

Milić Erić, Predrag Stefanović, Zoran Marković,
Predrag Škobalj, Dejan Cvetinović, Rastko Jovanović, Ivan Lazović*

Laboratorija za termotehniku i energetiku,
Institut za nuklearne nauke „Vinča”, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

Smanjenje emisije praškastih materija posle rekonstrukcije i modernizacije elektrofilterskih postrojenja na TE „Nikola Tesla B”

Stručni rad

U odgovarajuće propise domaćeg zakonodavstva uključeni su zahtevi iz međunarodnog dokumenta, Direktiva 2001/80/EC, koji se odnose na ograničenje emisije praškastih materija iz velikih termoenergetskih postrojenja. Shodno preuzetim obavezama, od 2005. godine započelo se sa rekonstrukcijama i modernizacijama elektrofilterskih postrojenja svih termoblokova u sastavu JP EPS. Na termoelektrani „Nikola Tesla B” je tokom 2011. godine izvršena rekonstrukcija i modernizacija elektrofilterskog postrojenja bloka B2, dok je rekonstrukcija elektrofilterskog postrojenja bloka B1 obavljena tokom 2012. godine. Cilj obavljenih rekonstrukcija, finansiranih donacijama Evropske Unije, bio je da se emisija praškastih materija u dimnom gasu iz ovih blokova spusti na nivo ispod 50 mg/Nm³, za normalne uslove i pri garantovanim radnim uslovima kotla i elektrofilterskog postrojenja.

U radu su prikazani rezultati merenja koncentracija praškastih materija u dimnom gasu iza elektrofiltera, obavljenih u skladu sa zahtevima međunarodnih standarda ISO 9096 i EN 13284-1 nakon rekonstrukcije elektrofilterskih postrojenja termoelektrane TENT B, kao i rezultati ispitivanja obavljenih nakon isteka perioda od godinu dana od završetka rekonstrukcija. Dobijeni rezultati potvrđuju da je izlazna koncentracija praškastih materija ispod garantovane vrednosti, čime je potvrđena uspešnost izvedenih rekonstruktivnih zahvata.

Ključne reči: elektrofilter, emisija, praškaste materije

Uvod

Republika Srbija je zemlja potpisnica sporazuma o osnivanju energetske zajednice u jugoistočnoj Evropi (ECSEE). Potpisivanjem ovog sporazuma Republika Srbija je preuzela obavezu da smanji emisiju praškastih materija iz velikih ložišta (>50 MW_e) do 2017. godine. Procenjuje se da je u prethodnom periodu iz svih termoblokova u sastavu EPS-a u vazduh godišnje ispuštano 66900 t praškastih materija (pri prosečnom radu bloka od 6000 sati godišnje) [1]. U skladu sa zahtevima sadržanim u Direktivi EU [2], ukupna emisija praškastih materija svih blokova iz sastava EPS-a nakon rekonstrukcije i modernizacije treba da bude svedena na nivo od 5850 t/godišnje. U cilju smanjenja nivoa aerozagađenja i poboljšanje kvaliteta vazduha, JP

* Odgovorni autor; elektronska adresa: zoda_mark@vinca.rs

Elektroprivreda Srbije je usvojila dugoročni plan rekonstrukcije i modernizacije svojih postrojenja, koji obuhvata značajne investicione projekte u oblasti zaštite životne sredine u periodu 2007–2015. godine. [1]. Među njima se izdvajaju projekat rekonstrukcije svih elektrofilterskih (EF) postrojenja termoelektrana u sastavu JP EPS-a i projekat ugradnje opreme za kontinualni monitoring u skladu sa EU normama. Osnovni cilj navedenih projekata je da se postigne smanjenje emisije čvrstih čestica ($<50 \text{ mg/m}^3$). Procenjuje se da će ispunjavanje zahteva postavljenih Direktivom usloviti ulaganja od oko 635 miliona evra u modernizaciju i revitalizaciju termoenergetskih blokova snage preko 300 MW. Među blokovima planiranim da se na njima obave rekonstrukcije EF se nalaze i blokovi B1 i B2 sa prosečnom godišnjom proizvodnjom od oko 8377 GWh i godišnjom emisijom praškastih materija od 2573 t [1].

Prilikom periodičnih merenja srednje koncentracije praškastih materija u dimnom gasu iza EF bloka TENT B1 pre njegove rekonstrukcije, izmerene su sledeće vrednosti (svedeno na suvi gas na 0°C , 101309 Pa, $\text{O}_2 = 6\%$): 2008. godine – 54 mg/Nm^3 , 2009. god. – 115 mg/Nm^3 , 2010. god. – 60 mg/Nm^3 i 2011. god. – 147 mg/Nm^3 [4]. Proračunske vrednosti emisije praškastih materija su bile 132 kg/h u 2008. godini, 294 kg/h u 2009. godini i 157 kg/h u 2010. godini, a izraženo po jedinici proizvedene energije 0.20 kg/MWh , 0.47 kg/MWh i 0.25 kg/MWh , respektivno.

