

Uticaj kvaliteta uglja na ostvarenu snagu generatora termoelektrane nazivne snage 300 MW

The Impact of Coal Quality on the Generator's Achieved Power of the 300 MW Thermal Power Plant

Nikola Miljković*, Nikola Jovanović*, Aca Jovanović**

* Institut za rudarstvo i metalurgiju - Bor, Zeleni bulevar 35, 19210 Bor, Srbija

** Fakultet za projektni i inovacioni menadžment „Prof.Dr. Petar Jovanović“, Bože Jankovića 14, 11000 Beograd, Srbija

** GLOBAL Innovation Projects d.o.o, Dušana Vukasovića 37, 11070 Novi Beograd

Apstrakt - Ovaj rad razmatra rezultate monitoringa rada parno-turbinskog bloka termoelektrane snage 300 MW u periodu od 2 meseca. Tokom monitoringa su uzimani uzorci uglja ispred mlina-ventilatora (3 uzorka/dan) i prikupljeni podaci o opterećenju kotla gorivom, temperaturama u kotlu, temperaturama izlaznih gasova, sadržini polutanata u izlaznim gasovima i ostvarenoj bruto snazi na generatoru. Na osnovu rezultata tehničkih analiza uglja i prikupljenih podataka o radu bloka, uspostavljene su direktne zavisnosti između kvaliteta uglja iskazanog preko vrednosti donje toplotne moći, i ostvarene bruto električne snage na generatoru, potrošnje uglja i sadržaja polutanata u izlaznim gasovima termoelektrane.

Ključne reči - Kvalitet uglja, Ostvarena snaga generatora, Stepen korisnog dejstva parnog kotla

Abstract - This paper discusses the results of monitoring the operation of the steam-turbine unit of the 300 MW thermal power plant over a period of 2 months. During the monitoring, coal samples were taken in front of the mill-fan (3 samples/day) and data were collected on the fuel load of the boiler, temperatures in the boiler, temperatures of flue gases, content of pollutants in flue gases and realized gross power on the generator. Based on the results of technical analyses of coal and collected data on the operation of the block, direct dependencies were established between the quality of coal expressed through the Lower Thermal Power (DTM) value, and the realized gross electric power on the generator, coal consumption and the content of pollutants in the flue gases of the thermal power plant.

Key Words - Coal quality, Realized power of the generator, Steam boiler efficiency

I UVOD I OPIS ISTRAŽIVANJA

Proizvodnja električne energije sagorevanjem domaćeg lignita ima udeo veći od 60 % u ukupno proizvedenoj električnoj energiji u na području Republike Srbije i Republike Srpske (Bosna i Hercegovina). Takođe je bitna činjenica da su proizvodni kapaciteti u pomenutim područjima stari 30 do 40 godina, sa niskim ukupnim stepenom korisnog dejstva i emisijom

štetnih polutanata koji su iznad gornje granice emisije (GVE). Veliki deo problema u samoj proizvodnji električne energije, kao i niska efikasnost i visoka emisija štetnih polutanata potiče od sagorevanja uglja niskog kvaliteta, odnosno uglja sa sadržajem neorganiskih primesa, što se očitava kroz nisku vrednost gornje toplotne moći (DTM) uglja

Od samog početka rada razmatranog bloka termoelektrane javljao se poseban problem nedovoljnog kvaliteta uglja, odnosno, raspoloživi ugallj nije imao minimalnu zahtevanu DTM i to iz rezervi uglja Centralnog eksploatacionog polja i rezervi uglja krovinske ugljene serije. Raspoloživi ugallj je imao i ima visoki sadržaj pepela koji prvenstveno potiče od nečistoća i primesa u uglju, a koje se sastoje od laporca, ugljevitte gline i gline.



Slika 1. Uzorkovanje uglja

Posledice sagorevanja uglja sa visokim sadržajem pepela, odnosno sa sadržajem nečistoće su [1]:

- povećana emisija gasovitih polutanata u vidu SO_x i NO_x u vrednostima iznad GVE,
- povećana emisija praškastih polutanata u vazduh, sa vrednostima iznad GVE,
- povećana količina šljake i pepela,

- povećano zašljakivanje kotlovskih ekrana.
- smanjenje stepama korisnog dejstva kotla i samim tim smanjenje električne snage na pragu termoelektrane i smanjenje proizvodnje električne energije,
- povećana potrošnja dodatnog goriva - mazuta, radi održavanja potrebne temperature u vatrenoj kugli u kotlu.

Pre obavljanja laboratorijskih istraživanja vršena su uzorkovanja uglja (lignita) sa bloka u radu. Uzorkovanje je vršeno u periodu od decembra 2022. god. do februara 2023. god., kao što je prikazano na slici 1 [2]. Uzorkovanje je vršeno tri puta na dan, pri čemu su za iste vremenske periode beleženi glavni parametri rada parno-turbinskog bloka, kao što su: ostvarena bruto snaga na generatoru, temperature u ložištu kotla, opterećenje kotla gorivom i broj gorionika na dodatno gorivo u radu.

Svi uzorci pakovani su u zaštitne džakove od po maksimalnih 5 kg, kao što je prikazano na slici 2. Uzorci su obeležavani su po principu *U-aa.bb/c-d* gde je:

- *U* - Materijal koji se uzorkuje *U* = Ugalj
- *aa* - dan u mesecu
- *bb* - mesec u godini
- *c* - oznaka broja uzorka u toku dana (I, II, III)
- *d* - broj džaka pri jednom uzorkovanju (1 i 2).



Slika 2. Primer uzorkovanog uglja

Uzorci koji su mestu *d* imali redni broj „1“ drobljeni su, homogenizovani i sortirani na licu mesta i oni su pri laboratorijskim istraživanjima korišćeni za tehničku analizu, dok su uzorci sa brojem „2“ korišćeni za granulacijsku analizu i oni su direktno sa uzorkovanja ispred mlina-ventilatora pakovani u džakove. Uporedo sa uzorkovanjem uglja vršeno je merenje emisije gasovitih i praškastih polutanata sa propratnom temperaturom izlaznih gasova na dimnom kanalu, odnosno vazduhovodu između elektrostatičkog filtera i dimnjaka.

