

# Primena suve metode X-Ray senzorskog sortiranja/ prečišćavanja uglja – lignita sa površinskog kopa uglja „GACKO“

## Application of Dry Method of X-Ray Sensor Sorting /Enrichment of Lignite from Open Pit of Coal „GACKO“

Prof. Dr Aca Jovanović, dipl.ing. \*, Dr Mile Bugarin, dipl.ing. \*\*, Miodrag Šešlija, dipl.ing. \*\*\*

\* GLOBAL Innovation Projects d.o.o, Dušana Vukasovića 37, 11070 Novi Beograd & Fakultet za projektni i inovacioni menadžment, Bože Jankovića 14, 11.000 Beograd, Srbija

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

\*\*\* RITE „GACKO“, Gračanica bb, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina

**Apstrakt** – Ovaj rad razmatra rezultate laboratorijskih ispitivanja i poluindustrijskih proba prečišćavanja uglja – lignita primenom X-Ray senzorske tehnologije sortiranja na osnovu kojih su definisani tehnološki parametri za izradu GRP- Glavnog rudarskog projekta pripreme i tretmana uglja – lignita koji se eksploatiše iz slojevitog ležišta uglja. Takođe, u radu su prikazana tehnološko-tehnička rešenja data u GRP-u. Razmatrana tehnologija X-Ray Senzorskog sortiranja se u svetu uspešno primenjuje već oko 30 godina za separaciju /sortiranje različitih polimetalčnih primarnih i sekundarnih sirovina, za tretman siromašnih rudnih ležišta kao i za sortiranje uglja iz slojevitih ležišta.

**Ključne reči** – : X-Ray Senzorsko sortiranje, Sortiranje & oplemenjivanje uglja

**Abstract** – This paper discusses the results of laboratory research and semi-industrial tests of lignite enrichment using X-Ray sensor sorting technology based on which the process parameters for the MMD - Main Mining Design of preparation and treatment of lignite exploited from stratified coal deposit. Also, the paper presents the process and technical solutions given in the MMD. The considered X-Ray Sensor Sorting technology has been successfully applied in the world for about 30 years for separation / sorting of various polymetallic primary and secondary raw materials, for treatment of poor ore deposits as well as for sorting coal from layered deposits.

**Index Terms** – X-Ray Sensor Sorting, Coal Sorting & Enrichment

### I. UVOD

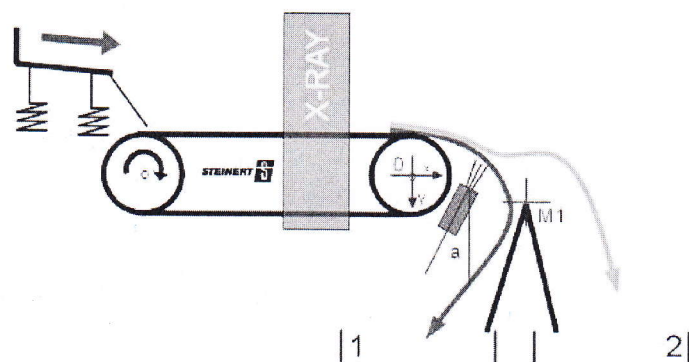
Rad se sastoji od sledećih poglavlja:

I. Uvod i opis tehnologije X-Ray senzorskog sortiranja,

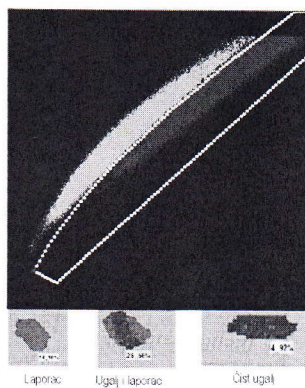
- II. Opis laboratorijskih i poluindustrijskih istraživanja mogućnosti X-Ray senzorskog sortiranja uglja,
- III. Rezultati laboratorijskih i poluindustrijskih istraživanja,
- IV. Prikaz projekta industrijskog Postrojenja za pripremu i preradu /oplemenjivanje uglja,
- V. Zaključak

Danas dostupne tehnologije senzorskog i multisenzorskog sortiranja sa sposobnošću mašinskog učenja omogućavaju da se pojedinačne čestice iz toka materijala mogu posebno analizirati i sveobuhvatno okarakterisati, što daje mogućnost sortiranja materijala. Takođe, tehnologija senzorskog sortiranja se koristi i za ciljanu kontrolu i praćenje tokova materijala, kao i za kontrolu rada složenih procesnih sistema.

Princip rada X-Ray senzorskog sortiranja je prikazan na slici 1. Na osnovu merenja gustine čestica, komada materijala računar odlučuje da li tu česticu treba prihvatiti kao korisni materijal ili je odbaciti kao jalovinu.