U periodu pre rekonstrukcije EF bloka B2, merenjima su određene sledeće srednje vrednosti koncentracije praškastih materija u dimnom gasu na izlazu iz EF: 1992. godine – 79 mg/Nm^3 , 1995. god. – 162 mg/Nm^3 , 1999. god. – 154 mg/Nm^3 i 2007. god. – 55 mg/Nm^3 [5]. Odgovarajuće vrednosti emisije praškastih materija dobijene proračunom su bile: 105 kg/h , 219 kg/h , 222 kg/h i 69 kg/h , a svedeno na jedinicu proizvedene energije: 173 g/MWh , 365 g/MWh , 362 g/MWh i 111 g/MWh , respektivno. Prilikom periodičnih merenja emisije praškastih materija u dimnom gasu bloka B2 obavljenih tokom 2008. godine izmerene su srednje vrednosti koncentracije praškastih materija na izlazu iz EF od 156 mg/Nm^3 [1].

Jedan od osnovnih ciljeva rekonstrukcije EF postrojenja blokova B1 i B2 bio je smanjenje koncentracije praškastih materija u dimnim gasovima na nivo ispod Direktivom propisane vrednosti od 50 mg/m^3 . Tokom 2011. godine je izvršena rekonstrukcija i modernizacija elektrofilterskog postrojenja bloka B2 od strane Rafako S. A., Raciborz, Poljska, a zatim je tokom 2012. godine konzorcijum HAMON ENVIRONMENTAL GmbH i ZK-TERMOCHEM. s. r. o. obavio rekonstrukciju EF postrojenja bloka B1. Činjenica da su dva različita izvođača izvela rekonstrukciju EF postrojenja dva projektno veoma slična bloka, rezultiralo je u donekle različitim rekonstruktivnim zahvatima sprovedenim na ovim EF. Rekonstruktivni zahvati na EF postrojenjima su obuhvatili povećanje visine i dužine elektrofilterskih polja, povećanje širine gasnog prolaza i broja taložnih elektroda, dodavanje još jednog polja elektroda i poboljšanje strujno-naponskih karakteristika sekcija EF [6–8]. Istovremeno sa rekonstrukcijom i modernizacijom EF postrojenja, izvršene su i kapitalne rekonstrukcije turbinskih i kotlovskih postrojenja ovih blokova sa ciljem povećanja njihove snage sa 620 MW na 670 MW uz produženje njihovog radnog veka.

Nakon obavljenih rekonstrukcija, izvršene su serije merenja emisije praškastih materija iz EF postrojenja ovih blokova [6–8], sa ciljem da se utvrdi da li rekonstruisana EF postrojenja ispunjavaju zahteve evropske Direktive [2] i odgovarajućih domaćih propisa po pitanju nivoa emisije praškastih materija, kao i sve ostale ugovorene parametre i karakteristike rada rekonstruisanih EF postrojenja. Oba izvođača su ugovorima garantovala da će, pri ostvarenim garantovanim radnim uslovima kotla i EF postrojenja, izlazna koncentracija praškastih materija biti manja od 50 mg/m^3 (svedeno na uslove suvog dimnog gasa, pri normalnim uslovima i koncentraciji kiseonika u dimnom gasu od 6%). Prva serija merenja je sprovedena neposredno nakon obavljene

rekonstrukcije posmatranog EF postrojenja, dok je druga serija obavljena nakon isteka perioda od godinu dana, u toku kojeg je izvršeno praćenje, analiza i podešavanje rada rekonstruisanog EF postrojenja. Ispitivanja emisije praškastih materija iz EF postrojenja ovih blokova su sprovedena u skladu sa zahtevima standarda ISO 9096 i EN 13284-1.

Merenjima obavljenim nakon rekonstrukcije EF postrojenja blokova B1 i B2 termoelektrane „Nikola Tesla” utvrđene su manje vrednosti emisije praškastih materija od Direktivom propisane granične vrednosti od 50 mg/m^3 , čime je potvrđena opravdanost izvršenih rekonstrukcija i modernizacija ispitivanih EF postrojenja [6–8].

Osnovni podaci o blokovima B1 i B2 termoelektrane Nikola Tesla

Blokove B1 i B2, tip BB-1880, nazivne snage 620 MW, proizvela je firma RAFAKO. Blok B1 je u upotrebu uveden tokom 1983. a blok B2 tokom 1985. godine. Oba bloka se koriste u baznom opterećenju za kontinualnu proizvodnju sa prosečno ostvarenih 6500 sati rada godišnje. Osnovne tehničke karakteristike kotlova rekonstruisanih blokova B1 i B2 sa povećanom snagom od 670 MW date su u tabl. 1.

Kotlovi blokova B1 i B2 su toranjski, potkritični, sa prinudnom cirkulacijom tipa SULZER sa jednim prolazom. Svaki od kotlova ima osam mlinova sa tangencijalnim loženjem tip N-400.42, proizvođača Minel, Beograd. Prema projektu, maksimalna moguća snaga se ostvaruje sa sedam mlinova u pogonu, dok je osmi rezervni. Dimni gas napušta ložište kroz dimni trakt podeljen u dva kanala. Svaki od kanala provodi dimne gasove kroz rotirajući horizontalni zagrejač vazduha tipa Ljungstrom, zatim se deli na dve grane koje ulaze u elektrofilter, odakle se dimni gas odvodi u dimnjak. Na izlazu iz zagrejača vazduha se nalaze dva gravitaciona bunkera za skupljanje krupnih čestica pri skretanju struje dimnog gasa iz smera vertikalno na dole u horizontalni tok.

Turbinska i kotlovska postrojenja oba bloka su u prethodnom periodu rekonstruisana u nekoliko faza, sa ciljem povećanja snage na nivo od 670 MW. Osnovni parametri dimnog gasa na ulazu u rekonstruisana EF postrojenja dati su u tabl. 2.

