

**Zoran Marković*, Milić Erić, Dejan Cvetinović,
Predrag Stefanović, Vuk Spasojević, Predrag Škobalj**

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

Proračun specifične emisije ugljen dioksida iz termoelektrana Nikola Tesla A i B

Stručni rad

Niskokalorični lignit površinskih kopova Kolubarskog bazena se u najvećoj mjeri koristi za proizvodnju toplotne i električne energije sagorevanjem u termoblokovima PD „Termoelektrane Nikola Tesla”.

Prema međunarodno prihvaćenoj metodologiji, ukupna količina CO₂ koja se emituje sagorevanjem fosilnog goriva dobija se kao proizvod količine sagorelog goriva i preporučениh vrednosti za donju toplotnu moć goriva, emisionog faktora ugljenika za to gorivo i procenta oskidacije ugljenika pri sagorevanju posmatranog goriva. Ovim pristupom nije moguće na odgovarajući način uzeti u obzir realne uticaje termičke efikasnosti kotla i karakteristike procesa sagorevanja, koji su, pored karakteristika korišćenog goriva, najznačajniji faktori koji utiču na količinu emitovanog CO₂.

U radu su prikazani rezultati proračuna specifične emisije CO₂ korišćenjem tri različita pristupa: (a) primenom eksperimentalno utvrđene linearne korelacije za proračun emisionog faktora ugljenika rovnog Kolubarskog lignita, (b) na osnovu izmerenog nivoa sadržaja CO₂ u dimnom gasu na 6 različitim termoblokovima Termoelektrana „Nikola Tesla” A i B i (c) na osnovu masenog bilansa laboratorijski određenog sadržaja ugljenika u uglju, letećem pepelu i šljaci.

Poređenjem dobijenih rezultata zaključujemo da se najbolja rešenja proračuna dobijaju primenom eksperimentalno utvrđene linearne korelacije za proračun emisionog faktora ugljenika rovnog Kolubarskog lignita, dok proračun specifične emisije CO₂ zasnovan na izmerenom protoku i udelu CO₂ u dimnom gasu daje veće, a proračun zasnovan na masenom bilansu ugljenika manje vrednosti za specifičnu emisiju. Veće vrednosti specifične emisije CO₂ kao i značajnije rasipanje rezultata dobijeno je pri ispitivanju blokova manjih snaga (blokovi A1 i A2 pri ostvarenim snagama od oko 200 MW) nego pri ispitivanju blokova čija je ostvarena snaga tokom ispitivanja bila preko 300 MW (blokovi A4 i A6) ili preko 600 MW (blokovi B1 i B2).

Ključne reči: kolubarski lignit, „TENT”, emisioni faktor ugljenika, IPCC Tier 1 metodologija

Uvod

Kao zemlja u razvoju, Srbija ima obavezu periodičnog pripremanja inventara emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG) prema međunarodno prihvaćenoj IPCC metodologiji i izveštavanja nadležnih tela Ujedinjenih nacija o klimatskim promenama (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC) [1].

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

Detaljni program mera za smanjenje emisije CO₂ iz podsektora proizvodnje toplotne i električne energije usklađen je sa osnovnim ciljevima Strategije razvoja energetskog sektora u narednom periodu [2] kojom su definisani stepen i način revitalizacije postojećih termoenergetskih kapaciteta u skladu sa Direktivom o velikim ložištima 2001/80/EZ [3]. Procenjuje se da će primena ove Direktive zahtevati ulaganja od oko 635 miliona evra u modernizaciju i revitalizaciju termoenergetskih blokova snage preko 300 MW (blokovi TENT A3, A4, A5, A6, 1 i B2, Kostolac TEKO B1 i B2), ukupne instalisane snage od 3.160 MW i prosečne godišnje proizvodnje od oko 19.000 GWh. Termoenergetski blokovi TENT A1, A2, Kostolac A1 i A2, Morava, Kolubara i Panonske elektrane prosečne starosti 45 godina i energetske efikasnosti ispod 30% su predviđeni za sukcesivno povlačenje iz pogona tokom perioda 2018–2024. godine. Prosečna godišnja proizvodnja ovih blokova je oko 6.000 GWh, tako da se za obezbeđenje sigurnog snabdevanja svih potrošača u zemlji planira uvođenje u pogon nove proizvodne jedinice, energetske efikasnosti od preko 40% [2]. Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine predviđa i promene u strukturi proizvodnje električne energije zasnovane na očekivanom povećanju udela prirodnog gasa i obnovljivih izvora energije kao i očekivanom smanjenju gubitaka u prenosnoj i distributivnoj mreži. Sprovođenje navedenih aktivnosti treba da dovede do značajno nižih specifičnih emisija GHG iz podsektora proizvodnje toplotne i električne energije.

U cilju daljeg povećanja energetske efikasnosti, smanjenja nivoa emisije zagađujućih materija iz termoblokova koji rade u sistemu PD Elektroprivreda Srbije (EPS), prevazilaženja problema promenljivosti i u narednom periodu očekivanog pada kvaliteta lignita koji se sagoreva u termoblokovima EPS-a, predloženo je uvođenje novih tehnologija predsušenja [4] i homogenizacije lignita koji će se dostavljati termoblokovima EPS-a u budućnosti. Da bi formirali odgovarajući model projekcije emisije gasova staklene bašte iz podsektora proizvodnje toplotne i električne energije u narednom periodu, koji omogućava procenu mogućnosti za ograničenje ili smanjenje emisije iz podsektora, neophodno je sprovesti detaljnu analizu emisije GHG u prethodnom periodu, pravilno predvideti promenu ukupne emisije kao posledicu odgovarajućih tehnoloških i socio-ekonomskih trendova u posmatranom periodu [5, 6] i uskladiti ga sa nacionalnom legislativom i odgovarajućim međunarodnim dokumentima [7]. Da bi ove zadatke bilo moguće uspešno izvršiti, potrebno je proceniti stvarnu godišnju emisiju gasova staklene bašte iz podsektora proizvodnje toplotne i električne energije. Pošto je CO₂ najznačajniji gas staklene bašte koji se oslobađa sagorevanjem fosilnih goriva, kao ključni zadatak se postavlja određivanje emisije CO₂ iz posmatranog podsektora.