Za približna vremena uzorkovanja prikupljeni su podaci o stanju kotla i to:

1. Snage generatora
2. Očitane temperature sa monitoringa plamena u (°C)
3. Broj gorionika dodatnog goriva u radu
4. Potrošnja dodatnog goriva (mazuta) na dnevnom nivou
5. Opterećenja dodavača uglja u procentima što odgovara kapacitetu dodavača.

Laboratorijska ispitivanja uzoraka uglja izvedena su u prostorijama "Instituta za rudarstvo i metalurgiju - Bor". Ispitivanje uglja sa dozatora sprovedeno je akreditovanim standardnim metodama za ispitivanje uglja datim u tabeli 1.

Tabela 1. Pregled standardnih metoda ispitivanja uglja

Red. broj	Oznake metode	Naziv metode
1.	ISO 589:2008	Priprema-određivanje grube i ukupne vlage
2.	ASTM D3173:2017	Određivanje sadržaja vlage u analitičkom uzorku
3.	ASTM D3174:2012	Određivanje sadržaja pepela u analitičkom uzorku
4.	ASTM D5373:2016	Određivanje ukupnog ugljenika, vodonika i azota u analitičkom uzorku (instrumentalna metoda)
5.	ASTM D4239:2018	Određivanje sumpora (ukupnog) korišćenjem visokotemperaturne peći za žarenje-Metoda B
6.	ASTM D5865:2019	Određivanje gornje kalorične vrednosti uglja i koksa
7.	ISO 19028:2016	Određivanje gornje kalorične vrednosti po metodi kalorimetrijske bombe i izračunavanje donje kalorične vrednosti

II REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA

Rezultati laboratorijskih analiza uglja prikazane su u tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati laboratorijskih analiza uglja

Redni broj	Uzorak	Nasip masa (t/m ³)	Gustina (g/cm ³)	Uk. vlaga (%)	Sadržaj pepela (%)	DTM (kJ/kg)	Potroš. uglja (t/h)
05.12-1	U-05.12/I-1	0,7576	1,395	38,54	21,02	8060	368
05.12-2	U-05.12/II-1	0,7823	1,384	38,09	24,84	8792	375
05.12-3	U-05.12/III-1	0,7971	1,586	38,49	20,32	9056	374
06.12-1	U-06.12/I-1	0,7795	1,635	38,51	20,4	8875	380
06.12-2	U-06.12/II-1	0,7243	1,452	39,98	19,92	8083	367
06.12-3	U-06.12/III-1	0,7673	1,676	39,48	18,66	8925	356
07.12-1	U-07.12/I-1	0,7538	1,564	41,16	14,78	9995	352
07.12-2	U-07.12/II-1	0,7267	1,768	41,6	12,31	10535	361
07.12-3	U-07.12/III-1	0,7440	1,812	41,36	14,67	9885	351
08.12-1	U-08.12/I-1	0,7905	1,926	38,16	23,95	7014	369
08.12-2	U-08.12/II-1	0,7445	1,651	39,25	21,44	8280	360
08.12-3	U-08.12/III-1	0,7870	1,454	38,82	22,3	7749	366
09.12-1	U-09.12/I-1	0,7668	1,333	40,39	17,87	9211	369
09.12-2	U-09.12/II-1	0,7013	1,742	41,46	15,35	9680	361
09.12-3	U-09.12/III-1	0,6554	1,791	41,24	15,33	9920	360
15.12-1	U-15.12/I-1	0,8249	1,425	35,1	22,63	8581	386
15.12-2	U-15.12/II-1	0,7767	1,425	37	22,35	8253	380
15.12-3	U-15.12/III-1	0,8042	1,345	38,48	24,60	7012	377
16.12-1	U-16.12/I-1	0,7219	1,261	39,26	24,51	7152	378
16.12-2	U-16.12/II-1	0,7110	1,1242	38,56	25,00	7332	353
16.12-3	U-16.12/III-1	0,7914	1,322	35,85	24,77	8089	351
17.12-1	U-17.12/I-1	0,8152	1,2563	42,12	21,80	7504	355
17.12-2	U-17.12/II-1	0,7853	1,2911	37,52	26,28	7428	372
17.12-3	U-17.12/III-1	0,8109	1,9873	38,98	21,08	8973	379

Redni broj	Uzorak	Nasip masa (t/m ³)	Gustina (g/cm ³)	Uk. vlaga (%)	Sadržaj pepela (%)	DTM (kJ/kg)	Potroš. uglja (t/h)
18.12-1	U-18.12/I-1	0,7686	1,326	34,59	21,23	9747	371
18.12-2	U-18.12/II-1	0,7392	1,2672	34,20	18,62	10116	365
18.12-3	U-18.12/III-1	0,7343	1,687	33,90	21,64	10223	365
19.12-1	U-19.12/I-1	0,7831	1,3452	35,64	17,47	10371	336
19.12-2	U-19.12/II-1	0,7633	1,428	40,21	19,45	8225	378
19.12-3	U-19.12/III-1	0,7344	1,2672	36,76	20,40	9496	382
28.12-1	U-28.12/I-1	0,7159	1,8275	34,91	30,61	7344	365
28.12-2	U-28.12/II-1	0,8895	1,791	36,34	20,92	9604	365
28.12-3	U-28.12/III-1	0,7910	1,3245	32,97	21,63	9974	364

Redni broj	DTM (kJ/kg)	Temp gasa (°C)	Sr. brzina gasa (m/s)	Protok suvog otpadnog gasa (m ³ /h)	Oksidi NO _x izraženi kao NO ₂ (mg/m ³)	Oksidi sumpora izraženi kao SO ₂ (mg/m ³)	Koncentr. praškastih materija (mg/m ³)
07.12-1	9995	145,76	26,01	324833	259,8	3850	154,3
07.12-2	10535	153,73	24,89	304839	277,0	3583	154,2
07.12-3	9885	155,48	17,95	218579	270,5	3512	117,1
08.12-1	7014	163,66	20,17	238345	265	3885	113,5
08.12-2	8280	162,82	16,97	200714	257,3	4045	162,3
08.12-3	7749	161,72	17,93	212490	225,1	4101	158,9
09.12-1	9211	159,38	21,45	269863	238,3	4117	194,4
09.12-2	9680	159,76	24,79	311517	227,3	3703	163,8
09.12-3	9920	160,33	22,85	286606	251	4097	162,5

Kao što je navedeno, paralelno su mereni gasoviti i praškasti polutanati u izlaznom gasu, kao i njegova temperatura na dimnom kanalu. Rezultati merenja prikazani su u tabeli 3.