U kotlovima termoelektrane „Nikola Tesla B” sagoreva se lignit Kolubarskog basena, širokog spektra kvaliteta. Prosečan opseg karakteristika kolubarskog lignita, koji se doprema blokovima B1 i B2, kao i vrednosti uglja projektnog i garantovanog kvaliteta pri radu rekonstruisanog EF postrojenja, date su u tab. 3. Termoelektrana „Nikola Tesla B” nije snabdevena postrojenjem za odsumporavanje.

Osnovni podaci o rekonstruisanim EF postrojenjima blokova B1 i B2

Dvokomorne elektrofiltere tipa BS 672 je proizvela i 1983. godine ugradila na bloku B1 firma „LURG”, Nemačka, a 1985. na bloku B2. Ova postrojenja služe za prečišćavanje dimnih gasova nastalih sagorevanjem lignita. Svaki EF se sastoji od dve komore koje nisu međusobno potpuno razdvojene. Projektna vrednost efikasnosti odvajanja je 99,82% pri sagorevanju lignita projektnog kvaliteta i vrednosti koncentracije čestica u dimnom gasu od 100 mg/Nm^3 (0°C , 1013 mbar, suvi gas, $\text{O}_2 = 6\%$).

Modernizovani EF bloka B1 sadrži 16 nezavisnih električnih polja grupisanih u 4 paralelne sekcije (dve u levom i dve u desnom EF). Svaka od sekcija sadrži 4 nezavisna električno razdvojena polja, tako da i levi i desni EF sadrže po 8 HV/TR jedinica, ukupno 16 za ceo EF. Elektrode su produžene i povećano je rastojanje između njih, što je dovelo do povećanja dimenzija rekonstruisanog EF u odnosu na dimenzije EF pre rekonstrukcije. Aktivna visina elektrofilterskih

Tablica 1. Osnovne tehničke karakteristike rekonstruisanih kotlova blokova B1 i B2 sa povećanom snagom od 670 MW

Parametar	Jedinica	Vrednost
Nominalna produkcija pare	t/h	2000
Pritisak pare na izlasku iz kotla	bar	186,5
Temperatura pare	°C	540
Temperatura pregrejane pare	°C	540
Potrošnja uglja	t/h	970

Tablica 2. Parametri dimnog gasa na ulazu u rekonstruisano EF postrojenje

Parametar	Jedinica	Projektna vrednost	
		B1	B2
Bruto snaga bloka	MW	670	670
Zapreminski protok dimnog gasa (0 °C, 101,3 kPa, suv, 6% O ₂)	Nm ³ /h	3 700 000	3 500 000
Temperatura dimnog gasa na ulazu u EF	°C	170	170
Potpritisak u dimnom gasu na ulazu u EF	kP	-5,00	3,19
Sadržaj O ₂ u dimnom gasu	%	6,0	6,0
Sadržaj CO ₂ na ulazu u elektrofilter	%	12,5	12,5
Koncentracija praškastih materija na ulazu u EF (0 °C, 101,3 kPa, suv, 6% O ₂)	g/Nm ³	53	53

Tablica 3. Projektne, garancijske i prosečne karakteristike Kolubarskog lignita

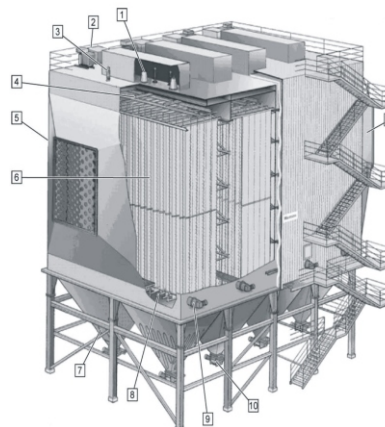
Parametar	Jedinica	Projektna vrednost ¹	Garancijska vrednost ²	Opseg tekućih vrednosti B1 ³	Opseg tekućih vrednosti B2 ⁴
Donja toplotna moć	kJ/kg	5860–7955	6700	4832–11796	5860–7300
Sadržaj pepela	%	10,0–23,5	20 2	4,5–33,9	22 3
Sadržaj sagorljivih	%	33,2	30		32 3
Sadržaj vlage	%	45–53	48	46,9–57,9	45–53
Sadržaj sumpora	%	0,5	0,52		0,52

¹ Vrednosti korišćene prilikom projektovanja kotlova blokova B1 i B2² Vrednosti za koje važi garancija³ Karakteristike uglja koji se doprema bloku B1⁴ Karakteristike uglja koji se doprema bloku B2

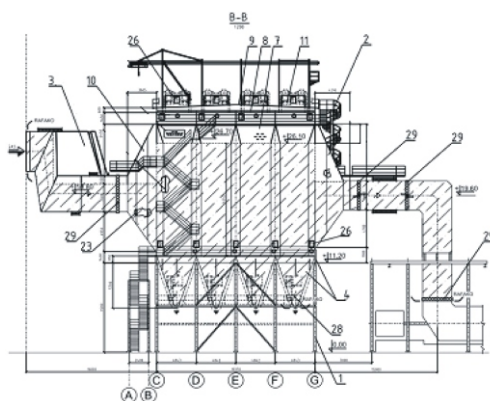
polja je povećana za oko 16%, a dužina za oko 19%. Širina gasnog prolaza je sa prvobitnih 300 mm povećana na 400 mm i 500 mm. Kako je efikasnost izdvajanja čestica letećeg pepela upravo srazmerna kvadratu napona na elektrodama, napon je povećan preko dva puta, a struja od 10% do 25% u zavisnosti od električnog polja. Instalirana snaga EF, uključujući i grejanje je povećana za 45%. Skica desnog EF bloka B1 nakon rekonstrukcije data je na sl. 1.