Prema Prvoj Nacionalnoj Komunikaciji podnetoj UNFCCC [8], na godišnjem nivou se u Srbiji iz podsektora proizvodnje toplotne i električne energije (IPCC Source Category 1.A.1.a) emituje više od 40% od ukupne količine emitovanih gasova staklene bašte i skoro 60% od ukupne količine emitovanog CO₂. Niskokalorični lignit sa površinskih kopova je osnovni energetski izvor u Srbiji, sa udelom od skoro 50% u ukupnoj potrošnji primarne energije i preko 70% u potrošnji za proizvodnju električne energije. Lignit Kolubarskog basena se prvenstveno koristi kao gorivo za proizvodnju toplotne i električne energije (oko 90% ukupne godišnje proizvodnje). Za njega je karakteristično da ima nizak stadijum karbonizacije (stadijum mekog mrkog uglja) i da su proslojci uglja neravnomerno raspoređeni po Kolubarskom basenu. U termoelektranama „Nikola Tesla” (TENT) se sagoreva lignit Kolubarskog basena. Usled kompleksnog geološkog profila Kolubarskog basena [9] i njegove intenzivne eksploatacije u prethodnim decenijama, kvalitet lignita koji se doprema blokovima TENT veoma osciluje, što zahteva primenu selektivnog iskopavanja i homogenizaciju. Instalisan snaga blokova koji koriste Kolubarski rovni lignit se kreće do 600 MW, sa ukupnom instalisanom snagom tih 10 blokova od preko 3000 MW_e i godišnjom bruto proizvodnjom od 21 milion MWh. Ovi blokovi su u pogonu više od 25 godina,

neki od njih i preko 40. Od kraja 2000-te do danas na ovim blokovima su pokrenute značajne rekonstruktivne aktivnosti u cilju poboljšanja njihovih pogonskih karakteristika, podizanja efikasnosti i smanjenja emisije zagađujućih materija u okolinu.

Prema međunarodno priznatoj metodologiji [10], godišnja emisija CO₂ usled sagorevanja fosilnog goriva se u aproksimaciji prvog reda (Tier 1 metod) dobija kao proizvod količine utrošenog goriva, preporučene vrednosti za donju toplotnu moć goriva i preporučenih vrednosti za emisioni faktor i faktora oksidacije ugljenika (ili preporučene vrednosti emisionog faktora CO₂ posmatranog goriva). Na osnovu laboratorijskih analiza 30 reprezentativnih uzoraka Kolubarskog rovnog lignita donje toplotne moći iz opsega H_d^r 6–10 MJ/kg dobijena je linearna korelacija [11] između emisionog faktora ugljenika EF_C^r , izraženog kao masa ugljenika po jedinici energetske potencijala goriva, i donje toplotne moći sagorevanog rovnog lignita H_d^r :

$$EF_C^r = 34,407 - 0,5891 H_d^r \quad (1)$$

U posmatranom opsegu vrednosti H_d^r emisioni faktor ugljenika za Kolubarski lignit dostiže značajno veće vrednosti od IPCC Tier 1 metodologijom [10] preporučenih 27,6 tC/TJ za lignit. Različiti blokovi imaju različite termičke efikasnosti kotla kao i različite termičke efikasnosti celog ciklusa te će dva bloka različitih kapaciteta, loženi lignitom istog kvaliteta, emitovati različite količine CO₂ po jedinici proizvedene električne energije. U trenutku pisanja ovog rada nisu bili svi termoblokovi koji se nalaze u sastavu TENT-a opremljeni sistemima za kontinualno praćenje emisije CO₂. Od ispitivanih blokova, blokovi A6, B1 i B2 su bili opremljeni, a ostali blokovi nisu bili opremljeni sistemom za kontinualno praćenje emisije CO₂. Stoga je između ostalog bilo neophodno sprovesti periodična merenja emisije i prikupljanja podataka potrebnih za pouzdanu procenu nivoa ukupne emisije CO₂ iz ispitivanih termoblokova [12].

U ovom radu su prikazani rezultati 20 merenja emisije CO₂ obavljenih na blokovima A1, A2, A4 i A6 termoelektrane TENT A tokom 2011-te godine i 8 merenja obavljenih tokom 2013-te godine na blokovima B1 i B2 termoelektrane TENT B. Merenja emisije CO₂ su obavljena u sklopu kompleksnih ispitivanja emisije praškastih materija iz posmatranih blokova [13–21]. Merenja sadržaja CO₂ u dimnom gasu su izvršena na kanalima dimnog gasa na izlazu iz elektrofilterskog postrojenja ispitivanog bloka, u skladu sa zahtevima standarda ISO 12039. Bruto snaga blokova tokom ispitivanja kretala se u opsegu 185–652 MW. Tehničke i elementarne analize uzoraka sagorevanog Kolubarskog lignita i tehničke analize uzoraka šljake i letećeg pepela uzetih tokom ispitivanja obavljene su u akreditovanoj ispitnoj laboratoriji Instituta za nuklearne nauke „Vinča”, Laboratorije za termotehniku i energetiku. Laboratorijske analize uzoraka rovnog lignita pokazale su da je kvalitet dostavljanog uglja varirao i da se donja toplotna moć uzoraka kretala u opsegu 6–9 MJ/kg (tab. 1) te je bilo moguće primeniti jedn. (1) za proračun emisionog faktora ugljenika EF_C^r rovnog lignita.