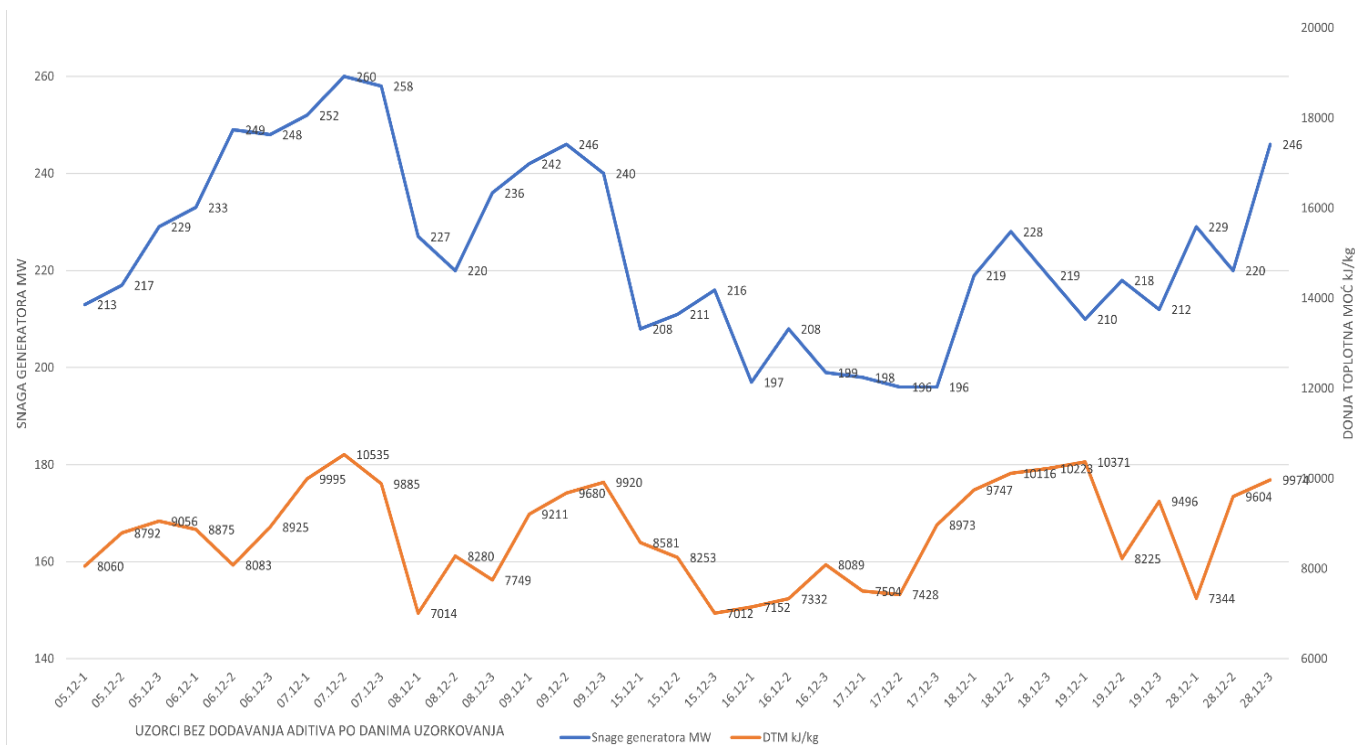
Tabela 3. Rezultati merenja otpadnih gasova na dimnom kanalu

Redni broj	DTM (kJ/kg)	Temp gasa (°C)	Sr. brzina gasa (m/s)	Protok suvog otpadnog gasa (m ³ /h)	Oksidi NO _x izraženi kao NO ₂ (mg/m ³)	Oksidi sumpora izraženi kao SO ₂ (mg/m ³)	Koncentr. praškastih materija (mg/m ³)
05.12-1	8060	73,8	18,12	300045	255,2	3855	465,36
05.12-2	8792	96,02	16,6	258286	259,8	3884	446,01
05.12-3	9056	72,28	15,5	257771	274,4	4019	400,74
06.12-1	8875	55,98	15,98	264582	259,9	3621	531,1
06.12-2	8083	58,32	20,19	331716	273,5	3552	437
06.12-3	8925	60,07	50,57	335797	301,5	3835	437,1

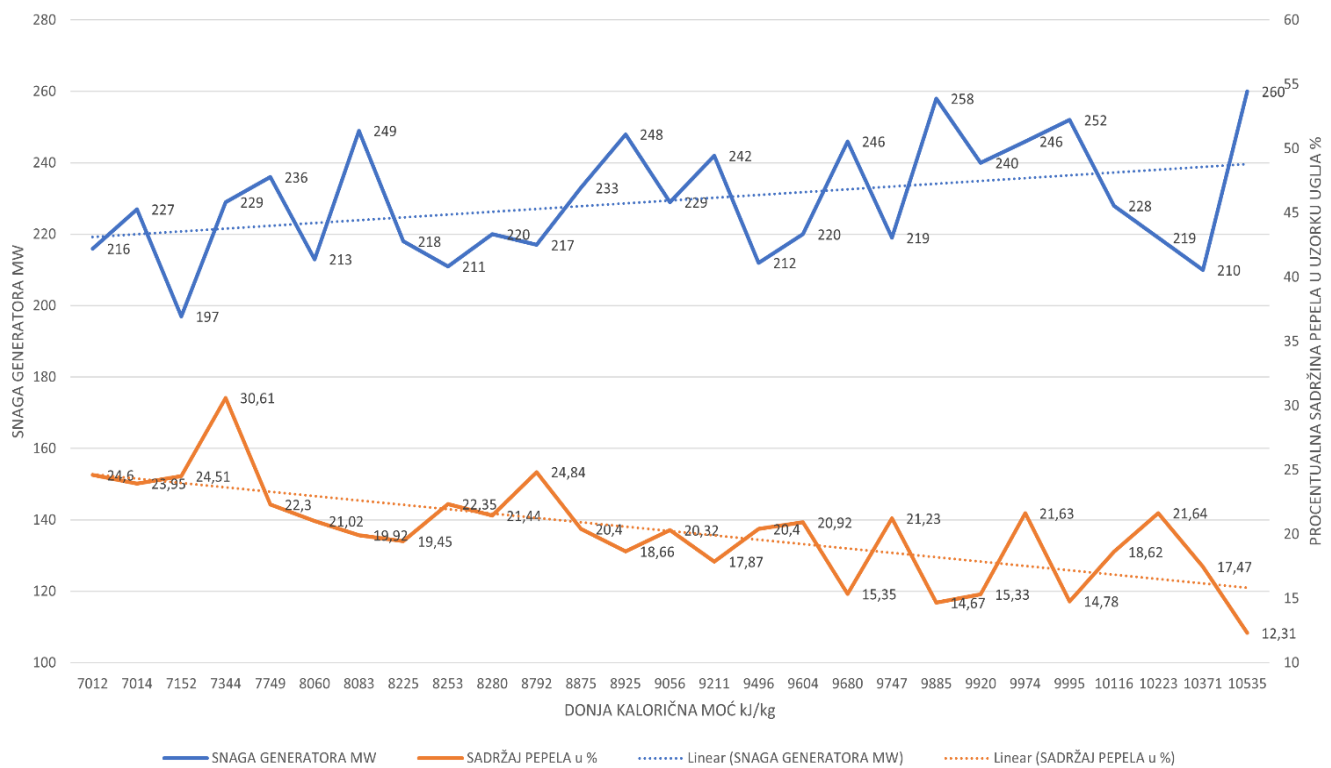
III ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

Analiza i upoređivanje dobijenih rezultata sa praćenjem stanja kotla vršeno je u softverskom paketu Excel gde su se kao proizvod dobili različiti dijagrami uporedne zavisnosti prikazani u nastavku.

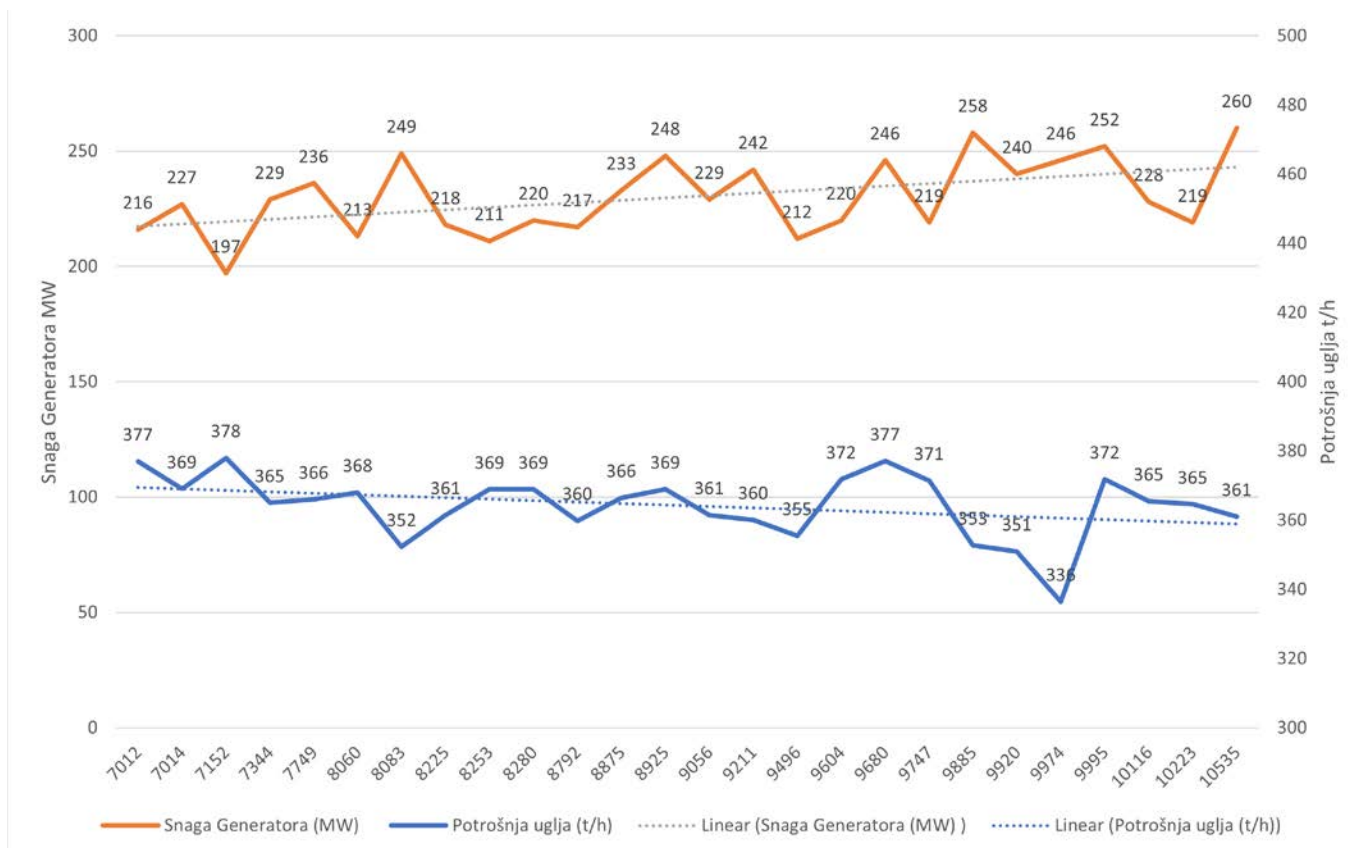
Na slici 3 je prikazan dijagram sa uporednim prikazom ostvarene snage na generatoru i donje toplotne moći uglja tokom monitoringa rada bloka. Na dijagramu su prikazani svi rezultati i u periodima kada nije bilo sagorevanja dodatnog goriva i sa sagorevanjem dodatnog goriva. Narandžastom bojom prikazan je dijagram donje toplotne moći po uzorcima na dnevnom nivou, dok je plavom bojom obeležena snaga generatora u MW u trenucima uzimanja uzoraka na dnevnom nivou.



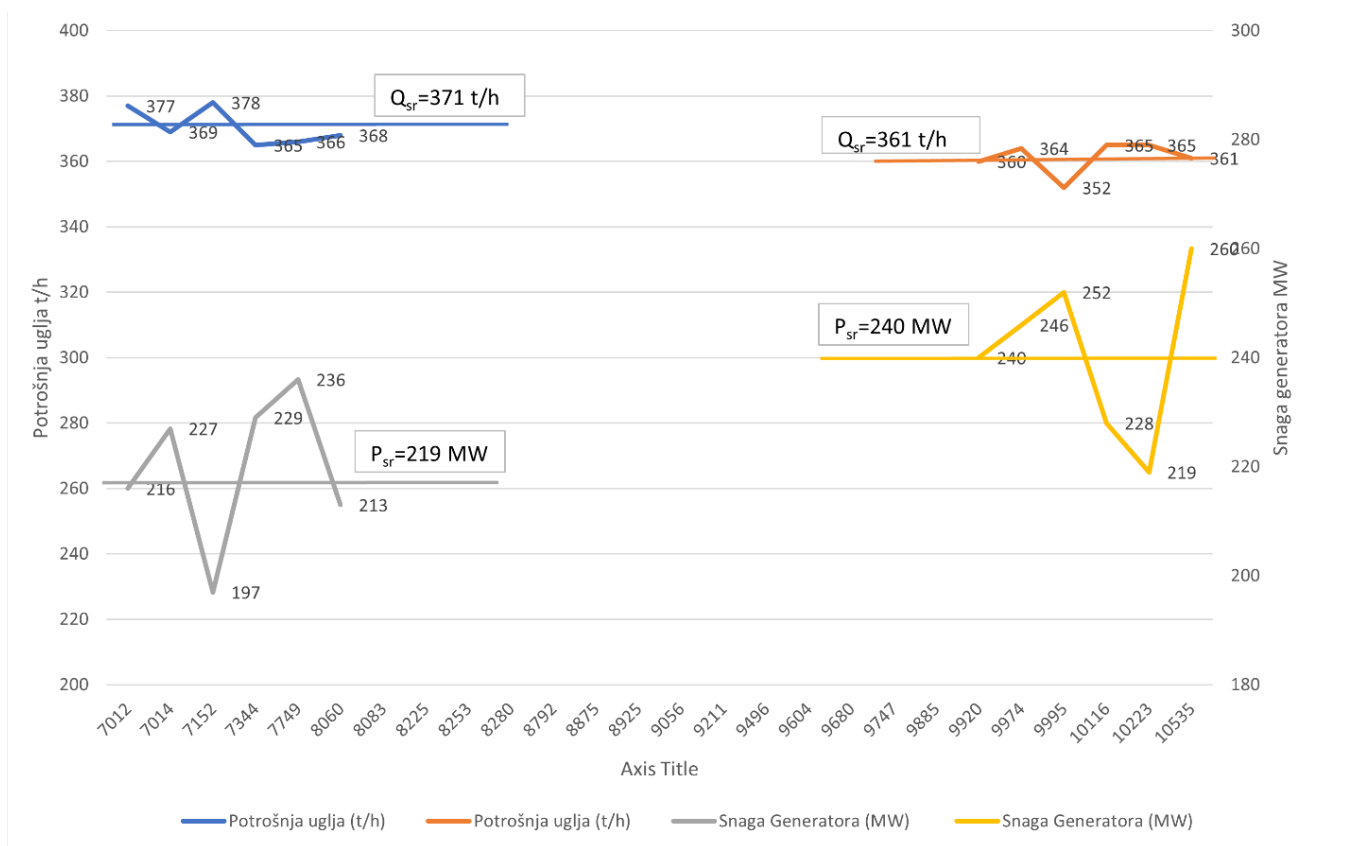
Slika 3. Uporedni prikaz ostvarene snage na generatoru i donje toplotne moći uglja



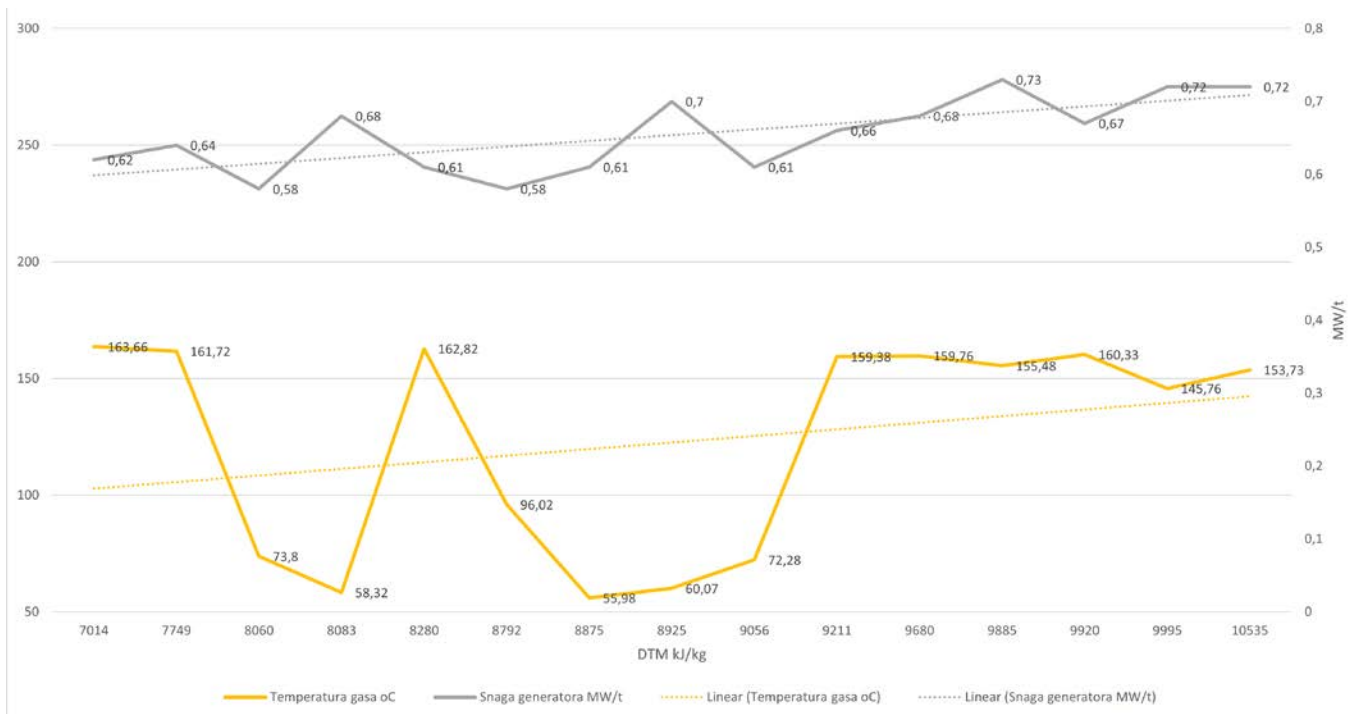
Slika 4. Uporedni prikaz snage generatora i sadržaja pepela u odnosu na donju toplotnu moć uglja