Slika 1. Prikaz EF bloka B1

- 1 – noseći izolatori,
- 2 – agregat visokog napona,
- 3 – pogon za otresanje emisijonih elektroda,
- 4 – noseći okvir za EF,
- 5 – difuzor,
- 6 – taložne i emisijone elektrode (pokriveno),
- 7 – levak za skupljanje prašine,
- 8 – otresać taložne elektrode,
- 9 – pogon za otresanje taložnih elektroda,
- 10 – uređaj za pražnjenje prašine,
- 11 – konfuzor



Rekonstruisani EF bloka B2 sadrže dve komore sa po 4 zone za mehaničko otprašivanje. Novo EF postrojenje je više i duže od starog, povećana su rastojanja između elektroda kao i same dužine elektroda. Rekonstruisano postrojenje ima 16 nezavisnih EF polja grupisanih u 4 paralelne sekcije (po dve u levom i desnom EF). Aktivna visina EF polja je povećana sa 13,75 m na 16 m, a dužina sa 13,44 m na 16 m. Širina gasnog prolaza je sa prvobitnih 300 mm povećana na 393 mm. Ispod EF je izveden novi pneumatski sistem za prihvatanje letećeg pepela kroz levak bunkera i njegov transport do novog silosa. Na levcima su ugrađeni ventili sa kontra tegovima čime je obezbeđeno zaptivanje. Šematski prikaz rekonstruisanog EF bloka B2 dat je na sl. 2.



Slika 2. Šematski prikaz rekonstruisanog EF bloka B2

- 1 – noseća struktura, 2 – platforme i stepeništa,
- 3 – ulazni kanal,
- 4 – komora deo I i levak, 7 – komora deo II,
- 8 – komora deo III, 9 – komora deo IV,
- 10 – difuzor, 11 – noseća struktura T/R jedinice,
- 23 – usmerivači u difuzoru,
- 26 – inspekcijski otvori,
- 28 – merenje, 29 – kompenzatori

Osnovne karakteristike rekonstruisanih EF na blokovima B1 i B2 termoelektrane „Nikola Tesla” prikazane su u tabl. 4.

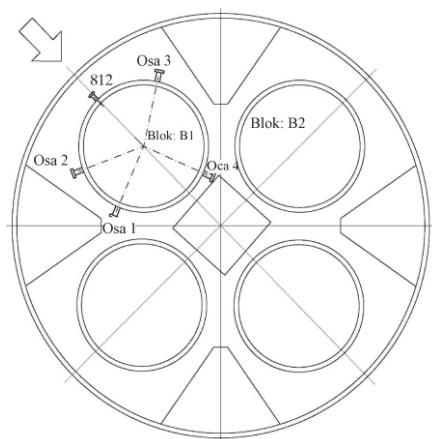
Merna mesta za određivanje koncentracije praškastih materija

Dve serije od po tri uzastopna merenja nivoa emisije praškastih materija bloka B1 obavljena su u dimnjaku na dimnoj cevi bloka B1, kota 55.6 m (sl. 3), u mernoj ravni kružnog preseka prečnika 8 m.

Prva serija merenja (test A) [6] obavljena je ubrzo nakon rekonstrukcije EF sa ciljem utvrđivanja ispunjenosti uslova garantovanih ugovorom, a druga serija (test B) [7] godinu dana nakon obavljene rekonstrukcije sa ciljem da potvrdi da su radni parametri rekonstruisanog EF ostali na potrebnom nivou i nakon isteka ugovorenog garancijskog perioda od godinu dana. Dobijeni rezultati prikazani su u tabl. 5.

Tablica 4. Osnovne karakteristike rekonstruisanih EF postrojenja blokova B1 i B2

Karakteristika	Jedinica	Vrednost	
		B1	B2
Broj mehanički razdvojenih polja		2	2
Broj električno razdvojenih polja		2	2
Efektivna visina polja	m	16,00	16,00
Efektivna dužina polja	m	4	4
Broj prolaza gasa		38	2
Rastojanje između gasnih prolaza	mm	400/500	393
Površina skupljanja	m ²	32768	2
Brzina prolaza dimnog gasa	m/s	1,68	1,62
Vreme tretiranja	s	9,58	

Slika 3. Poprečni presek dimnjaka
i položaj dimne cevi bloka TENT B1,
kota 55,6 m

karakteristika i ispunjavaju zahteve standarda ISO 9096.

Za merenje koncentracije praškastih materija u dimnom gasu iza EF bloka B2 korišćene su merne ravni koje nisu u potpunosti u skladu sa zahtevima standarda ISO 9096 i EN 15259 [8]. Iz svakog od EF bloka B2 dimni gasovi se sprovode kroz dva odvojena kanala, koji se pre ulaska u ventilator dimnih gasova spajaju u jedan zajednički vertikalni kanal. Na svakoj od vertikalnih deonica, (levog i desnog EF), na koti 11 m se nalaze merne ravni preseka 5,26 m m, sa po 6 mernih osa (sl. 5). Merne ravni se nalaze vrlo blizu iza krivine koju pravi kanal i stoga je u njima neravnomerno brzinsko i polje raspodele koncentracija praškastih materija. Garancijskim ispitivanjima nakon završene rekonstrukcije (Testa A), obavljenim decembra 2011. godine, je pokazano da su ovo ipak najbolje moguće merne ravni koje u velikoj meri ispunjavaju zahteve ISO 9096. Uzvodno od ovih mernih ravni ugrađeni su senzori kontinualnog merača koncentracije praškastih materija čije se merenje koristi u procesu kontrole i upravljanja radom EF. Izvršeno je ukupno tri serije merenja u okviru garancijskih ispitivanja test B, godinu dana nakon obavljene rekonstrukcije EF bloka B2. Dobijeni rezultati su dati u u tabl. 5.