Rezultati dobijeni merenjem na postrojenju i na osnovu laboratorijskih analiza uzetih uzoraka, su obrađeni i prikazani kao vrednosti specifične emisije CO₂ tj. kao količina emitovanog CO₂ po jedinici bruto proizvedene električne energije. Vrednost specifične emisije CO₂ je proračunavana na tri različita načina:

- korišćenjem linearne korelacije (1) za određivanje emisionog faktora ugljenika EF_C^r sagorevanog lignita,
- na osnovu merenog nivoa sadržaja O₂, CO₂ i H₂O u dimnom gasu, rezultata merenja temperature, statičkog pritiska i brzine dimnog gasa, te proračunavanjem protoka dimnog gasa na osnovu merenih veličina i poznate geometrije kanala i

Tablica 1. Karakteristike Kolubarskog lignita sagorevanog u termoenergetskim blokovima tokom merenja emisije CO₂ i proračunske vrednosti specifične emisije SE_{CO2}

Radni režim	P_{el}^b	B	H_d^r	K_{br}	C_l^r	OF^m	$SE_{CO_2}^{ex}$	$SE_{CO_2}^{KL}$	$SE_{CO_2}^{IPCC}$
	[MW]	[th ⁻¹]	[kJkg ⁻¹]	[kJ(kWh) ⁻¹]	[%]	[%]	[kgCO ₂ (kWh _{el}) ⁻¹]		
A2-1	185	300	6933	11243	20,96	98,35	1,338	1,226	1,225
A2-2	186	295	7091	11246	21,49	98,37	1,314	1,229	1,222
A1-1	194	306	7119	11229	20,03	94,72	1,213	1,207	1,219
A1-2	195	297	7379	11239	21,79	92,42	1,216	1,125	1,214
A1-3	195	277	7958	11304	22,94	94,97	1,247	1,135	1,207
A1-4	195	297	7372	11228	21,71	97,08	1,204	1,177	1,213
A1-5	196	297	8347	12648	23,96	96,54	1,340	1,285	1,340
A1-6	196	297	8152	12353	23,72	96,64	1,338	1,274	1,314
A2-3	196	285	7733	11244	22,96	98,39	1,238	1,204	1,206
A4-1	289	405	7278	10199	20,45	96,66	1,090	1,016	1,104
A4-2	298	349	8772	10273	25,76	97,47	1,096	1,078	1,079
A4-3	299	378	8073	10206	24,26	98,37	1,103	1,106	1,087
A6-1	327	511	6202	9692	18,37	94,93	1,060	0,999	1,071
A6-2	329	417	7658	9706	23,05	98,23	1,035	1,052	1,043
A6-3	330	418	7672	9718	23,49	97,26	1,076	1,061	1,044
A6-4	334	489	6632	9710	20,40	96,91	1,057	1,061	1,064
A6-5	344	447	7557	9820	23,11	98,60	1,048	1,086	1,057
A6-6	346	453	7496	9814	22,91	98,35	1,043	1,082	1,058
A6-7	347	442	7701	9809	23,45	95,55	1,066	1,046	1,053
A6-8	348	452	7560	9819	23,05	98,61	1,042	1,082	1,057
V2-2	584	768	7493	9854	23,77	98,63	1,194	1,131	1,062
V2-3	585	763	7560	9860	24,00	98,87	1,200	1,135	1,061
V2-1	587	772	7490	9851	23,39	98,02	1,184	1,106	1,062
V1-4	614	814	7239	9597	23,35	98,52	1,124	1,118	1,039
V1-2	620	807	7344	9559	23,07	98,80	1,119	1,088	1,033
V1-5	620	822	7206	9554	22,79	98,31	1,082	1,089	1,035
V1-3	629	830	7239	9552	23,35	98,52	1,120	1,113	1,035
V1-1	652	909	6854	9556	20,58	98,69	1,087	1,038	1,043

– na osnovu masenog bilansa ugljenika korišćenjem rezultata laboratorijskih vrednosti sadržaja ugljenika u uzorcima rovnog lignita, šljake i letećeg pepela.

U ovom radu su prikazani rezultati proračuna specifične emisije CO₂ za svaki od ispitivanih termoblokova.

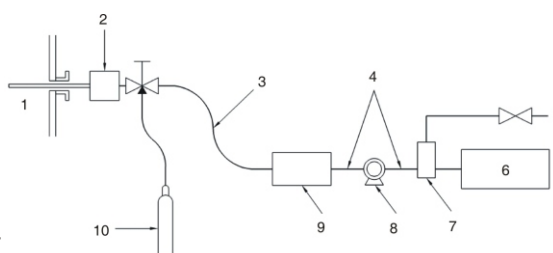
Merenje emisije CO₂

U sastavu termoelektrane „Nikola Tesla A” nalazi se 6 blokova: A1 i A2 sa instalisanom snagom od po 210 MW, A3 snage 305 MW, A4 i A5 snage 308 MW i A6 snage 350 MW. Blokovi A1 i A2 su u pogonu od 1970, dok su blokovi A4 i A6 pušteni u pogon 1978–1979. U sastavu termoelektrane „Nikola Tesla B” nalaze se blokovi B1 (uveden u pogon 1983 godine) i B2 (uveden u pogon 1985 godine), svaki nominalne snage 620 MW i povećane snage do 670 MW nakon serije rekonstrukcija i nadogradnji.

Merenja nivoa emisije CO₂ su obavljena na kanalima dimnog gasa ispitivanih blokova iza elektrofiltera (iza ventilatora dimnog gasa, pre ulaza u dimnjak). Automatskim mernim sistemom obavljeno je kontinualno uzorkovanje dimnog gasa i merenje zapreminskog udela CO₂ u izdvojenom uzorku u skladu sa zahtevima standarda ISO 12039. Korišćeni automatski analizator gasa radi na principu određivanja pada intenziteta infracrvenog zračenja propuštenog kroz ćeliju u kojoj se nalazi uzorak dimnog gasa i kalibriše se sertifikovanim test gasom pre početka merenja, a tačnost merenja se proverava test gasom pre i posle svake serije merenja. Šematski prikaz automatskog mernog sistema za merenje zapreminskog udela CO₂ prikazan je na sl. 1.

Slika 1. Šematski prikaz automatskog sistema za uzorkovanje i merenje emisije CO₂

- (1) – kanal dimnog gasa,
- (2) – grejani filter,
- (3) – grejana linija za uzorkovanje,
- (4) – linija za prenos uzorka dimnog gasa,
- (5) – bajpas, (6) – automatski analizator gasa,
- (7) – račva i fini filter, (8) – pumpa,
- (9) – sistem za brzo izdvajanje vlage iz uzorka,
- (10) – kalibracioni gas



Gustina dimnog gasa u mernom preseku kanala gde se obavlja uzorkovanje proračunava se na osnovu vrednosti merenog statičkog pritiska, temperature i sastava dimnog gasa (zapreminski udeli N₂, O₂, CO₂) u mernom preseku. Zapreminski udeo vlage u dimnom gasu je određivan u skladu sa smernicama standarda SRPS EN 14790. Za određivanje brzinskog polja dimnog gasa, potrebnog za određivanje ukupnog protoka dimnog gasa kroz kanal, korišćene su standardne Pito-Prantlove sonde i mikromanometri za merenje statičkog i dinamičkog pritiska u mernim tačkama, u skladu sa zahtevima standarda SRPS ISO 10780, a za merenje temperature dimnog gasa u strujnom preseku kanala korišćene su termoparske sonde tip K.

