kraju ložišta očekivano opada sa snižavanjem opterećenja.

Daljim prenosom energije temperature produkata sagorevanja na izlazu iz trećeg - poluožračenog (izlaznog) pregrejača sveže pare se osetno razlikuju od rada kotla sa konvencionalnim sistemom sagorevanja, a usled čega kotao nema mogućnost postizanja projektne temperature pregrejane pare. Ovakva pojava utiče na efekat rada kotla pa samim tim i smanjenom snagom bloka. Izuzetak čini režim 70% opterećenja u kojem je moguće postići projektne parametre sveže pregrejane pare ali ne i temperaturu naknadno pregrejane pare.

Sa aspekta sigurnosti rada novi uslovi dovođenja vazduha u ložište dovode do njegovog pada. S obzirom na nemogućnost postizanja parametara pregrejane pare ubrizgavanja u hladnjake su blizu nule. Ovo navodi na zaključak da radni režimi nemaju potrebnu sigurnost, odnosno mogućnost apsorbovanja neravnomernosti u radu postrojenja. I u ovom slučaju je izuzetak rad kotla sa opterećenjem od 70% kada, kada su postignute željene temperature sveže pregrejane pare uz manju količinu ubrizgavanja u hladnjake. Pri opterećenju kotla TS5 pri kome su izvršene korekivije (snižavanje) pritiska pare kako bi se postigle željene projektne temperature, što je rezultiralo snižavanjem snage postrojenja i smanjenom sigurnošću rada, postignuta je povećana efikasnost rada i koncentracija azotnih oksida od  $185 \text{ mg/Nm}^3$ .

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati sistema proračuna koji su vršeni u cilju analize rada kotla u celini nakon

uvođenja višestepenog dovođenja vazduha po visini ložišta, kao primarne mere redukcije sadržaja azotnih oksida.

Izvršeni proračuni pokazali su da višestepeno dovođenje vazduha primenjeno na postojeći energetski parni kotao u svim ispitivanim pogonskim situacijama obezbeđuje efikasniji rad postrojenja što je posledica rada sa manjim koeficijentom viška vazduha (1,15). Takođe, u pogledu sigurnosti proračuni su pokazali da većina radnih režima gube potrebne količine ubrizgavanja u hladnjacima. Tek je u režimu rada sa 70% opterećenja, uz manje količine ubrizgavanja, postignuta projektna temperatura sveže pregrejane pare.

Daljom analizom utvrđeno je da je efikasnost rada postrojenja opada sa snižavanjem produkcije. Sa porastom produkcije uglavnom dolazi do porasta sadržaja azotnih oksida u izlaznim produktima sagorevanja. Najnepovoljniji slučaj u ovom smislu je režim sa 110% opterećenjem gde proračunska koncentracija azotnih oksida iznosi  $225 \text{ mg/Nm}^3$ , što ujedno predstavlja jedini testirani slučaj rekonstruisanog postrojenja gde su premašene propisane norme.

Nasuprot njoj sa  $170 \text{ mg/Nm}^3$  azotnih oksida u gasovima rad sa najmanjom produkcijom (70%) predstavlja optimalan radni režim sa ekološkog aspekta ali i izrazito nepoželjan iz razloga što su u ovim radnim uslovima najveći koeficijenti viška vazduha na kraju kotla i recirkulacija hladnih gasova što dodatno pogoršava efikasnost rada postrojenja.

Modernizacijom sistema sagorevanja u ložištu parnog kotla bloka 1 značajno je povećana prenesena količina toplote isparivaču u ložištu.

Ovakva pojava ima za posledicu značajno snižavanje temperature produkata sagorevanja na kraju ložišta, tako da grejne površine smeštene u konvektivnom gasnom kanalu, iza ložišta, ne apsorbuju potrebnu količinu toplote za ostvarivanja projektne temperatura sveže i (ili) naknadno pregrejane pare.

Ova pojava nužno dovodi do gubitka željene snage postrojenja. Pri nižim opterećenjima kotla ovakva pojava je manje izražena s obzirom da su u tim slučajevima pritisci sveže pregrejane pare niži.

Kako bi parni kotao postigao projektnu temperaturu, kako sveže tako i naknadno pregrejane pare, sprovedena je računaska procedura procena rada parnog kotla za sniženi pritisak pare.

Na ovakav način postignute su projektne temperature sveže i naknadno pregrejane pare ali pri pritisku sveže pare od 167 bar, što je za 19 bar niže od projektne vrednosti. Posebno je potrebno naglasiti da ubrizgavanja vode u hladnjake, ni u ovom slučaju, praktično nema pa ne postoji regulacija ni sveže ni naknadno pregrejane pare. Sve ovo za posledicu ima trajni gubitak projektovane snage postrojenja.

## LITERATURA

- [1] Directive 2010/75/EU European Union - limit of emissions of harmful substances into the air from large furence.
- [2] Makovicka J, *Mathematical model of pulverized coal combustion*, Czech Technical University in Prague, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Prague, Czech Republic, 2008.
- [3] Hill SC, Smoot L. D, *Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems*, Prog. Energy Comb. Sci. 26, 417-458, 2000.
- [4] Heinsohn RG, Kabel R.L. Sources and Control of Air Pollution, Prentice - Hall, New Jersey, 1999.
- [5] Tobin R, Moyeda D, Zhou W, Payne R, Application of Layered Control Technologies to Significantly Reduce NOx Emissions from Coal-Fired Boilers, GE Energy, *2nd U.S.- China NOx Workshop Dalian, China*, 2005.
- [6] Stupar G, Tucaković D, Živanović T, Belošević S, Assessing the impact of primary measures for NOx reduction on the thermal power plant steam boiler, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 78, p. 397-409, IF(2014)=2.624, ISSN 1359-4311, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2014.12.074, 2015,
- [7] Živanović T, Tucaković D, Brkić Lj, Stupar G, *Kontrolni CFD proračuni Siemens-ovog rešenja redukcije NOx primarnim merama*, Elektroprivreda Srbije - Ogranak TE-KO Kostolac, Beograd, Srbija, 2015.

## SUMMARY

## IMPACT OF AIR STAGGING IN FURNACE ON PROCESSES IN POWER STEAM BOILER TPP KOSTOLAC B

*The European normatives prescribe the maximum content of 200 mg/Nm<sup>3</sup> in dry flue gases with oxygen content of 6% for existing pulverized coal-fired power plants. In order to analyse the effects of applying some of the primary measures for NOx reduction on the overall steam boiler operation, calculational coupling of differential mathematical models has been applied. This calculation system enables reliable prediction of the performance of power steam boilers also in substoichiometric conditions, and the quality of the boiler operation can be described from the perspective of its effective, efficient, safe and ecological operation. In accordance to that, calculations of the steam boiler unit 1 TE Kostolac B have been carried out for the existing and the air staging combustion system. This paper presents an analysis of the influence of various parameters on the operation of the steam boiler with the application of primary measures.*

**Key words:** power steam boiler, primary measures, calculation system, efficiency.