Merna ravan sadrži 4 merne ose sa po 4 merne tačke po osi, koje su raspoređene po osama u skladu sa smernicama standarda ISO 9096 (sl. 4). Korišćena merna ravan se nalazi iznad merne ravni na koti 55,1 m u kojoj je postavljen senzor sistema za kontinualno merenje koncentracije praškastih materija u dimnom gasu. U prethodnom periodu je merna ravan na koti 55,6 m korišćena za kalibraciju sistema za kontinualno merenje, kao i za kalibraciju QAL2 prema smernicama standarda EN 14181.

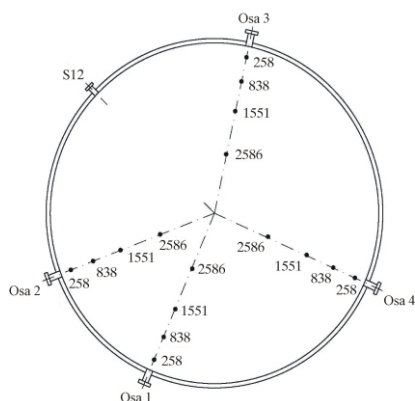
Merna ravan na koti 55,6 m se nalazi 4,14 hidrauličnih prečnika iza krivine koju čini kanal dimnog gasa pri ulasku u dimnu cev i više od 5 prečnika pre izlaza iz dimnjaka na koti 225 m, usled čega se u tom preseku ostvaruje dobro razvijeni turbulentni profil struje dimnog gasa ($Re \sim 9 \cdot 10^6$). Uspostavljeno brzinsko, temperaturno i polje koncentracija čestica su zadovoljavajućih

Tablica 5. Garancijske i vrednosti izmerene tokom ispitivanja rekonstruisanih EF na blokovima B1 i B2

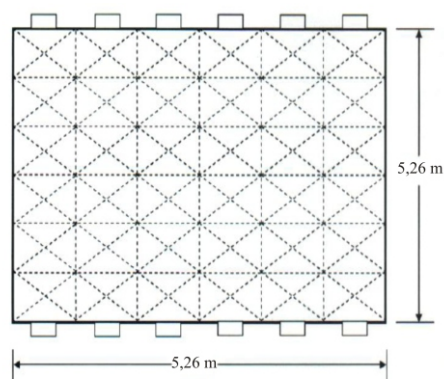
(1) bruto snaga bloka, (2) temperatura dimnog gasa na ulazu u EF, (3) potpritisak u dimnom gasu na ulasku u EF, (4) sadržaj O_2 u dimnom gasu, (5) sadržaj CO_2 u dimnom gasu, (6) sadržaj H_2O u dimnom gasu, (7) protok dimnog gasa (izmerena vrednost svedena za suvi gas na $0^\circ C$, $101325 Pa$, $O_2 = 6\%$), (8) koncentracija praškastih materija u dimnom gasu na izlasku iz EF ($0^\circ C$, $101325 Pa$, suvi, $O_2 = 6\%$), (9) proračunska vrednost koncentracije praškastih materija u dimnom gasu na ulazu u EF ($0^\circ C$, $101325 Pa$, suvi, $O_2 = 6\%$), i (10) Efikasnost EF ($0^\circ C$, $101325 Pa$, suvi, $O_2 = 6\%$)

Par.	Jedinica	Gar. vred.	Blok B1						Blok B2 (levi EF / desni EF)		
			Ispitivanje*								
			A1B1	A2B1	A3B1	B1B1	B2B1	B3B1	B1B2	B2B2	B3B2
(1)	MW	670	629	614	620	660	660	660	587	584	585
(2)	$^\circ C$	170	155,6	156,2	155,7	160,7	161,4	161,0	167/165	169/165	169/167
(3)	Pa	5000	2079	–	2106	2122	2142	2137	2706/2439	2688/2448	2720/2421
(4)	%	6,0	6,21	6,29	6,62	6,51	6,48	6,53	5,86/7,32	6,12/6,80	5,74/6,48
(5)	%	12,5	13,34	13,26	12,88	12,89	13,02	12,99	13,88/12,52	13,58/12,90	13,94 / 13,24
(6)	%	–	20,97	20,73	21,13	20,40	20,12	20,19	20,60/19,11	20,61/19,60	20,44/19,72
(7)	$10^3 Nm^3/h$	3500/ 3700	2624	2581	2607	2644	2649	2663	1368/1209	1344/1255	1365/1247
(8)	mg/Nm^3	<50	39,06	36,55	38,63	38,72	38,34	47,27	29,07	28,97	39,55
(9)	g/m^3	53	36,81	36,82	42,57	35,23	35,80	37,39	40,10	37,94	37,81
(10)	%	99,91	99,89	99,90	99,91	99,89	99,89	99,87	99,93	99,92	99,90