Zahteve navedenog standarda po pitanju položaja mernih ravni u kojima je određivano brzinsko polje dimnog gasa u kanalu (neophodna dužina prave deonice kanala ispred i iza merne ravni) u najvećem broju slučajeva nije bilo moguće u potpunosti ispuniti. Detaljan opis geometrije kanala dimnog gasa, pozicije i geometrije mernih ravni, položaja mernih tačaka u mernim ravnima, metodologije merenja kao i kompletan set rezultata izvršenih merenja i obavljenih laboratorijskih analiza dati su u [13–21].

Rezultati merenja emisije CO₂ i rezultati proračuna

Prema standardnoj IPCC metodologiji [10], emisijski faktor ugljenika nekog fosilnog goriva EF_C određuje se kao odnos masenog udela ugljenika u gorivu (kg C/kg goriva izraženo u %) i donje

toplotne moći goriva H_d . Ako sa X_C obeležimo maseni udeo ugljenika, sa m masu, a sa H_d donju toplotnu moć fosilnog goriva, za emisijski faktor ugljenika goriva dobijamo $EF_C = mX_C/mH_d = X_C/H_d$, tako da za rovni lignit sa sadržajem ugljenika C^r ova jednačina dobija oblik:

$$EF_C = \frac{10 C^r}{H_d^r} \quad (2)$$

U ovom slučaju se EF_C dobija u jedinici mase ugljenika po jedinici energije [tC/TJ]. U prethodnoj studiji [11] je na osnovu eksperimentalnih rezultata određivanja sadržaja ugljenika u reprezentativnim uzorcima Kolubarskog rovnog lignita i donje toplotne moći analiziranih uzoraka, utvrđena linearna zavisnost masenog udela ugljenika C^r [%] i donje toplotne moći H_d^r reprezentativnih uzoraka u obliku:

$$C^r = 2,3718 H_d^r - 4,2637 \quad (3)$$

Korišćenjem jedn. (3) dobija se linearna zavisnost (1) kao emisijski faktor ugljenika za uzorke Kolubarskog lignita sa donjom toplotnom moći $H_d^r = 6-10$ MJ/kg.

Prema standardnoj IPCC Tier 1 metodologiji [10], emisija CO_2 se može odrediti kao proizvod količine sagorelog fosilnog goriva, donje toplotne moći goriva H_d^r , emisijskog faktora ugljenika EF_C , stepena oksidacije ugljenika OF [-] i faktora konverzije ugljenika u CO_2 . Referentne vrednosti lignita za Tier 1 nivo prema [12] su $H_d^r = 11,9$ MJ/kg i $EF_{CO_2}^{Tier1} = 101,1$ t CO_2 /TJ dok se za lignite sa prostora bivše Jugoslavije preporučuju sledeće vrednosti: $H_d^r = 8,89$ MJ/kg, $EF_C = 27,6$ tC/TJ, $OF = 0,98$, tako da se za emisijski faktor CO_2 dobija $EF_{CO_2}^{exYU} = EF_C \cdot 0,98 \cdot 44 / 12 = 99,176$ t CO_2 /TJ.

Emisija CO_2 se može odrediti i kao proizvod količine sagorelog fosilnog goriva, donje toplotne moći goriva H_d^r i emisijskog faktora EF_{CO_2} . Prema IPCC metodologiji, uzimajući u obzir jedn. (1), pod pretpostavkom da je $OF = 0,98$, pri čemu je faktor konverzije ugljenika u CO_2 jednak 3,664 (za usvojene vrednosti atomske mase ugljenika od 12,011 i kiseonika od 15,9994) dobijamo izraz za emisijski faktor CO_2 :

$$EF_{CO_2}^{IPCC} = EF_C^r \cdot 0,98 \cdot 3,664 = 123,636 \cdot 2,117 H_d^r \quad (4)$$

Da bi uzeli u obzir realne karakteristike procesa sagorevanja u kotlu ispitivanog termoenergetskog bloka, udeo oksidiranog (sagorelog) ugljenika se proračunava na osnovu eksperimentalno određenih vrednosti sadržaja ugljenika u dostavnom uglju C_1^r , letećem pepelu C_1^{lp} i šljaci C_1^{sl} . Zanimajući masu ugljenika u depozitima na grejnim površinama, stepen oksidacije ugljenika OF^m se može izračunati kao $OF^m = 100(m_{Cr} - m_{Csl} - m_{Clp})/m_{Cr}$ gde je m_{Cr} masa ugljenika u dostavljenom lignitu i m_{Csl} masa ugljenika u šljaci, m_{Clp} masa ugljenika u letećem pepelu. Ako udeo ugljenika u rovnom lignitu C^r izrazimo u [%] a donju toplotnu moć rovnog lignita H_d^r u MJ kg^{-1} , emisijski faktor CO_2 ispitivanog termoenergetskog bloka koji sagoreva Kolubarski lignit se korišćenjem jedn. (2) može dobiti kao:

$$EF_{CO_2}^{KL} = \frac{44,009}{12,011} OF^m EF_C = 36,64 OF^m \frac{C^r}{H_d^r} \quad (5)$$

Ukupna relativna nesigurnost određivanja $EF_{CO_2}^{KL}$ prema jedn. (5) je 13,74% i dobijena je kao kvadratni koren sume kvadrata doprinosa mernoj nesigurnosti određivanja procenta oksidisanog ugljenika, određivanja masenog sadržaja ugljenika u uzorku lignita i određivanja donje

toplotne moći uzorka. Proračunata ukupna nesigurnost određivanja emisionog faktora CO₂ je definisana kao relativna standardna devijacija s obzirom da su različiti doprinosi ukupnoj nesigurnosti određeni na osnovu rezultata dobijenih različitim mernim tehnikama (zapreminska, gravimetrijska i instrumentalna metoda), veoma različitih nivoa preciznosti i sa različitim vrednostima nesigurnosti. Procenjeno je da su granice relativne standardne devijacije 2σ na nivou 10,13% za određivanje vrednosti oksidiranog ugljenika, 6,50% za određivanje sadržaja ugljenika u uzorku rovnog lignita i 6,64% za određivanje vrednosti donje toplotne moći uzorka lignita.