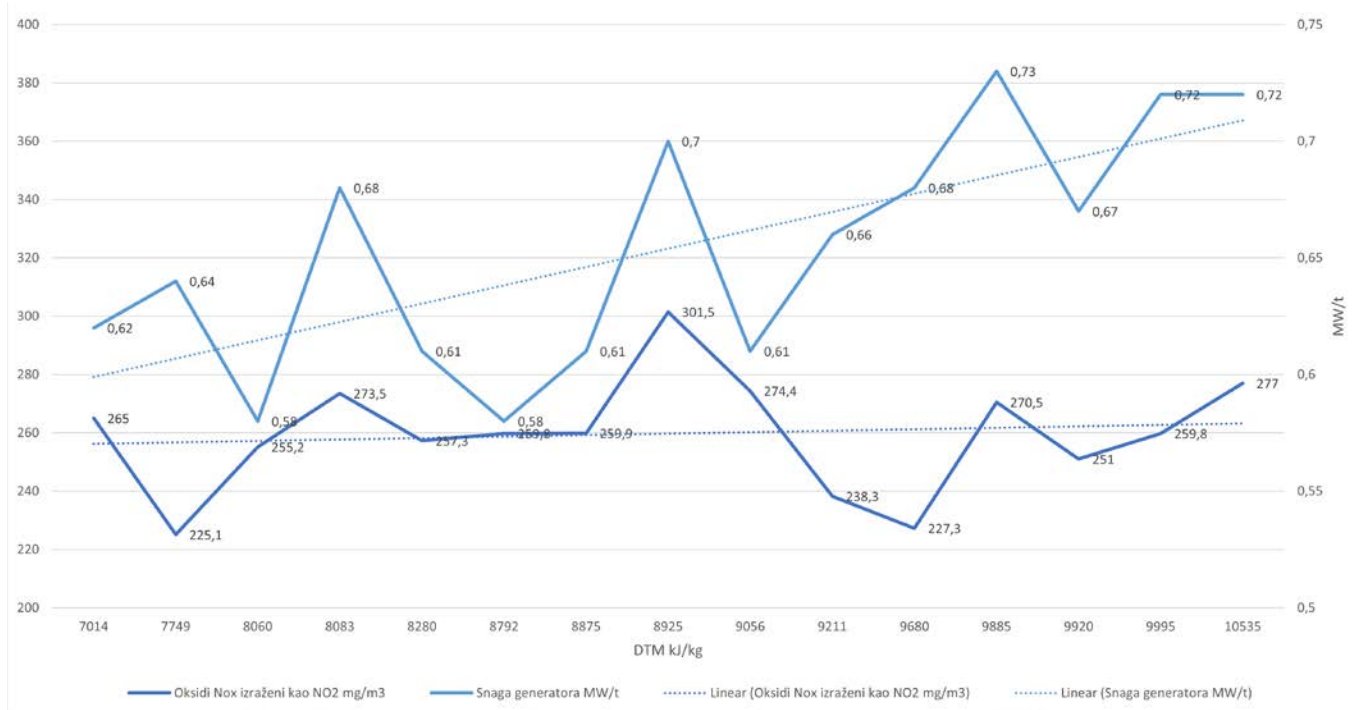
Slika 5. Prikaz ukupne snage generatora i potrošnje uglja u odnosu na donju toplotnu moć uglja



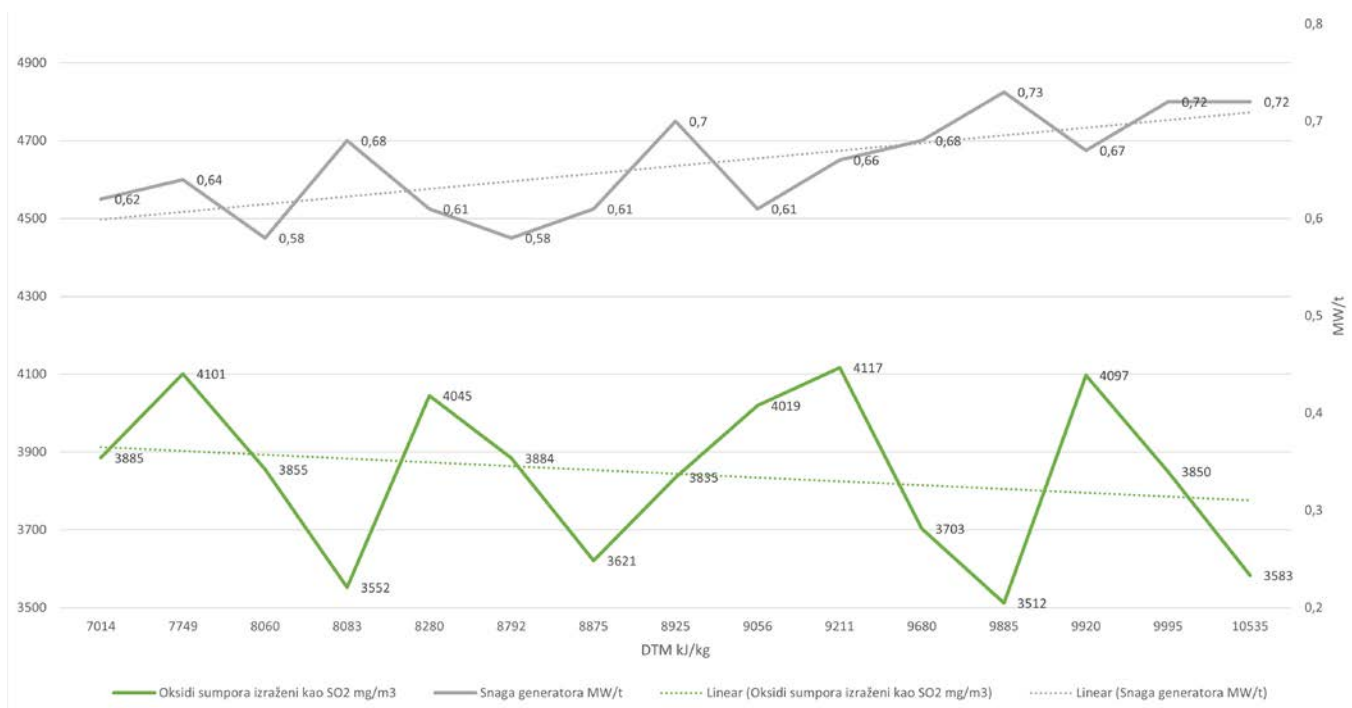
Slika 6. Zavisnost graničnih snaga generatora i potrošnje uglja u odnosu na donju toplotnu moć uglja



Slika 7. Temperatura otpadnih gasova i snaga na generatoru u odnosu na donju toplotnu moć uglja



Slika 8. Oksidi NO₂ i snaga na generatoru u odnosu na donju toplotnu moć uglja



Slika 9. Oksidi SO₂ i snaga na generatoru u odnosu na donju toplotnu moć uglja

Na slici 4 prikazana je snaga generatora u odnosu na donju toplotnu moć sa paralelnim prikazom procentualne sadržine pepela u uzorkovanom uglju. Kao što je navedeno, odstranjeni su uzorci za vreme čijeg uzorkovanja su radili gorionici mazuta. Narandžastom bojom prikazan je procenat pepela u uglju, dok je plavom prikazana snaga generatora u odnosu na donju toplotnu moć. Kao što se može videti dobija se trend rasta snage generatora i on je srazmeran povećanju donje toplotne moći

uglja, dok procenat pepela u uglju opada.

Na Slici 5 prikazana je snaga generatora u odnosu na donju toplotnu moć sa paralelnim prikazom potrošnje uglja. U ovom dijagramu takođe su odstranjeni uzorci koji su uzorkovani za vreme rada gorionika dodatnih goriva. Narandžastom bojom prikazana je snaga generatora u MW, dok je plavom prikazana potrošnja uglja u t/h. Sa dijagrama se može zaključiti da

potrošnja uglja opada u odnosu na povećanje donje toplotne moći. Ovaj dijagram na sebi sadrži sve vrednosti bez dodatnih goriva i služi kao osnov za dijagram u kome se vidi upoređivanje graničnih vrednosti toplotnih moći uglja (Slika 6).

Izdvojene su granične vrednosti DTM uglja i to u opsegu od 7.000 do 8.000 kJ/kg i u opsegu od 9.800 do 10.500 kJ/kg. Za opseg od 7.000 do 8.000 kJ/kg sivom bojom prikazana je snaga generatora, dok je plavom prikazana potrošnja uglja, a za opseg od 9.800 do 10.500 kJ/kg tamno žutom bojom prikazana je snaga generatora a narandžastom potrošnja uglja.

Uočava se:

- znatno povećanje snage generatora (oko 10 %),
- smanjenje potrošnje uglja (oko 3%).

Ovo ukazuje na povećanje stepena korisnog dejstva kotla i veću proizvodnost električne energije po jedinici mase uglja.

Radi utvrđivanja tačne korelacije dobijenih podataka iz merenja emisija praškastih i gasovitih polutanata sa stanjem u kotlu, na sledećim dijagramima upoređuju se dobijeni rezultati (temperatura gasa, oksidi NO₂, oksidi SO₂ i koncentracije praškastih materija) sa donjom toplotnom moći uglja. Kao realna slika uporedo sa rezultatima prikazana je i dobijena snaga generatora u MW po potrošenoj toni uglja u trenutku merenja.