* Oznaka izvršenog ispitivanja: test (A ili B), redni broj merenja u seriji, blok na kojem je obavljeno merenje



Slika 4. Merna ravan za merenje emisije praškastih materija u dimnom gasu bloka TENT B1 sa mernim tačkama po osama, kota 55,6 m



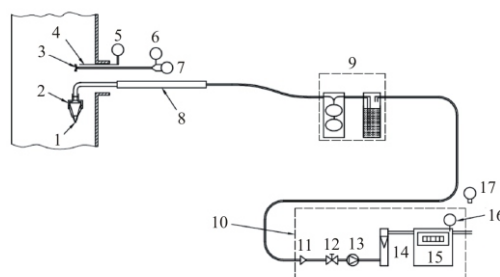
Slika 5. Merna ravan iza EF a ispred ventilatora dimnog gasa bloka TENT B2

Određivanje koncentracije praškastih materija

Gustina dimnog gasa u mernom preseku kanala gde se obavlja uzorkovanje proračunava se na osnovu izmerenih vrednosti statičkog pritiska, temperature i sastava dimnog gasa (zapreminski udeli vlage, kiseonika i ugljen dioksida) u mernom preseku. Zapreminski udeli O_2 i CO_2 mereni su u skladu sa smernicama standarda EN 14789:2005 i ISO 12039:2001, respektivno. Zapreminski udeo vlage u dimnom gasu određen je u skladu sa smernicama standarda SRPS EN 14790,

Slika 6. Šematski prikaz automatskog "in-stack" sistema za uzorkovanje praškastih materija

(1) vrh sonde, (2) nosač filtera, (3) Pito sonda, (4) temperaturna sonda, (5) merilo temperature, (6) merilo statičkog pritiska, (7) merilo diferencijalnog pritiska, (8) telo sonde, (9) sistem za hlađenje i sušenje, (10) uređaj za usisavanje i merenje protoka dimnog gasa, (11) nepovratni ventil, (12) ventil za podešavanje, (13) pumpa, (14) rotametar, (15) protokomer, (16) merenje temperature, (17) barometar



kondenzacijom i adsorpcijom u silikagelu i zatim je gravimetrijski određena masa H_2O . Korišćena oprema i primenjena procedura uzorkovanja praškastih materija iz dimnog gasa u skladu su sa zahtevima standarda ISO 9096. Šematski prikaz „in-stack” sistema korišćenog za uzorkovanje praškastih materija iz dimnog gasa dat je na sl. 6.

Ukupni protok dimnog gasa kroz kanal proračunat je na osnovu merenja brzinskog polja u mernoj ravni korišćenjem standardnih Pito-Prandtl-ovih sonde i mikromanometara za merenje statičkog i dinamičkog pritiska u mernim tačkama, u skladu sa zahtevima standarda SRPS ISO 10780. Za merenje temperature dimnog gasa u mernom preseku kanala korišćene su termoparske sonde tip K.

Filteri za prikupljanje praškastih materija pripremljeni su držanjem u peći na temperaturi od $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ duže od 1 sat, a nakon toga hlađenjem najmanje 8 sati u deksikatoru na kontrolisanoj sobnoj temperaturi. Merenje težine filtera obavljeno je na elektronskoj vagi rezolucije 0.1 mg u prostoriji sa održanim ambijentalnim uslovima.

U okviru ispitivanja je izvršen veći broj aktivnosti sa ciljem obezbeđenja kvaliteta u skladu sa uputstvima ISO 9096 i SRPS ISO/IEC 17025 standarda. Merena je vrednost barometarskog pritiska i temperature okoline tokom postupka merenja filtera pre i posle uzorkovanja i uziman je u obzir uticaj registrovanih promena. Tokom uzorkovanja je vršena provera uslova izokinetizma. Naslage pepela na delovima ispred filtera su izdvajane ispiranjem i merena je njihova težina. Provera zaptivnosti linije za uzorkovanje obavljena je pre i nakon završetka svakog ispitivanja. Nakon ispitivanja obavljena je „slepa proba”, a masa uzetog uzorka je iskorišćena za ocenu nesigurnosti uzorkovanja. Uslovi rada EF postrojenja i bloka u celini su praćeni i beleženi tokom trajanja ispitivanja [6–8].

Rezultati merenja emisije praškastih materija i rezultati proračuna

Da bi se verifikovalo da su ostvareni ugovorima predviđeni parametri rada rekonstruisanih EF postrojenja blokova B1 i B2, bilo je potrebno izvršiti kompleksna garancijska ispitivanja EF postrojenja. U skladu sa usvojenim programima, ova garancijska ispitivanja je obavila Laboratorija za termotehniku i energetiku Instituta za nuklearne nauke „Vinča”. Izvršeno je ukupno 9 merenja, od toga 6 na bloku B1 i 3 na EF bloka B2, a dobijeni rezultati su prikazani u tabl. 5.

Za preračunavanje merenih vrednosti na garantovane uslove (definisane za suvi dimni gas na temperaturi od 273 K , pritisku od 101325 Pa i pri sadržaju kiseonika od 6%), korišćene su korektivne krive koje je propisao proizvođač. Osnovne karakteristike uzoraka uglja korišćenog tokom ispitivanja određene su laboratorijskim analizama u akreditovanoj ispitnoj laboratoriji Instituta „Vinča” i prikazane u tabl. 6.