Emisioni faktor $EF_{CO_2}^{ex}$ za termoenergetski blok koji ima potrošnju od B [t/h] Kolubarskog lignita čija je donja toplotna moć H_d^r , možemo definisati kao:

$$EF_{CO_2}^{ex} = \frac{P_{CO_2} V_N \rho_{CO_2}}{B H_d^r} \quad (6)$$

U jedn. (6) P_{CO_2} je merena vrednost zapreminskog udela CO₂ u suvom dimnom gasu, ρ_{CO_2} gustina CO₂, V_N zapreminski protok suvog dimnog gasa na standardnim uslovima (suv gas, temperatura 273 K, pritisak 101325 Pa, za mereni sadržaj O₂ u dimnom gasu), preračunato sa merenih vrednosti protoka na radnim uslovima (vlažan dimni gas).

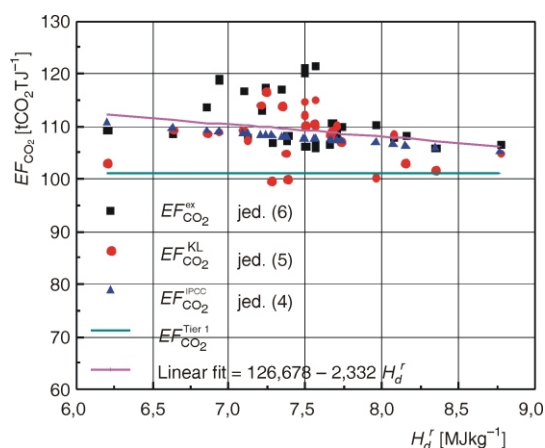
Vrednosti emisionog faktora CO₂ izračunatog na osnovu jedn. (4), (5) i (6) kao masa CO₂ po jedinici energetskog potencijala sagorevanog uglja su prikazane na sl. 2, odakle vidimo da:

- dobijene vrednosti emisionog faktora CO₂ za Kolubarski lignit su značajno veće kako od vrednosti $EF_{CO_2}^{exYU} = 99,176$ tCO₂/TJ tako i od vrednosti $EF_{CO_2}^{Tier1} = 101,1$ tCO₂/TJ koja se dobija primenom preporučene IPCC Tier 1 metode za lignit,
- za Kolubarski lignit sa donjom toplotnom moći u granicama $H_d^r = 6 - 9$ MJ/kg predložena jedn. (4) daje rezultate najpribližnije linearnoj regresiji dobijenih rezultata, koja je oblika $126,678 - 2,332 H_d^r$, i
- vrednosti emisionog faktora CO₂ određenog na osnovu merenja protoka dimnog gasa i sadržaja CO₂ u dimnom gasu su u najvećem broju slučajeva više od vrednosti emisionog faktora CO₂ određenog na osnovu masenog bilansa ugljenika.

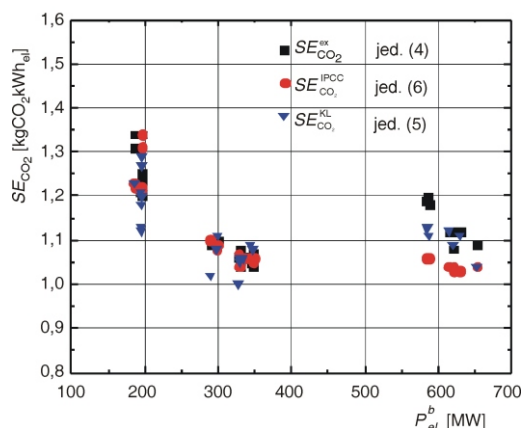
Za svaki od ispitivanih termoenergetskih blokova bruto snage P_{el}^b možemo definisati bruto/neto specifičnu emisiju CO₂, kao vrednost proračunate količine CO₂ oslobođene po jedinici bruto/neto proizvedene električne energije:

$$SE_{CO_2} = (EF_{CO_2} B Q_d^r) / (P_{el}^b 10^6) \quad (7)$$

Kompletni rezultati obavljenih merenja emisije CO₂ i izvršenih tehničkih i elementarnih analiza uzoraka uglja, šljake i pepela, dati su u Izveštajima [13–21]. Rezultati proračuna specifične emisije CO₂ dobijeni jedn. (4), (5) i (6) dati su u tab. 1, koja sadrži i rezultate laboratorijski određenog sadržaja ugljenika C_I^r i donje toplotne moći H_d^r i proračunski određenog OF^m za 28 uzoraka rovnog Kolubarskog lignita koji je sagorevan u ispitivanim blokovima TENT-a tokom izvršenih merenja sadržaja CO₂ u dimnom gasu.



Slika 2. Vrednost emisionog faktora CO₂ Kolubarskog lignita



Slika 3. Zavisnost specifične emisije CO₂ od bruto snage termoelektrog bloka P_{el}^b

Iz rezultata prikazanih u tab. 1 se vidi da su vrednosti specifične emisije CO₂ za blokove A1 i A2 sa P_{el}^b 200 MW značajno više od specifičnih emisija ostalih ispitivanih blokova, prvenstveno zbog toga što se radi o blokovima starijim od 43 godine, sa nižim nivoima energetske efikasnosti primenjene tehnologije, niskim nivoom ulaganja u revitalizaciju i modernizaciju tih blokova u poslednjih 10 godina i za koje je planirano da budu povučeni u rezervu do 2021.