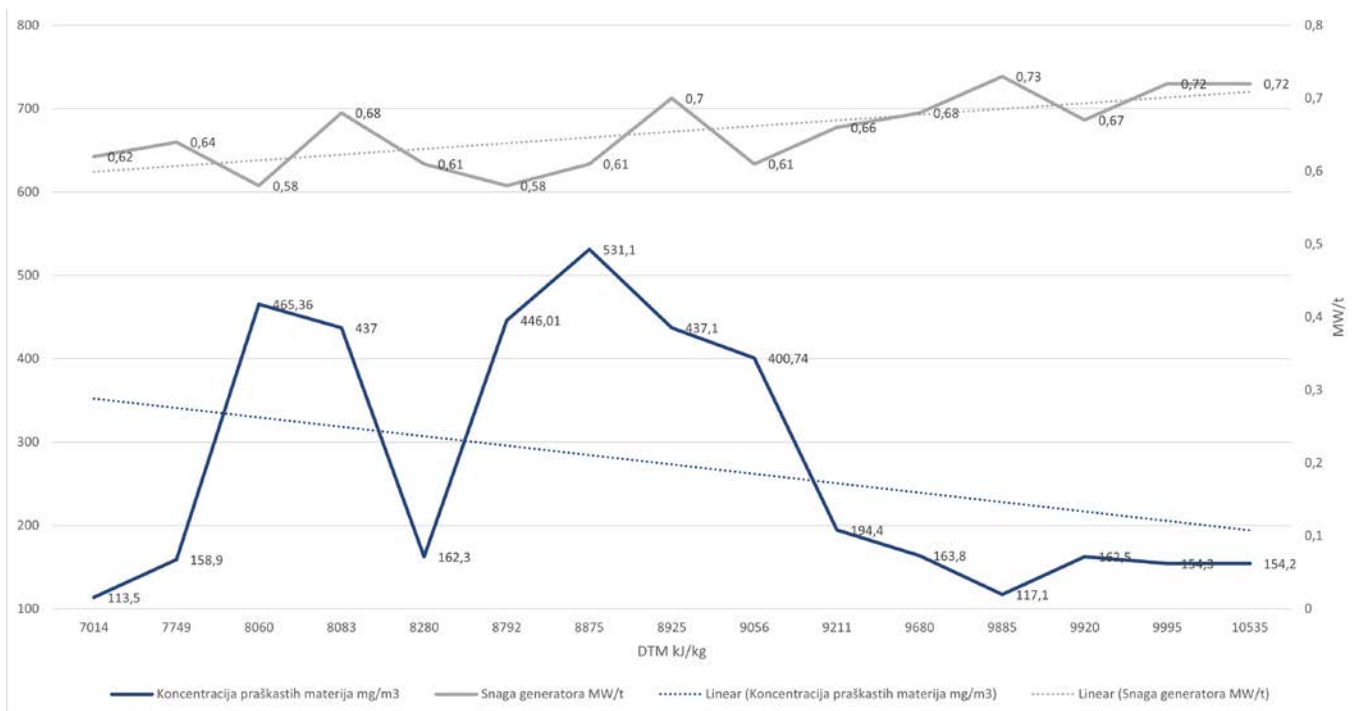
Na dijagramu sa slike 7 prikazane su temperature otpadnih gasova u odnosu na DTM uzorkovanog uglja sa uporedim prikazom snaga generatora po toni potrošenog uglja u trenutcima merenja (MW/t). Svetlo narandžastom bojom prikazana je temperatura gasa u odnosu na DTM dok je sivom prikazana

snaga po toni potrošenog uglja. Iz datog dijagrama može se zaključiti, prateći trend liniju, da su temperature otpadnih gasova veće pri većoj kaloričnoj moći uglja, odnosno boljeg kvaliteta uglja.

Na slici 8 je prikazan sadržaj oksida azota NO_x izraženi kao NO₂ u izlaznim gasovima kotla i snage generatora u odnosu na DTM uzorkovanog uglja sa uporednim prikazom snaga generatora po toni uglja sagorenog uglja. Svetlo plavom bojom prikazana je snaga generatora po toni uglja dok su tamno plavom bojom prikazani oksidi NO₂. Sa dijagrama se može zaključiti su oksidi NO₂ konstantni pri povećanju DTM uglja sa povremenim blagim odstupanjima.

Na dijagramu sa slike 9 prikazani su oksidi sumpora izraženi kao SO₂ u odnosu na DTM uzorkovanog uglja sa uporedim prikazom snaga generatora po toni uglja. Sivom prikazana je snaga generatora po toni uglja dok su zelenom bojom prikazani oksidi SO₂. Sa dijagrama se može zaključiti da su oksidi SO₂ u padu sa povećanjem DTM uglja, odnosno manja je njihova emisija u životnu sredinu.

Na slici 10 prikazana je koncentracija praškastih materija u odnosu na DTM uzorkovanog uglja sa uporedim prikazom snaga generatora po toni uglja. Sivom bojom prikazana je snaga generatora po toni uglja, dok je tamno plavom bojom prikazana koncentracija praškastih materija. Zbog veće sagorivosti uglja, odnosno manje procentualne koncentracije pepela sa povećanjem DTM uglja, čini se da količina praškastih materija srazmerno opada, odnosno da je emisija praškastih materija manja pri većoj toplotnoj moći uglja.



Slika 10. Koncentracija praškastih materija u izlaznim gasovima kotla i snaga na generatoru u odnosu na donju toplotnu moć uglja

IV ZAKLJUČAK

Na osnovu svih prethodnih sagledavanja i analiza, može se zaključiti:

- ostvarena električna snaga generatora linearno zavisi od donje toplotne moći uglja koji se sagoreva,
- temperature u ložištu kotla su u direktnoj korelaciji sa ostvarenim snagama generatora i donjom toplotnom moći uglja,
- potrošnja uglja obrnuto je srazmerna kvalitetu uglja, što znači da se pri korišćenju boljeg kvaliteta uglja podiže stepen korisnog dejstva kotla, što takođe dovodi do povećanja snage na generatoru,
- donja toplotna moć uglja obrnuto je srazmerna procentu pepela u uglju, pri čemu se dolazi do zaključka da za tražene donje toplotne moći uglja od 9.000 - 10.000 kJ/kg sadržaj pepela u uglju mora biti manji od 15 %,
- u slučaju lošeg kvaliteta uglja, pri uključivanju dodatnih gorionika na mazut, ne dobijaju se relevantni podaci, samim tim pri izradi ovog izveštaja uzorci koji su uzimani za vreme rada gorionika mazuta su izuzimani iz razmatranja,

- sa porastom donje toplotne moći uglja smanjuju se procentualna sadržina nesagorljivih materija i preostala toplotna moć u u šljaci.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Kavouridis, K., Roumpos, C., Galetakis, M. The effect of power plant efficiency, lignite quality and inorganic matter on CO₂ emissions and competitiveness on Greek lignite, *Górnictwo i Geoinżynieria*, Vol. 31, No. 2, pp. 355-369, 2007.
- [2] Izveštaj sa monitoringa rada bloka TE „Gacko“ bez dodavanja aditiva - Faza I, Institut za rudarstvo i metalurgiju, Bor, GLOBAL Innovation Projects d.o.o, Beograd, 2022. god.

AUTORI/AUTHORS

msr Nikola Miljković - mast. inž. maš, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, nikola.miljkovic@irmbor.co.rs, ORCID [0009-0009-2372-3942](https://orcid.org/0009-0009-2372-3942)

msr Nikola Jovanović - mast. inž. arh, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, nikola.jovanovic@irmbor.co.rs

dr Aca Jovanović - redovni profesor, GLOBAL Innovation Projects d.o.o, Beograd, aca.jovanovic@globalinnovation.rs, ORCID [0000-0003-2284-5875](https://orcid.org/0000-0003-2284-5875)