Tablica 6. Osnovne karakteristike uglja korišćenog tokom obavljenih ispitivanja, utvrđene laboratorijskim analizama u akreditovanoj ispitnoj laboratoriji Instituta „Vinča”

Parametar	Jed.	Blok B1						Blok B2		
		A1B1	A2B1	A3B1	B1B1	B2B1	B3B1	B1B2	B2B2	B3B2
Donja toplotna moć	kJ/kg	7239	7239	7206	7861			7490	7493	7560
Sadržaj pepela	%	14,01	14,01	15,68	13,86			15,93	15,29	15,41
Sadržaj vlage	%	50,99	50,99	50,21	49,94			49,05	49,12	48,66
Sadržaj sumpora	%	0,45	0,45	0,51	0,35			0,43	0,50	0,51

U toku trajanja ispitivanja, blokovi TENT B1 i B2 su radili regularno, prema operacionim instrukcijama važećim za period nakon rekonstrukcije EF postrojenja. U toku svakog od ispitivanja blokovi su radili pri snagama koje su niže od garantovanih 670 MW, u slučaju bloka B2 čak i 13% niže. Merenjima je utvrđeno (tabl. 5) da su vrednosti temperature bile do 8% ispod projektne vrednosti 170 °C, dok su izmerene vrednosti protoka dimnog gasa bile u proseku oko 25% niže od garantovanih $3,5 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$ za blok B1 i $3,7 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$ za blok B2.

Rezultati laboratorijskih analiza uzoraka uglja korišćenog tokom svakog od obavljenih ispitivanja (tabl. 6) potvrđuju da je donja toplotna moć uzoraka bila značajno viša, a sadržaj pepela niži od garantovanih vrednosti datih u tabl. 3. Najnižu vrednost donje toplotne moći imao je ugalj korišćen tokom testa A na bloku B1 (oko 7200 kJ/kg), a najvišu ugalj korišćen tokom merenja obavljenih u okviru testa B na bloku B1 (oko 7800 kJ/kg). Sadržaji vlage i sumpora u uzorcima bili su bliski garancijskim vrednostima.

Prilikom svakog merenja je proračunska vrednost koncentracije praškastih materija u dimnom gasu na ulazu u EF bila niža od garantovane vrednosti od 53 g/Nm^3 , svedeno na garantne uslove suvog dimnog gasa na 0 °C, 101325 Pa, $\text{O}_2 = 6\%$. U slučaju testa A3B1 vrednost ulazne koncentracije je bila oko 20%, a u slučaju testa B1B1 oko 34% niža od vrednosti garantovane koncentracije na ulazu u EF.

Merenjima obavljenim nakon rekonstrukcije EF postrojenja blokova B1 i B2 termoelektrane „Nikola Tesla” utvrđene su vrednosti emisije praškastih materija u opsegu od 29 do 47 mg/m^3 . Dobijene vrednosti su manje od Direktivom propisane granične vrednosti od 50 mg/m^3 , čime je potvrđena opravdanost sprovedenih rekonstrukcija i modernizacija ispitivanih EF postrojenja.

Na osnovu izmerenih vrednosti protoka dimnog gasa i koncentracija praškastih materija na ulazu i izlazu iz rekonstruisanih EF, dobijene su vrednosti za efikasnost EF svedeno na garantne uslove, koje su se kretale od 99,84% do 99,96% (tabl. 5) i malo su veće za EF bloka B2 u odnosu na EF bloka B1. Primećujemo da je i nakon isteka perioda od godinu dana vrednost efikasnosti EF bloka B1 ostala skoro nepromenjena (umanjenje od oko 0,01%), što dodatno potvrđuje kvalitet obavljene rekonstrukcije ovog EF.

Zaključak

Smanjenje emisije štetnih i opasnih materija u vazduh je jedan od prioriteta Elektroprivrede Srbije u narednom periodu. Stoga se značajna sredstva ulažu u rekonstrukciju i modernizaciju EF postrojenja svih termoblokova u sastavu EPS-a.

U ovom radu su prikazani rezultati merenja i proračuna emisije praškastih materija u dimnom gasu, koja su u okviru garancijskih ispitivanja rekonstruisanih i modernizovanih EF postrojenja blokova B1 i B2 TE „Nikola Tesla” izvršili saradnici Laboratorije za termotehniku i

energetiku Instituta „Vinča”. Merenja su obavljena u skladu sa zahtevima međunarodnih standarda ISO 9096 i EN 13284-1.

Periodičnim merenjima obavljenim u prethodnom periodu utvrđeno je da su vrednosti emisije praškastih materija na blokovima TENT B1 i B2 bile iznad Direktivom propisanih 50 mg/m³. Prilikom ispitivanja bloka B1 pre njegove rekonstrukcije, obavljenog tokom 2011. godine, izmerena je koncentracija od 147,4 mg/Nm³. Poslednje ispitivanje na bloku B2 pre rekonstrukcije je izvršeno tokom 2008. godine i tom prilikom je izmerena koncentracija od 156 mg/Nm³, što je u oba slučaja skoro tri puta više od Direktivom propisane granice.

Nakon obavljenih rekonstrukcija i modernizacija EF postrojenja blokova B1 i B2 bilo je neophodno verifikovati da su Ugovorima predviđeni parametri rada rekonstruisanih EF postrojenja i ostvareni. U sklopu ovih garancijskih ispitivanja izvršeno je ukupno 9 merenja, od toga 6 na bloku B1 i 3 na bloku B2, pri čemu su tri serije merenja na bloku B1 obavljene odmah nakon rekonstrukcije, a ostale tri serije merenja nakon isteka garancijskog perioda od godinu dana.