Prema prikazanim rezultatima se može zaključiti da su pri bruto snagama P_{el}^b 200 MW vrednosti dobijene za $SE_{CO_2}^{ex}$ i do 8,4% više od vrednosti dobijene za $SE_{CO_2}^{IPCC}$. Za bruto snage P_{el}^b 280 MW, vrednosti dobijene za $SE_{CO_2}^{ex}$ su niže od dobijenih za $SE_{CO_2}^{IPCC}$ u 7 slučajeva (sa relativnom razlikom do 1.46%) i više od vrednosti dobijenih za $SE_{CO_2}^{IPCC}$ u 4 slučaja. Za slučajeve ispitivanja termoblokova B1 i B2 pri ostvarenim bruto snagama P_{el}^b 600 MW i većim, vrednosti dobijene za $SE_{CO_2}^{ex}$ su niže od vrednosti dobijenih za $SE_{CO_2}^{ex}$ i $SE_{CO_2}^{KL}$.

Posmatrajući ceo set dobijenih rezultata, relativna razlika između proračunatih vrednosti $SE_{CO_2}^{KL}$ i $SE_{CO_2}^{IPCC}$ se kretala od -2,71% do 7,98%. U skoro svim slučajevima kada je faktor OF^m bio veći od IPCC metodologijom preporučenih 0,98 dobijane su i više vrednosti za $SE_{CO_2}^{KL}$ nego za $SE_{CO_2}^{IPCC}$. Proračunom su dobijene približne vrednosti za $SE_{CO_2}^{ex}$ i $SE_{CO_2}^{KL}$, pri čemu se relativna razlika ovih specifičnih emisija kretala u granicama od -3,92% do 9,03%. U većini slučajeva je proračunom dobijena viša vrednost za $SE_{CO_2}^{ex}$ nego za $SE_{CO_2}^{KL}$, pogotovo u slučajevima kada je dobijena vrednost za OF^m niža od IPCC metodologijom preporučenih 0,98.

Veće rasipanje rezultata specifičnih emisija dobijeno je za termoblokove A1 i A2 (specifična emisija iz ovih blokova se kretala u granicama 1,12–1,34 kgCO₂/kWh_{el}) ali su dobijeni rezultati i dalje u granicama proširene nesigurnosti proračuna u odnosu na srednje vrednosti. Niži nivo rasipanja rezultata je dobijen u slučaju termoelektrog blokova A4 i B1 (specifična emisija iz ovih blokova se kretala u granicama 1,02–1,12 kgCO₂/kWh_{el}) i A6 (specifična emisija u granicama 1,00–1,09 kgCO₂/kWh_{el}), dok je bila nešto povišena u slučaju bloka B2 (specifična emisija se kretala u granicama 1,01–1,20 kgCO₂/kWh_{el}). Na osnovu ukupnog seta rezultata proračuna, možemo usvojiti vrednost od 1,25 kgCO₂/kWh_{el} za srednju vrednost specifične emisije CO₂ iz termoelektrog blokova A1 i A2, vrednost od 1,08 kgCO₂/kWh_{el} kao srednju vrednost za blokove A4 i B1, vrednost od 1,06 kgCO₂/kWh_{el} za blok A6 i vrednost od 1,11 kgCO₂/kWh_{el} za blok B2. Vidimo da su srednje vrednosti specifičnih emisija blokova A4, A6, B1 i B2 niže od 1,092 kgCO₂/kWh_{el} koliko je iznosio srednji nivo emisije u 1990-toj godini.

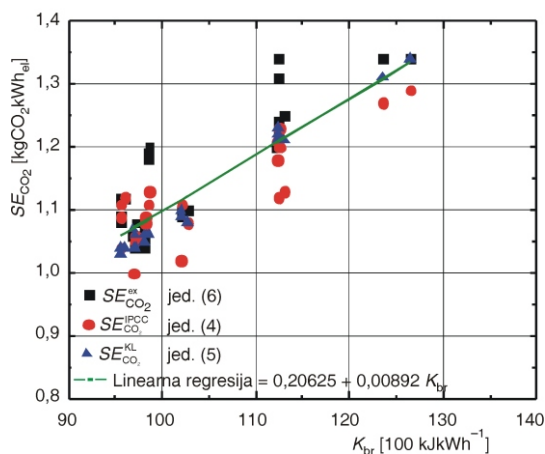
Vrednost sadržaja ugljenika u uzorcima lignita kretala se u opsegu 18,37–25,76%, dok je donja toplotna moć uzoraka bila u opsegu 6202–8772 kJ/kg. Iz prikazanih rezultata se vidi da su se vrednosti proračunate specifične emisije CO₂ kretale od 1,00 do 1,38 kgCO₂/kWh_{el}, u zavisnosti od energetske efikasnosti posmatranog termoelektrog bloka.

Na sl. 3 je prikazana zavisnost bruto specifične emisije CO₂ u zavisnosti od bruto snage termoelektrog bloka. Sa slike se uočava određeno rasipanje dobijenih rezultata EF_{CO_2} kao posledica više različitih faktora koji zavise od kvaliteta uglja, karakteristika ispitivanog termoelektrog bloka i parametara uspostavljenog radnog režima.

Na sl. 4 je prikazana zavisnost specifičnih emisija CO₂ od bruto specifične potrošnje toplote bloka K_{br} izražene u kJ/kWh, koja je ostvarena prilikom svakog od ispitivanja, pri čemu su vrednosti proračunate na osnovu relacije: $K_{br} = BH_d^r / P_{el}^b$. Na istoj slici je data i linearna regresija ukupnog seta rezultata proračuna specifične emisije CO₂ korišćenjem sva tri prethodno opisana načina. Linearnom regresionom analizom je utvrđena regresiona prava u obliku:

$$SE_{CO_2} = 0,20625 + 0,00892 K_{br} \quad (8)$$

Jednačina (8) može da se koristi za određivanje specifične emisije CO₂ bloka koji sagoreva Kolubarski lignit, a čija je bruto specifična potrošnja toplote K_{br} poznata.



Slika 4. Zavisnost specifične emisije CO₂ od bruto specifične potrošnje bloka K_{br}

Zaključak

U radu su prikazani rezultati merenja emisije CO₂ iz 6 različitih blokova termoelektrana TENT A i TENT B u Obrenovcu. Bruto snaga blokova se tokom ispitivanja kretala u opsegu od 185 MW do 652 MW. Tokom ispitivanja su uzimani uzorci rovnog uglja koji je sagorevan tokom merenja, kao i uzorci šljake i letećeg pepela. Tehnička i elementarna analiza uzetih uzoraka rovnog uglja, šljake i pepela obavljene su u ispitnoj laboratoriji akreditovanoj prema SRPS ISO/IEC 17025 standardu. Na osnovu rezultata dobijenih merenjima na postrojenjima navedenih termoeneregetskih blokova, izvršena je procena vrednosti emisionog faktora ugljenika i emisionog faktora ugljen dioksida za navedene blokove u kojima se sagoreva lignit Kolubarskog basena.

Donja toplotna moć uzoraka rovnog lignita koji je sagorevan u kotlovima ispitivanih postrojenja tokom merenja se kretala u granicama 6202 + 8772 kJ/kg. Preporučeno je da treba koristiti linearnu korelaciju $EF_C^r = 34,407 - 0,5891 H_d^r$ i vrednost $OF = 0,98$ za proračun emisionog faktora ugljenika Kolubarskog lignita čija se donja toplotna moć nalazi u granicama 6–10 MJ/kg. Na osnovu ove korelacije je za proračun emisionog faktora CO₂ Kolubarskog lignita preporučena linearna zavisnost data jednačinom $EF_{CO_2}^{IPCC} = EF_C^r - 0,98 - 3,664 - 123,636 - 2,117 H_d^r$, koja daje rezultate veoma približne linearnoj regresiji ukupnog seta podataka, a koja je oblika: $EF_{CO_2} = 126,7 - 2,3 H_d^r$.

Vrednosti specifične bruto emisije CO₂ ispitivanih blokova proračunate su na osnovu tri različita pristupa: (a) korišćenjem preporučene linearne korelacije za određivanje emisionog faktora ugljenika Kolubarskog lignita, (b) na osnovu nivoa sadržaja CO₂ u dimnom gasu i izmerenog protoka merenog na kanalu dimnog gasa iza elektrofiltera i (v) masenog bilansa ugljenika na osnovu laboratorijski određenih sadržaja ugljenika u uzorcima rovnog lignite, šljake i pepela.

Utvrđene su vrednosti specifične bruto emisije CO₂ na nivou od 1,25 kgCO₂/kWh_{el} za blokove A1 i A2 (bruto snage 200 MW) i 1,08 kgCO₂/kWh_{el} za blokove A4 i A6 (bruto snage 350 MW) tokom 2012. godine. Analogno, utvrđene su vrednosti nivoa specifične bruto emisije CO₂ tokom 2011. godine od 1,08 kgCO₂/kWh_{el} za blok B1 i 1,12 kgCO₂/kWh_{el} za blok B2 (bruto snage 670 MW). Dobijeni rezultati ukazuju na neophodnost sprovođenja periodičnih merenja emisije CO₂ na svakom od termoblokova u sastavu EPS-a iz dva razloga:

- procenu nivoa godišnje emisije CO₂ iz svakog od blokova i ukupno iz celog sistema EPS-a moguće je preciznije izvršiti na osnovu određivanja vrednosti specifičnih emisija CO₂ za svaki termoblok ponaosob, nego na osnovu proračuna koji preporučuje standardna metodologija,
- podaci dobijeni merenjima mogu biti iskorišćeni za proveru i verifikaciju kvaliteta radova izvedenih u okviru remonta i/ili modernizacije ispitivanog sistema blokovskog postrojenja.

Za proračun specifične emisije CO₂ iz ispitivanih termoblokova u zavisnosti od bruto specifične potrošnje toplote bloka K_{br} je preporučena linarna korelacija $SE_{CO_2} = 20,625 + 0,892 K_{br}$.

Veće rasipanje rezultata je dobijeno za ispitivanja pri najnižim vrednostima bruto snaga (manjim od 200 MW), koje odgovaraju blokovima A1 i A2, nego pri slučajevima koji odgovaraju većim vrednostima bruto snage, ali u nivou procenjene vrednosti proširene nesigurnosti određivanja specifične emisije CO₂.

Na kraju je linearnom regresionom analizom određena zavisnost specifičnih emisija CO₂ od bruto specifične potrošnje toplote bloka K_{br} .

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.

Oznake

A	– sadržaj pepela, [%]
C	– sadržaj ugljenika u rovnom lignitu, [%]
$C_{\%}$	– sadržaj ugljenika u fosilnom gorivu, [%]
EF_C	– emisioni faktor ugljenika, [tCTJ ⁻¹]
EF_{CO_2}	– emisioni faktor CO ₂ , [tCO ₂ /TJ]
H_d	– donja toplotna moć, [kJkg ⁻¹]
K_{br}	– bruto specifična potrošnja bloka, [kJkWh ⁻¹]
m	– masa goriva, [kg]
P_{CO_2}	– zapreminski udeo CO ₂ u dimnom gasu, [%]
P_{el}^b	– bruto snaga, [MW]
SE_{CO_2}	– specifična emisija [CO ₂ , kgCO ₂ /kWh _{el}]
V_N	– protok dimnog gasa pri standardnim uslovima, [Nm ³ h ⁻¹]
W	– sadržaj vode, [%]
X_C	– udeo mase ugljenika

Grčki simboli

ρ_{CO_2}	– gustina CO ₂ pri merenoj vrednosti temperature dimnog gasa, [kgm ⁻³]
---------------	---

Indeksi

ex	– na osnovu merene vrednosti zapreminskog udela CO ₂ u dimnom gasu
KL	– na osnovu linearne jedn. (1)
IPCC	– na osnovu pretpostavki IPCC standardne metodologije
l	– eksperimentalno određena u ispitnoj laboratoriji
lp	– leteći pepeo
r	– uzorak rovnog lignita
sl	– šljaka

Literatura

- [1] ***, Službeni list Republike Jugoslavije, „Međunarodni ugovori” br. 2/97
- [2] Ivezić, D., *i dr.*, Nacrt strategije razvoja energetike Republike Srbije za period do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, <http://www.merz.gov.rs/cir/dokumenti/nacrt-strategije-razvoja-energetike-republike-srbije-za-period-do-2025-godine-sa>
- [3] ***, Direktiva 2001/80/EZ Evropskog parlamenta i saveta od 23. oktobra 2001 o ograničavanju emisije određenih zagađivača u vazduh od strane velikih termopostrojenja, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/consleg/2001/L/02001L0080-20011127-en.pdf>
- [4] Stefanović, P., *i dr.*, Analiza uslova i mogućnosti primene sušenja lignita u cilju povećanja energetske efikasnosti i zaštite okoline u termoelektranama PD EPS, interni izveštaj NIV-LTE 469, Laboratorija za termotehniku i energetiku instituta Vinča, Beograd, Vinča 2011
- [5] Stefanović, P., *i dr.*, Emisija gasova sa efektom staklene bašte u toplanama javnih preduzeća daljinskog grejanja u gradovima Srbije, *Termotehnika*, 37 (2011), 2, 183-195
- [6] Cvetinović, D., *et al.*, Greenhouse Gases (GHG) Emission Inventory and Mitigation Measures for Public District Heating Plants in the Republic of Serbia, *Energy*, 57 (2013), 1, pp. 788-795
- [7] ***, IPCC, Technologies, Policies and Measures for Mitigating Climate Change, IPCC Technical Paper I, 1996, <http://www.ipcc.ch/pub/techrep.htm>
- [8] ***, Prva (Inicijalna) nacionalna komunikacija Republike Srbije, Ministarstvo životne sredine i prostornog planiranja Republike Srbije, Oktobar 2010. godine, http://www.seecclimateforum.org/upload/document/inicijalna_nacionalna_komunikacija.pdf
- [9] Ristović, I., *et al.*, Recultivation and Sustainable Development of Coal Mining in Kolubara Basin, *Thermal Science*, 14 (2010), 3, pp. 759-772
- [10] ***, The Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Tier 1
- [11] Stefanović, P., *et al.*, Evaluation of Kolubara Lignite Carbon Emission Characteristics, *Thermal Science*, 16 (2012), 3, pp. 1-12
- [12] ***, 2007/589/EC Commission Decision of 18 July 2007 Establishing Guidelines for the Monitoring and Reporting of Greenhouse Gas Emissions Pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council
- [13] Stefanović, P., *et al.*, Particulate Emission Test A of the Upgraded Electrostatic Precipitator at Unit A6 of TPP „Nikola Tesla A” Obrenovac, Interni Izveštaj NIV-LTE 479, Beograd – Vinča, Jul 2011
- [14] Erić, M., Stefanović, M., Periodična merenja emisije štetnih i opasnih materija u vazduhu na bloku A1 TE „Nikola Tesla” u Obrenovcu, interni izveštaj NIV-LTE 484, Oktobar 2011, Vinča, Beograd
- [15] Erić, M., Stefanović, P., Periodična merenja emisije štetnih i opasnih materija u vazduh na bloku A2 TE „Nikola Tesla” u Obrenovcu, interni izveštaj NIV-LTE 485, Oktobar 2011, Vinča, Beograd
- [16] Erić, M., Stefanović, P., Periodična merenja emisije štetnih i opasnih materija u vazduh na bloku A4 TE „Nikola Tesla” u Obrenovcu, interni izveštaj NIV-LTE 493 Decembar 2011, Vinča, Beograd
- [17] Stefanović, P., Erić, M., Particulate Emission Test A of the Upgraded Electrostatic Precipitator at Unit A6 of TPP „Nikola Tesla A”, Obrenovac, NIV-LTE-490, Novembar 2011, Vinča
- [18] Erić, M., Škopalj, P., Stefanović, P., Periodična merenja emisije štetnih i opasnih materija u vazduhu na bloku A1 TE „Nikola Tesla” u Obrenovcu, (druga serija merenja), interni izveštaj NIV-LTE 496, Januar 2012, Vinča, Beograd
- [19] Stefanović, P., Erić, M., Marković, Z., Particulate Emission Control Test of The Upgraded ESP at Unit B1 of TPP “Nikola Tesla B”, Interni Izveštaj, Verzija 1.0 NIV-LTE-522, Februar 2013, Vinča
- [20] Stefanović, P., Erić, M., Marković, Z., Particulate Emission Guarantee Test of The Upgraded ESP at Unit B1 of TPP “Nikola Tesla B”, Interni izveštaj, Verzija 1.0 NIV-LTE-529, Mart 2013, Vinča
- [21] Stefanović, P., Erić, M., Particulate Emission Guarantee Test B of The Upgraded ESP at Unit B2 of TPP “Nikola Tesla B”, Interni izveštaj, Verzija 2.0 NIV-LTE-524, Februar 2013, Vinča

Abstract**Determination of the Specific Carbon Dioxide Emission Factor from Thermal Power Plants Nikola Tesla A and B**

by

Zoran MARKOVIĆ*, **Milić ERIĆ**, **Dejan CVETINović**,
Predrag STEFANOVIĆ, **Vuk SPASOJEVIĆ**, and **Predrag ŠKOBALJ****Laboratory for Thermal Engineering and Energy,
Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia**

Low-calorific lignite from Kolubara open-pit mines is mainly used for heat and power generation in PE “Thermal Power Plants Nikola Tesla”. The IPCC methodology suggests that CO₂ emissions by fossil fuel combustion shall be calculated as product of fuel mass and standardized (country or even region related) values of lower heating value, carbon emission factor and factor of oxidation of combusted fuel. This approach doesn’t take into account the influences of unit thermal efficiency as well as fundamental characteristics of combustion process, the most important influencing factors on overall CO₂ emission.

This paper presents the results of calculation of specific CO₂ emissions by three different approaches: (a) using the observed linear correlation for calculation of carbon emission factor of the raw lignite, (b) based on the level of CO₂ in the flue gas measured at 6 different power plant thermal units “Nikola Tesla” A and B, (c) based on the mass balance of carbon in the coal, flying ash and bottom ash. Comparing all the results, we conclude that the best solution is obtained by using the observed linear correlation for calculation of the carbon emission factor of the raw lignite. The calculation of specific CO₂ emissions based on the measured flow rate and the share of CO₂ in the flue gas gives higher, while calculation based on the carbon mass balance gives less values for the specific CO₂ emissions. Higher values for specific CO₂ emissions and some dissipation of these results is obtained for units A1 and A2 at output power of about 200 MW, than in the case of units whose output power during the test was over 300 MW – units A4 and A6, or over 600 MW – units B1 and B2.

Key words: Kolubara mine lignite, TENT, carbon emission factor, IPCC Tier 1

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

Rad primljen: ???
Rad revidiran: ???
Rad prihvaćen: ???