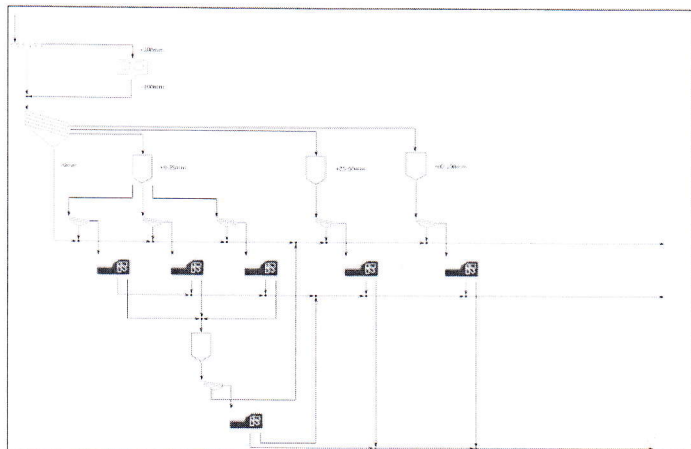
a) Uredjaj za X-Ray senzorsko sortiranje



b) Kalibraciona kriva

Slika 1. Princip rada X-Ray senzorskog sortiranja

Senzorsko sortiranje mineralnih sirovina (metaličnih i nemetaličnih) se i dalje smatra kao proces sa malim kapacitetom koji nije pogodan za rudnike sa velikim kapacitetom iskopavanja. Međutim, ostvariva vizija i trenutni cilj za X-Ray senzorsko sortiranje mineralnih sirovina je kapacitet od oko 5.000 t/h, gde se, na primer, ova tehnologija može primeniti na predkoncentraciju rude bakra sa sadržajem od 0,15% Cu [3] i [4]. Osnovna tehnološka šema postrojenja za X-Ray senzorsko sortiranje različitih mineralnih sirovina, uključujući i ugalj je prikazana na slici 2, dok su tehnički dostižnim kapaciteti za različite vrste mineralnih sirovina prikazani u Tabeli 1 [5].



Slika 2. Osnovna tehnološka šema postrojenja za X-Ray senzorsko sortiranje različitih mineralnih sirovina

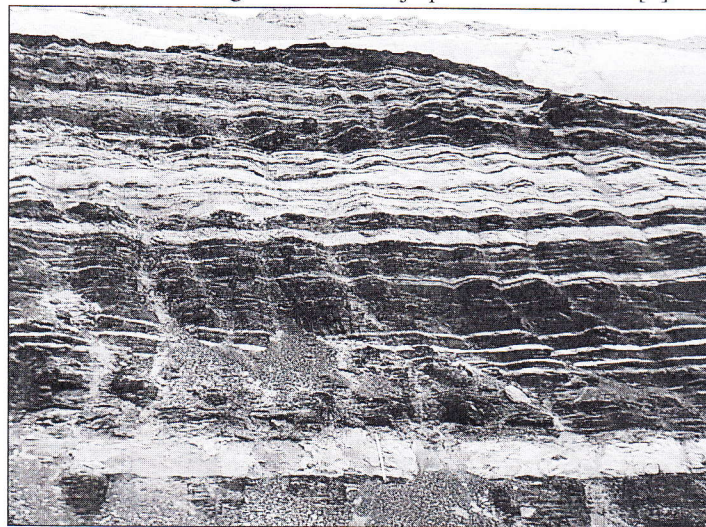
Tabela 1. Današnji dostižni kapacitet postrojenja za X-Ray senzorsko sortiranje

No.	Mineralna sirovina /Ruda	Specifična gustina (t/m <sup>3</sup> )	Sitnež -9 mm (%wt)	Kapacitet postrojenja(t/h)
1.	Ugalj	2.0	50	1,500
2.	Fosfat (Apatite)	2.1	40	1,313
3.	Obojeni metali (Cu, Zn, Sn)	2.8	30	1,500
4.	Ruda gvoždja (Hematite)	5.2	25	2,600

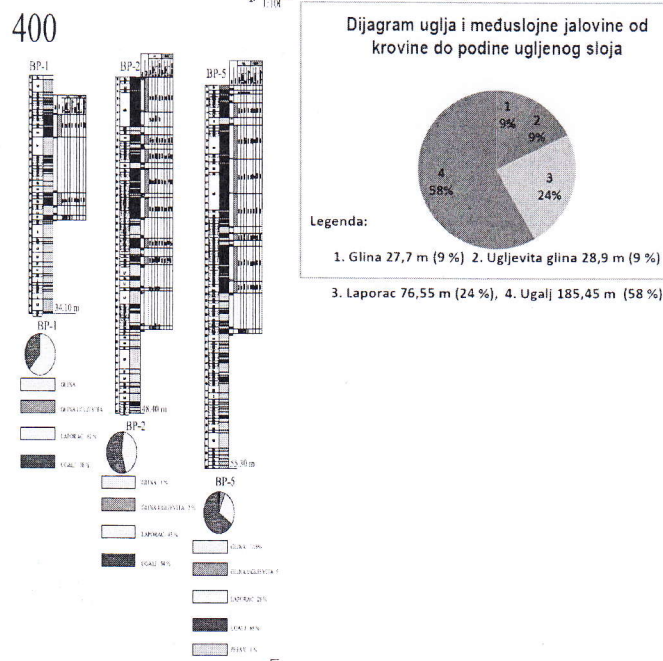
## II. OPIS ISTRAŽIVANJA

Istraživanja mogućnosti prečišćavanja / oplemenjivanja uglja iz slojevitog ležišta uglja „Gacko“, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina. su vršena u periodu od 2015. do 2020. god. [6, 7, 8].

Tipični izgled slojevitog ležišta uglja prikazana je na slici 3, dok su rezultati istražnih geoloških bušenja prikazani na slici 4 [6].



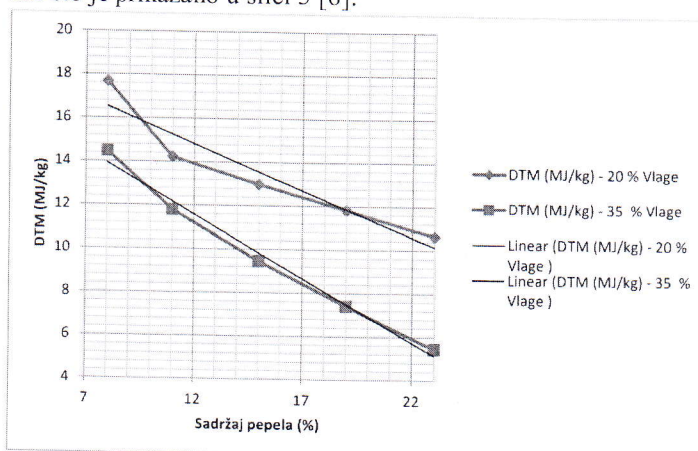
Slika 3. Slojevito ležište uglja



Slika 4. Rezultati istražnih geoloških bušenja

Pojave slojeva jalovine (laporac, ugljevita glina i glina) direktno utiču na toplotnu moć uglja, što je njegova najvažnija karakteristika i određuje njegovu primenu i cenu. Toplotna moć uglja zavisi od tipa uglja koji je definisan metodom njegovog formiranja, sadržaja vlage i sadržaja pepela. Pepeo u uglju potiče delimično iz samog uglja a većim delom od jalovine. Izvršena

laboratorijska ispitivanja reprezentativnog uzorka uglja- lignita pokazala su direktnu zavisnost vrednosti DTM – Donje toplotne moći od sadržaja pepela u uzorcima uglja i njegove vlažnosti, kao što je prikazano u slici 5 [6].

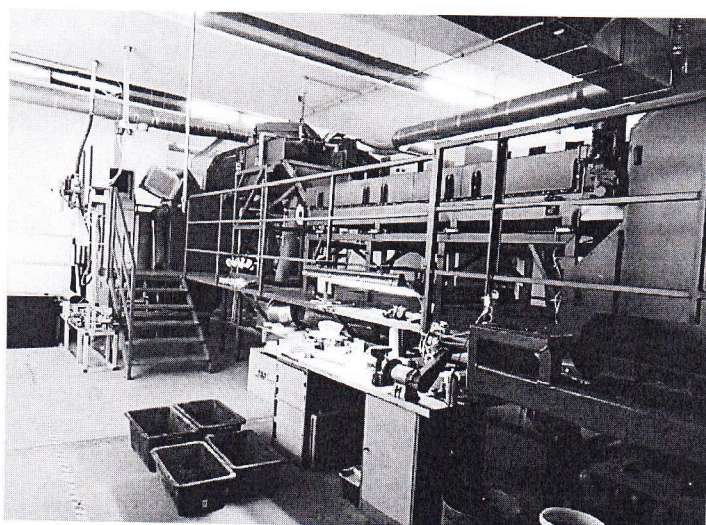


Slika 5. Zavisnost toplotne moći uglja od sadržaja pepela i vlage

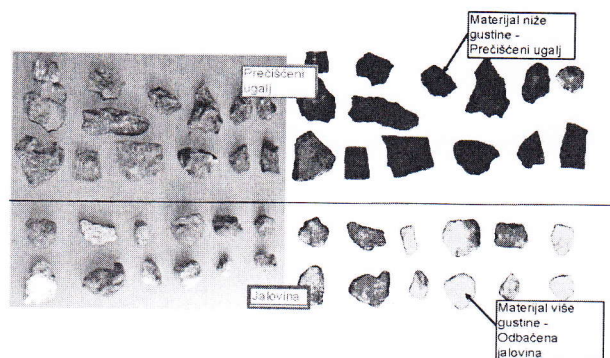
Generalno, ustanovljeno je da se DTM-Donja toplotna moć razmatranog uglja- lignita smanjuje za  $\Delta DTM = 0,4-0,5$  MJ/kg za svaki procenat povećanja sadržaja pepela u uglju. DTM se može povećati ili smanjenjem sadržaja pepela u uglju ili smanjenjem njegove vlage.

Smanjenje vlage u uglju se može postići njegovim sušenjem, pri čemu je neophodno potrošiti više energije nego što će se vratiti kroz povećanja DTM uglja, tako da je ova metoda opravdana ako je dostupna otpadna toplota. Smanjenje sadržaja pepela u uglju se može postići, između ostalog i suvim metodama X-Ray senzorskog sortiranja, odnosno, uklanjanjem neorganskih materijala (laporac, glina, ugljevita glina) iz toka uglja.

Poluindustrijsko X-Ray senzorsko sortiranje uglja na industrijskom uređaju je prikazano na slici 6, dok je postupak kalibracije uređaja prikazan na slici 7 [8].



Slika 6. Poluindustrijsko postrojenje za X-Ray senzorsko sortiranje



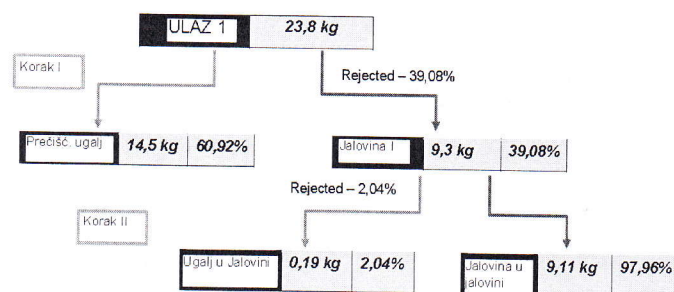
Slika 7. Postupak kalibracije uređaja pre poluindustrijske probe

### III REZULTATI ISTRAŽIVANJA – POLUINDUSTRIJSKOG TESTA

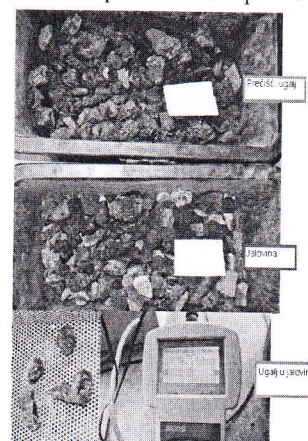
U poluindustrijskom postrojenju su izvršena ukupno 10 testiranja, i to: testirana su 2 uzorka uglja (Uzorak S1 i S2) iz različitih delova eksploatacionog polja, po dve separisane frakcije iz svakog uzorka i tako dobijeni uzorci su testirani sa po 2 različita podešavanja X-Ray uređaja, pri čemu su izvršena 2 probna testiranja (TEST 1 i TEST 2) i osam radnih testiranja (TEST 3- TEST 10).

Na slikama 8 i 9 su prikazani rezultati tehnološke probe „TEST 3“ koja je sprovedena sa podešavanjem uređaja „Setting 1“, što je rezultovalo izdvajanjem veće količine jalovine. Svi svi rezultati su preuzeti iz [8].

Raspodela masa probe „TEST 3“ je prikazana na slici 8, dok su proizvodi sortiranja prikazani na slici 9.



Slika 8. Šema raspodele mase probe „TEST 3“



Slika 9. Proizvodi sortiranja probe „TEST 3“

Sumarni pregled bilansa masa X-Ray senzorskog sortiranja uoraka S1 i S2 je prikazan u tabeli 2.

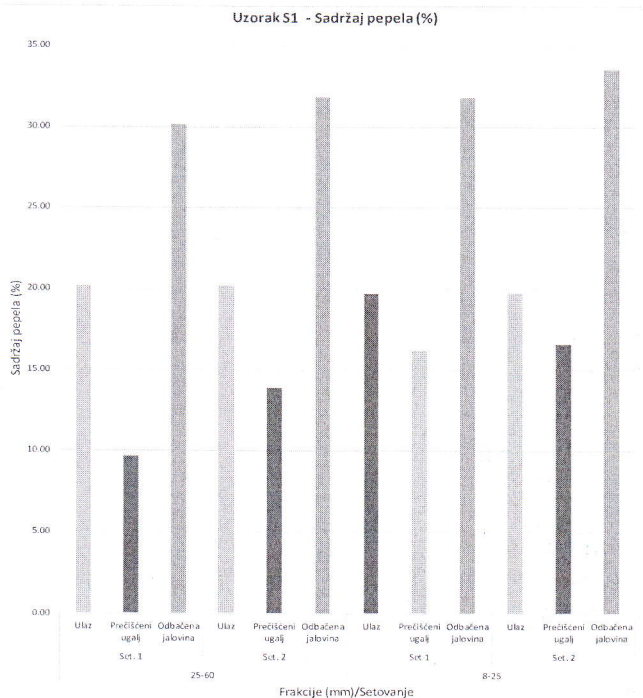
Tabela 2. Sumarni pregled masa X-Ray senzorskog sortiranja

R.Br.	TEST No:	Uzorak	Frakcija (mm)	Setovanje No	Količina (kg)			Količina (%)		
					Ukupno	Proizvod (prečišćeni uglji)	Odbačeno (jalovina)	Ukupno	Proizvod (prečišćeni uglji)	Odbačeno (jalovina)
1	T3	S1	30-60	Set.1 (Više jalov.)	53.1	29.2	23.9	100	55	45
2	T4		30-60	Set.2 (Manje jalov.)	46.7	34	12.7	100	73	27
3	T5		10-30	Set.1 (Više jalov.)	48.9	29.9	19	100	61	39
4	T6		10-30	Set.2 (Manje jalov.)	25.1	19.7	5.4	100	78	22
5	T7	S2	30-60	Set.3 (Više jalov.)	57.9	42.2	15.7	100	73	27
6	T8		30-60	Set.4 (Manje jalov.)	63.7	37.4	26.3	100	59	41
7	T9		10-30	Set.3 (Manje jalov.)	49.4	42.6	6.8	100	86	14
8	T10		10-30	Set.4 (Više jalov.)	47.3	37.1	10.2	100	78	22

Rezultati laboratorijskih analiza proizvoda X-Ray senzorskog sortiranja uzorka S1 su prikazani u tabeli 3 i na slici 10.

Tabela 3: Rezultati laboratorijskih analiza proizvoda senzorskog sortiranja Uzorka S1

R. br.	Uzorak No	Frakcija (mm)	Ukupna vlaga (%)	Setovanje No	Materijal	Sadržaj pepela (%)	DTM (Mj/kg)	Količina (kg)
1	T3-0	25-60	35	Set. 1	Uglaz	20.20	6.58	55
2	T3-1				Prečišćeni uglji	9.66	12.17	29.2
3	T3-2				Odbačena jalovina	30.18	7.7	23.9
4	T4-0			Set. 2	Uglaz	20.2	6.58	46.7
5	T4-1				Prečišćeni uglji	13.89	10.21	34
6	T4-2				Odbačena jalovina	31.83	1.27	12.7
7	T5-0	8-25	35	Set. 1	Uglaz	19.71	7.24	48.9
8	T5-1				Prečišćeni uglji	16.21	11.3	29.9
9	T5-2				Odbačena jalovina	31.84	1.78	19
10	T6-0			Set. 2	Uglaz	19.71	7.24	25.1
11	T6-1				Prečišćeni uglji	10.61	8.73	19.7
12	T6-2				Odbačena jalovina	33.57	0.79	5.4

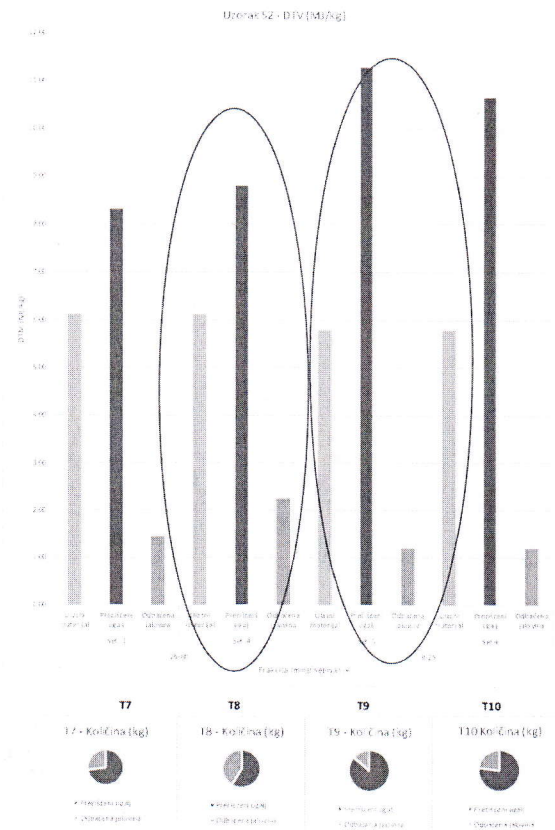


Slika 10. Sadržaj pepela i DTM proizvoda sortiranja uzorka S1

Rezultati laboratorijskih analiza proizvoda X-Ray senzorskog sortiranja uzorka S2 su prikazani u tabeli 4 i na slici 11.

Tabela 4: Rezultati laboratorijskih analiza proizvoda senzorskog sortiranja Uzorka S2

R. br.	Uzorak No	Frakcija (mm)	Ukupna vlaga (%)	Setovanje No	Materijal	Sadržaj pepela (%)	DTM (Mj/kg)	Količina (kg)	Količina (%)
1	T7-0	25-60	35	Set. 3	Ulazni materijal	29.56	6.10	57.9	100
2	T7-1				Prečišćeni uglji	25.7	8.32	42.2	73
3	T7-2				Odbačena jalovina	42.62	1.44	15.7	27
4	T8-0			Set. 4	Ulazni materijal	29.56	6.1	63.7	100
5	T8-1				Prečišćeni uglji	23.95	8.8	37.4	59
6	T8-2				Odbačena jalovina	42.36	2.26	26.3	41
7	T9-0	8-25	35	Set. 3	Ulazni materijal	33.57	5.78	49.4	100
8	T9-1				Prečišćeni uglji	13.42	11.29	42.6	86
9	T9-2				Odbačena jalovina	43.56	1.21	6.8	14
10	T10-0			Set. 4	Ulazni materijal	33.57	5.78	47.3	100
11	T10-1				Prečišćeni uglji	19.01	10.67	37.1	78
12	T10-2				Odbačena jalovina	44.06	1.2	10.2	22



Slika 11. Sadržaj pepela i DTM proizvoda sortiranja uzorka S2

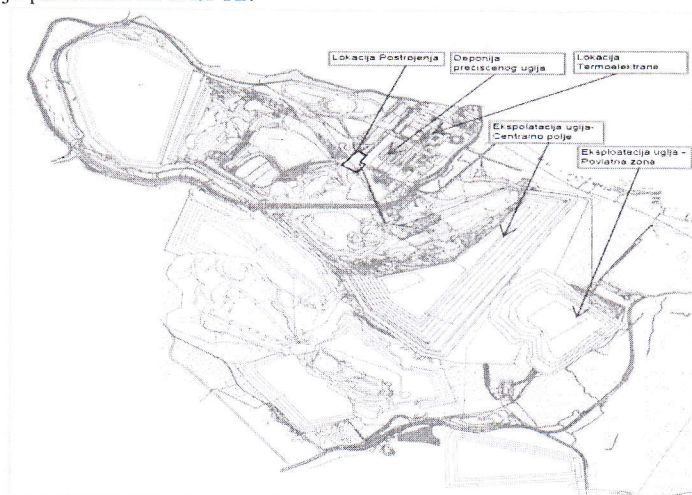
Generalni zaključci koji se mogu izvesti na osnovu sprovedenog testiranja su:

- X-Ray senzorsko sortiranje / oplemenjivanje uglja – lignita iz polvatne zone i krovinskih serija Centralnog eksploatacionog polja je moguće i pokazalo je zadovoljavajuće rezultate i za frakciju -60 + 25 mm i za frakciju -25 + 8 mm,

- Podešavanje parametara sortiranja, u zavisnosti od kvaliteta ulazne sirovine – uglja je moguće i u toku rada Postrojenja,
- Preporučene ulazne frakcije uglja za industrijku primenu su: -60 + 25 mm i -25 + 8 mm,
- Minimalna prihvatljiva veličina zrna materijala za sortiranje X-Ray senzorskom metodom sortiranja je 8 mm, i
- Postignuti rezultati tokom testiranja uzoraka uglja su dostižni i u industrijkoj primeni.

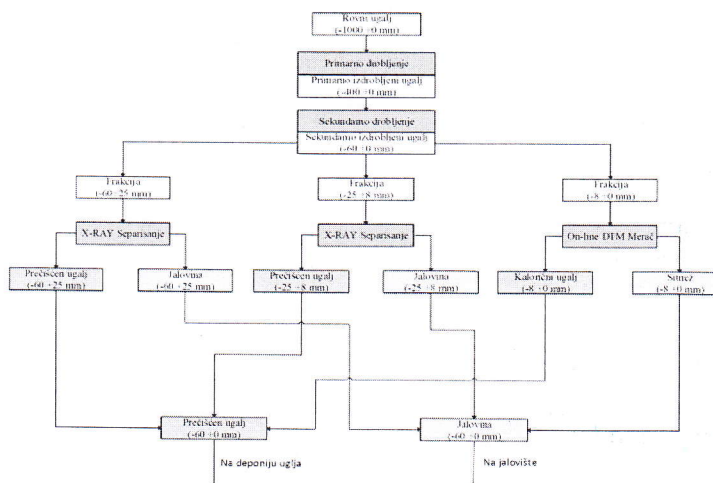
#### IV PRIKAZ PROJEKTA INDUSTRIJSKOG POSTROJENJA

Sva tehnička rešenja Postrojenja za pripremu i oplemenjivanje uglja su preuzeta iz [9]. Makro lokacija budućeg Postrojenja za oplemenjivanje uglja u odnosu na ležišta uglja i termoelektranu je prikazana na slici 12.



Slika 12. Makrolokacija Postrojenja za oplemenjivanje uglja

Blok dijagram kompletnog procesa pripreme i prečišćavanja /oplemenjivanja uglja je prikazan na slici 13.



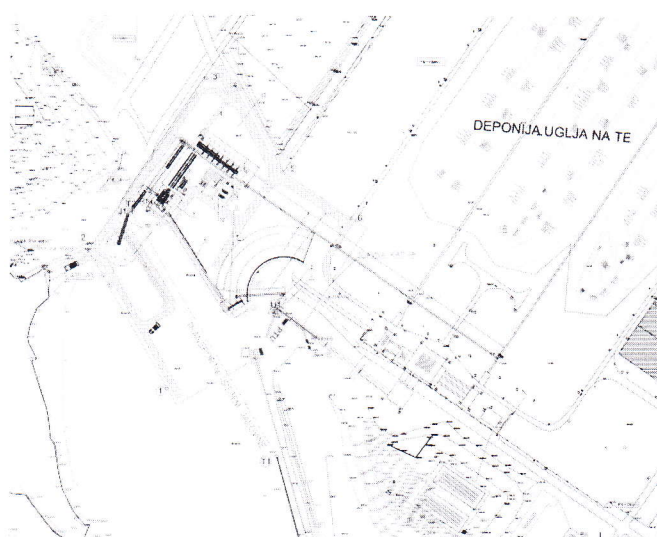
Slika 13. Blok dijagram procesa pripreme i oplemenjivanja uglja

Osnovni parametri rada Postrojenja pripreme i oplemenjivanje uglja za fornd radnih sati od 5000 h/god su dati u tabeli 5.

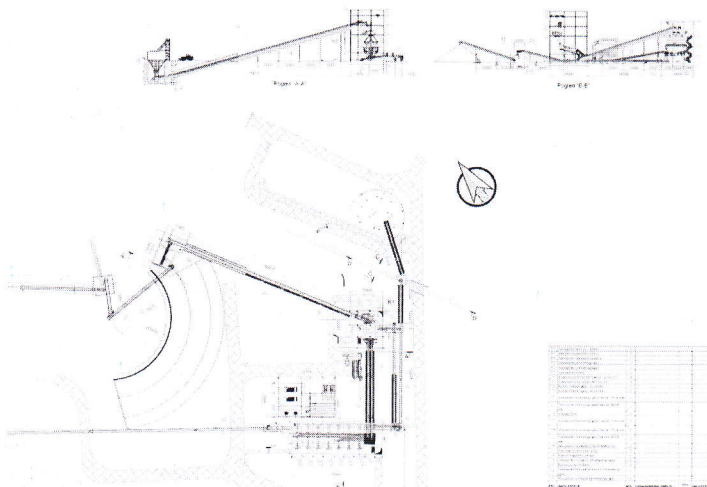
Tabela 5. Osnovni parametri rada Postrojenja

Proizvodi	Jed.mere	Scenario I: Tg= 5.000 h/god	
		Prema uzorku S1	Prema uzorku S2
Ukupno rovnog uglja (t/god)	(t/god)	3.265.306	3.265.306
Ulazni kapacitet postrojenja (t/h)	(t/h)	653	653
Odbačena sitnež (-8 + 0 mm)	(t/h)	196	196
	(t/god)	979.592	979.592
Odbačena jalovina (-60 + 8 mm)	(t/h)	137	137
	(t/god)	685.714	685.714
Ukupno odbačeno	(t/h)	333	333
	(t/god)	1.665.306	1.665.306
Prečišćeni ugali	(t/h)	320	320
	(t/god)	1.600.000	1.600.000
	(MJ/kg)	10,3	10,0
	(TJ/god)	16.522.449	16.032.654

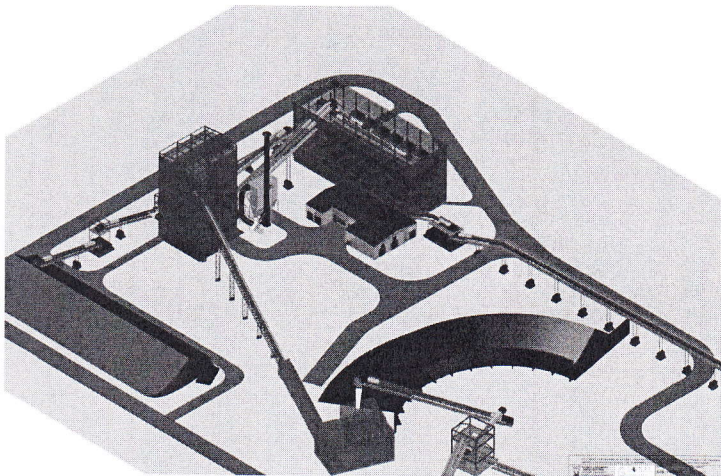
Situacioni plan Postrojenja za pripremu i oplemenjivanje uglja je prikazan na slici 14, dispoziciono rešenje sa glavnim preseccima je prikazano na slici 15, dok je 3D model Postrojenja prikazan na slici 16.



Slika 14. Situacioni plan Postrojenja za pripremu i oplemenjivanje uglja



Slika 15 Dispozicioni prikaz Postrojenja za pripremu i oplemenjivanje uglja



Slika 17. 3D crtež Postrojenja za pripremu i oplemenjivanje uglja

## V. ZAKLJUČAK

Ovaj rad predstavlja prikaz mogućnosti korišćenja tehnologije X-Ray senzorskog sortiranja /oplemenjivanja uglja -lignita na nivou industrijske primene. Poluindustrijska ispitivanja uzoraka iz krovinskih raslojenih ugljenih serija pokazalo je zadovoljavajuće rezultate i za frakciju -60 + 25 mm i za frakciju -25 +8 mm. Postrojenja za pripremu i oplemenjivanje uglja, a i ostalih mineralnih sirovina već dotižu kapacitete od 1000 t/h, pri čemu se može reći da ova tehnologija još nije dostigla svoj maksimum i da će nastaviti da se razvija.

Takođe, razvoj i primena ovih novih tehnologija omogućava ekonomsku eksploataciju ležišta uglja koja su tretirana kao vanbilansna ili čak "zaboravljena".

## VI. LITERATURA

- [1] A. Jovanović, A. Jungmann, M. Bugarin, Possibility of Lignite Enrichment by Dry X-ray Sensor Sorting Technology, 48th International October Conference on Mining and Metallurgy, Bor, Serbia, 2016, pp. 212 -215.
- [2] A. Jovanović, M. Bugarin, A. Jungmann, Possibility of Coal Enrichment by Dry Process of Concentration, 1st International Symposium: Investment and

New Technologies in Energy and Mining, Šabac, Serbia, 2016, pp. 118-127.

- [3] Ch. Robben, A. Takala, High Volume Sensor Ore Sorting Solutions, 8th Sensor Based Sorting & Control, Aachen, Germany, 2018, pp. 13-19.
- [4] S. Nadolsky, M. Samuels, B. Klein, C. Hart, Evaluation of Bulk and Particle Sensor -Based Sorting Strategies for the New Afton Block Caving Operation, 8th Sensor Based Sorting & Control, Aachen, Germany, 2018, pp. 103-104.
- [5] A. Jovanovic, M. Bugarin, . Application of the Sensor Sorting Technique in Processing of Primary and Secondary Raw Materials, the 50th International October Conference of Mining and Metallurgy, Bor, Plenary Lecture, Serbia, 2018)
- [6] \*\*\*\* Poluindustrijska proba i definisanje tehnoloških parametara za industrijsku primenu suvog postupka separacije / oplemenjivanja uglja sa Površinskog kopa "Gacko"-Centralno polje za kapacitet od 600 t/h romnog uglja, Institut za rudarstvo i metalurgiju, Bor, GLOBAL Innovation Projects d.o.o, Beograd, CALA GmbH, Aachen, 2015.
- [7] \*\*\*\*\* Strategija rudarsko-tehnološkog otvaranja, razrade, optimizacije i održavanja kontinuiteta proizvodnje uglja sa izradom Studije opravdanosti uvođenja postupka suve separacije u cilju poboljšanja ekonomskih efekata rada rudnika, Institut za rudarstvo i metalurgiju, Bor, GLOBAL Innovation Projects d.o.o, Beograd, 2015.
- [8] \*\*\*\*\*Industrijsko ispitivanje sortiranja/ oplemenjivanja uglja krovinske ugljene serije i krovinskih litoloških članova ugljenih slojeva centralnog eksploatacionog polja, Institut za rudarstvo i metalurgiju, Bor, GLOBAL Innovation Projects d.o.o, Beograd, CALA GmbH , Aachen, 2019.
- [9] \*\*\*\*\* GRP – Glavni rudarski projekat pripreme i oplemenjivanja uglja i izgradnje postrojenja za oplemenjivanje uglja metodom Suve X- Ray senzorske separacije na Površinskom kopu "Gacko" – Centralno polje, Institut za rudarstvo i metalurgiju, Bor, GLOBAL Innovation Projects d.o.o, Beograd, 2020/2021. god.

## AUTORI

**Prvi Autor** – Aca Jovanović, Dr dipl.ing.maš, GLOBAL Innovation Projects d.o.o, Beograd, [aca.jovanovic@globalinnovation.rs](mailto:aca.jovanovic@globalinnovation.rs)

**Drugi Autor** – Mile Bugarin, Dr dipl.ing.geol., Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, [mile.bugarin@irmbor.co.rs](mailto:mile.bugarin@irmbor.co.rs)

**Treći autor** – Miodrag Šeslija, dipl.ing.rud., RiTE „GACKO”, [miodrag.seslija@ritegacko.com](mailto:miodrag.seslija@ritegacko.com).

**Kontakt osoba** – Aca Jovanović, Dr dipl.ing.maš. , GLOBAL Innovation Projects d.o.o, Beograd, [aca.jovanovic@globalinnovation.rs](mailto:aca.jovanovic@globalinnovation.rs), 011 319 02 51/616 71 30