Na osnovu izvršenih merenja, obrađenih rezultata i izvršenih hemijskih analiza uzoraka korišćenog lignita Kolubarskog basena, može se zaključiti da su rekonstruisana EF postrojenja ispunila garancijske uslove po pitanju vrednosti koncentracija praškastih materija na izlazu iz elektrofilterskog postrojenja. Takođe, merenjima je potvrđeno da rekonstruisana elektrofilterska postrojenja zadržavaju potrebne karakteristike i nakon isteka perioda od jedne godine od završetka rekonstrukcije.

Zahvalnost

Posebnu zahvalnost autori upućuju JP „Elektroprivreda Srbije” i Ministarstvu obrazovanja i nauke za finansijsku podršku u izradi ovog rada kroz projekte broj III42010 i TR33050.

Literatura

- [1] Гаврић, М., Влајић, А., Чеперковић, Б., Зелена књига Електропривреде Србије, ЈП Електропривреда Србије, Сектор за односе с јавношћу, Београд, 2009, <https://njinj.eps.rs/SiteCollectionDocuments/Zelena%20knjiga.pdf>
- [2] ***, Директива 2001/80/ЕЗ Европског Парламента и Савета од 23. октобра 2001. о ограничавању емисије одређених загађивача у ваздух од стране великих термо-постројења <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/consleg/2001/L/02001L0080-20011127-en.pdf>
- [3] Erić, M., Stefanović, P., Kisić, D., Reduction Verification of the Particulate Matter Emission after Electrostatic Precipitators Reconstruction at Units A1, A2 and A4 of the TPP Nikola Tesla, *Termotehnika*, 36 (2010), 1, 173-180
- [4] Erić, M., *et al.*, Reduction of Particulate Matter Emission of the Upgraded Electrostatic Precipitators at Unit B2 of the TPP “Nikola Tesla”, 16th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Sokobanja, Serbia, October 22-25, 2013, 750-757, ISBN 978-86-6055-043-1
- [5] Erić, M., *et al.*, Reduction of Particulate Matter Emission of the Upgraded Electrostatic Precipitators at Unit B1 of the TPP “Nikola Tesla”, Full Papers Proceeding of International Conference „Ponjer Plants 2014”, 28-31.October 2014, Zlatibor, Serbia, ISBN 978-86-7877-024-1, 608-618
- [6] Stefanović, P., *et al.*, Particulate Emission Guarantee Test A of the Upgraded ESP at Unit B1 of TPP „Nikola Tesla B”, Report NIV LTE 529 Report Version 1.0, Vinča Institute of Nuclear Sciences, March 2013, Vinča, Belgrade
- [7] Stefanović, P., *et al.*, Particulate Emission Guarantee Test B of the Upgraded ESP at Unit B1 of TPP „Nikola Tesla B”, Report NIV LTE 548 Report Version 2.0, Vinča Institute of Nuclear Sciences, March 2014, Vinča, Belgrade
- [8] Stefanović, P., *et al.*, Particulate Matter Emission Guarantee Test B of the Upgraded ESP at Unit B2 of TPP Nikola Tesla, Report NIV LTE 524, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Vinča, Belgrade, 2013

Abstract

Reduction of Particulate Matter Emission from Electrostatic Precipitators of TPP “Nikola Tesla B” after Reconstruction and Modernisation

by

Milić ERIĆ, Predrag STEFANOVIĆ, Zoran MARKOVIĆ,
Predrag ŠKOBALJ, Dejan CVETINOVIĆ, Rastko JOVANOVIĆ,
and Ivan LAZOVIĆ*

**Laboratory for Thermal Engineering and Energy,
Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia**

The requirements of the international document Directive 2001/80/EC relating to limitation of the particulate matter emissions from large thermal power plants have been incorporated into relevant regulations of domestic legislation. In accordance with the commitments, since 2005 it was started with reconstruction and modernization of electrostatic precipitator system of all thermal units within the Electric Power Industry of Serbia.

The reconstruction and modernization of electrostatic precipitator system of the unit B2 of thermal power plant “Nikola Tesla B” was done during 2011, while the reconstruction of the electrostatic precipitator system of the unit B1 was conducted in 2012 year. One of the main objectives of performed reconstructions and modernizations, financed by donations of the European Union, was to decrease the emission of particulate matter in the flue gas from these units down to level below 50 mg/Nm^3 , in normal conditions and under guaranteed operating conditions of the boiler and electrostatic precipitator system.

This paper presents results of the measurements of particulate matter concentration performed in accordance with standards ISO 9096 and EN 13284-1, immediately after the reconstruction and shortly before the end of the period of about 1 year after the reconstruction, as a part of control and guarantee investigations of the reconstructed electrostatic precipitators of Thermal Power Plant Nikola Tesla B units. In addition, this paper presents results of laboratory analysis of the coal samples taken during test, working parameters of the unit and upgraded electrostatic precipitator system during the tests as well as results of the calculations. The results of the measurements confirm that particulate matter concentration in the flue gas from reconstructed electrostatic precipitators fall down below guaranteed values, thus confirming the effectiveness of the reconstructive operations.

Key words: electrostatic precipitator, emission, particulate matter, reconstruction

* Corresponding author; e-mail: zoda_mark@vinca.rs

Rad primljen:
Rad revidiran:
Rad prihvaćen: