



[www.ror.edu.rs](http://www.ror.edu.rs)

UDK: 628.477.6:621.315.2

## KONTROLA EFIKASNOSTI ELEKTROSTATIČKE SEPARACIJE OTPADNIH BAKARNIH KABLOVA RASLOJAVANJEM PROIZVODA PROCESA PO FRAKCIJAMA GUSTINA

### *CONTROL OF ELECTROSTATIC SEPARATION EFFICIENCY OF WASTE COPPER CABLE BY FLOAT - SINK ANALYSIS*

**Rodoljub Stanojlović<sup>#</sup>, Jovica Sokolović, Seka Stojanović**

Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Srbija

**IZVOD** – Recikliranjem otpadnih bakarnih kablova primenom elektrostatičkog separatora “Eriez” ostvareni su pozitivni tehnološki rezultati. Pri definisanim tehnološkim parametrima u opitu elektrostatičke separacije ostvareno je maseno iskorišćenje provodnog proizvoda,  $I_{pp}=68,99\%$ , sa sadržajem bakra u istom od  $88,35\%$ . Istovremeno, iskorišćenje neprovodnog proizvoda, plastike, iznosilo je  $I_{np}=7,32\%$ , sa maksimalnim kvalitetom proizvoda. Međuproizvod procesa separacije zastupljen je sa  $23,69\%$  mase tretirane otpadne sirovine, sa učešćem od  $3,12\%$  bakra i  $20,57\%$  plastike.

Rezultati separacije prezentovani standardnim tehnološkim pokazateljima, iskorišćenjima i kvalitetom dobijenih proizvoda ne daju potpunu informaciju o efikasnosti procesa, time i mogućnost adekvatne kontrole i regulacije. Komponente sadržane u otpadnim bakarnim kablovima, bakar i plastika, pored razlike u provodnosti električne energije veoma se razlikuju i po gustinama. Komparativnost provodnosti i gustine, kao karakteristika bakra i plastike, sa stanovišta rezultata razdvajanja na elektrostatičkom separatoru, daju mogućnost primene postupka analize po frakcijama gustina proizvoda separacije, kao metode za bolju kontrolu, a time i regulaciju procesa.

Primenom postupka analize po frakcijama gustina proizvoda elektrostatičke separacije konstatovano je tehnološko iskorišćenje bakra u provodnom proizvodu,  $I_{Cu}=98,8\%$ , kao i distribucija istog u međuproizvodu  $1,2\%$ , i neprovodnom proizvodu  $0\%$ . Iskorišćenje plastike u neprovodnom proizvodu iznosi  $I_p=19,10\%$ , a raspodela iste u međuproizvodu i provodnom proizvodu iznosi  $59,92\%$ , odnosno  $20,98\%$ , respektivno. Granulometrijskom analizom proizvoda separacije, kao i pojedinih komponenata sadržanih u provodnom, neprovodnom i međuproizvodu, dobijene su informacije o uticaju granulometrijskog sastava kako sirovine tako i pojedinih komponenata na efikasnost elektrostatičke separacije.

**Ključne reči:** reciklaža, otpadni bakarni kablovi, elektrostatička separacija

**ABSTRACT** - *The recycling of waste copper cable using an "Eriez" electrostatic separator achieved positive technological results. In the electrostatic separation experiments with defined technological parameters was achieved a mass recovery of conductive products,  $IPP = 68.99\%$ ,*

<sup>#</sup>Kontakt adresa autora: Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor, Srbija. E-mail: [rstanjlovic@tf.bor.ac.rs](mailto:rstanjlovic@tf.bor.ac.rs)

with the copper content of 88.35%. At the same time, recovery of non-conducted products, plastic, was achieved  $I_{np} = 7.32\%$ , with maximum quality products. Intermediate product of separation process is represented with mass recovery 23.69% of treated waste materials, with content of 3.12% copper and 20.57% of plastic.

The separation results presented with standard technology indicators, recovery and quality of final products, do not provide complete information on the effectiveness of the process and at the same time the possibility of adequate control and regulation. The components that are contained in the waste copper cables, copper and plastic, are very different both in the conductivity of electricity and the density. Comparison of the conductivity and density of copper and plastic, from the point of separation results on the electrostatic separator, give the possibility of applying the float-sink analysis procedure, as well as methods for better control, and thus the regulation process.

The application of the float-sink analysis of final electrostatic separation products was noted a recovery of conductive copper product about  $I_{Cu} = 98.8\%$ . Copper recovery of intermediate and non-conductive products were about 1.2% and 0%, respectively. Recovery of the non-conductive plastic product was  $I_p = 19.10\%$ , with plastic distribution in the intermediate and conductive product were 59.92% and 20.98%, respectively. Granulometric analysis of final products of separation, as well as individual components which are contained in the conductive, non-conductive and intermediate products, can be obtained information about the effect of particle size of both raw materials and certain components on the efficiency of electrostatic separation.

**Keywords:** recycling, waste copper cable, electrostatic separation

## 1. UVOD

Recikliranje otpadnih bakarnih kablova je ekonomski profitabilan i ekološki opravdan tehnološki postupak. Elektrostatička separacija je jedna od savremenih metoda razdvajanja bakra od pratećih komponenata, zasnovana na razlici u provodnosti električne energije. Standardni tehnološki pokazatelji, iskorišćenje i kvalitet dobijenog proizvoda često ne daju dovoljno informacija o efikasnosti separacionih procesa, a time i mogućnost adekvatne kontrole, regulacije i optimizacije procesa. Ova konstatacija važi i za savremene elektrostatičke procese separacije. Pokazatelji rada uređaja, oština razdvajanja, definisana preko verovatnog odstupanja,  $E_p$ , procenta zalutalih zrna, Egares, podeone veličine parametra u funkciji kojeg se razdvajanje vrši, daju mogućnost, kako boljeg razumevanja procesa separacije, analitičnijeg sagledavanja uticaja relevantnih parametara, tako i adekvatnije kontrole i regulacije procesa. Komponente sadržane u otpadnim bakarnim kablovima, bakar i plastika, pored razlike u provodnosti električne energije, veoma se razlikuju i po gustinama. Postojeća komparativnost provodnosti i gustine, kao karakteristika bakra i plastike, sa aspekta ponašanja i rezultata razdvajanja u procesu elektrostatičke separacije, omogućavaju primenu postupka analize po frakcijama

gustina proizvoda separacije, kao metode za bolju identifikaciju efikasnosti procesa, kontrolu i regulaciju istog.

Raslojavanjem sirovine, otpadnih bakarnih kablova po frakcijama gustina dolazi se do pouzdanijih informacija o separabilnosti komponenata, kao i stepenu međusobne oslobođenosti kao preduslova uspešne separacije.

Kod realnih sirovina, kod kojih u manjoj ili većoj meri nije ostvarena apsolutna oslobođenost komponenata, primenom postupka analize po frakcijama gustina, stvara se mogućnost kontrole procesa separacije sa aspekta oštine razdvajanja,  $E_p$ , procenta zalutalih zrna, Egares, kao i podeone gustine razdvajanja  $\rho_p$ . Na osnovu ovih pokazatelja rada uređaja i ostvarenih tehnoloških rezultata, iskorišćenja i kvaliteta dobijenih proizvoda, u mogućnosti smo da vršimo adekvatnu kontrolu i regulaciju procesa uz optimizaciju relevantnih parametara.

Ukoliko su komponente u sirovini potpuno oslobođene, kao na primeru tretiranih otpadnih bakarnih kablova, tehnološki rezultati elektrostatičke separacije nisu uslovljeni separabilnošću sirovine, jer je ista idealna, već određenim tehničko-tehnološkim parametrima koji se mogu identifikovati, kontrolisati i regulisati. Identifikacija tehničkih i tehnoloških mogućnosti uređaja, adekvatnost definisanih tehnoloških

parametara i odgovarajuća pripremljenost sirovine za proces elektrostatičke separacije u velikoj meri se mogu konstatovati primenom postupka raslojavanja proizvoda separacije po frakcijama gustina i analizom dobijenih rezultata.

## 2. KARAKTERIZACIJA OTPADNIH BAKARNIH KABLOVA

Sirovina na kojoj su vršena laboratorijska ispitivanja su otpadni bakarni kablovi sa plastičnom izolacijom, korišćeni za prenos niskonaponske električne energije. Priprema uzoraka za istraživanja podrazumeva usitnjavanje sirovine do potpune oslobođenosti, ggk 5

mm, odstranjivanje klase – 0,075 mm, homogenizaciju, skraćivanje i uzorkovanje polaznih uzoraka za opite elektrostatičke separacije.

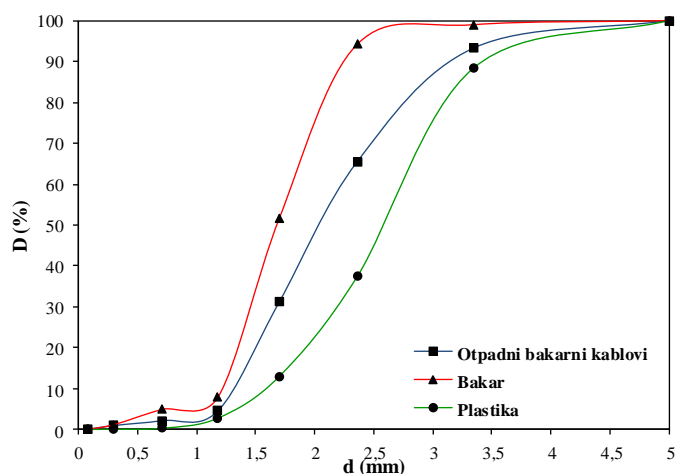
### 2.1. Granulometrijski sastav

Analiza granulometrijskih sastava uzoraka izvršena je suvim prosejavanjem na sitima raspona krupnoće od 5,00 mm do 0,075 mm. Sitovne analize su vršene na integralnom uzorku otpadnih bakarnih kablova, kao i uzorcima sadržanih komponenata, bakru i plastici.

Rezultati sitovnih analiza prikazani su u tabeli 1, a krive granulometrijskih sastava dijagramima na slici 1.

Tabela 1. Rezultati analiza granulometrijskih sastava

Klasa krupnoće d [mm]	Otpadni bakarni kablovi		Bakar		Plastika	
	m [%]	D [%]	m [%]	D [%]	m [%]	D [%]
– 5 + 3,35	6,65	100,00	0,99	100,00	11,48	100,00
– 3,35 + 2,36	27,85	93,35	4,79	99,01	51,12	88,52
– 2,36 + 1,7	34,3	65,5	42,57	94,22	24,41	37,4
– 1,7 + 1,18	26,65	31,2	43,77	51,65	10,22	12,99
– 1,18 + 0,71	2,38	4,55	2,95	7,88	2,48	2,77
– 0,71 + 0,3	1,20	2,17	3,75	4,93	0,27	0,29
– 0,3 + 0,075	0,97	0,97	1,18	1,18	0,02	0,02
	100,00		100,00		100,00	



Slika 1. Krive granulometrijskih sastava

Rezultati istraživanja pokazuju da se usitnjavanjem otpadnih bakarnih kablova do definisane ggk 5 mm, stvara proizvod sa dominantnim učešćem srednjih klasa krupnoće, – 3,35 + 1,18 mm, od preko 80 %. Takođe treba istaći da bakar, kao komponenta sadržana u ovoj otpadnoj sirovini ima nešto veći afinitet prema usitnjavanju, u odnosu na plastiku, tako da je u integralnom proizvodu procesa usitnjavanja zastupljen u

nešto finijim granulacijama, – 2,36mm, u odnosu na plastiku koja je dominantno zastupljena u krupnozrijem obliku, + 1,18 mm.

### 2.2. Gustina

Shodno potpunoj oslobođenosti komponenata, bakra i plastike u otpadnoj sirovini, kao i poznatim gustinama, bakra,  $\rho_{Cu}=8900 \text{ kg/m}^3$  i plastike  $\rho_{Pl}=1350$

kg/m<sup>3</sup>, raspodela otpadnih bakarnih kablova po frakcijama gustina izvršena je u tetrabrometanu TBE, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>Br<sub>4</sub>, gustine  $\rho = 2960 \text{ kg/m}^3$ . Rezultati raslojavanja integralnog uzorka otpadnih bakarnih kablova prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati raslojavanja

Gustina $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	m (g)	m (%)
- 2960	215,52	35,92
+ 2960	384,48	64,08
	600,00	100,00

Razdvajanjem integralnog uzorka po frakcijama gustina dobijeni su proizvodi, teška frakcija + 2960 kg/m<sup>3</sup> sa apsolutno čistim bakrom i laka frakcija – 2960 kg/m<sup>3</sup> u kojoj je distribuirana plastika. Pored većeg zapreminskog učešća plastike i vizuelnog utiska da je zastupljenija, rezultati istraživanja pokazuju veću mase-

nu zastupljenost bakra, približno 58 %, prema 42%.

### 2.3. Oprema korišćena u eksperimentima

Granulometrijska analiza uzoraka vršena je prosejavanjem otpadne sirovine proizvoda separacije i komponenata, bakra i plastike, suvim postupkom, na standardnoj seriji sita "Tyler", veličine otvora od 5mm do 0,075 mm.

Gustine komponenata, bakra i plastike određena je primenom postupka staklenog piknometra, a raslojavanje sirovine po frakcijama gustina, vršeno je u tetrabrometanu, primenom metode pliva-tone, PT.

Eksperimentalna istraživanja elektrostatičke separacije vršena su na separatoru tipa "Eriez", laboratorijski visokonaponski elektrostatički separator model ESP-14/01S, slika 2.



Slika 2. Elektrostatički separator "ERIEZ" model ESP-14/01S

### 2.4. Istraživanja

Prva faza istraživanja odnosi se na teoretsko određivanje gornje granične krupnoće bakra, koja se može izdvojiti na elektrostatičkom separatoru. Teoretska izračunavanja ggk vršena su za čestice bakra, sferičnog oblika u funkciji jačine električnog polja, E, promene obrtaja bubnja (elektrode),  $\omega$ , i veličine ugla između bubnjaste i otklanjajuće elektrode,  $\alpha$ . Pri datim promenljivim, primenom relacije (1) [2, 4, 6] dobijene su sledeće računске vrednosti, tabela 3.

$$r_0 = \frac{17,2 \cdot \epsilon \cdot E^2}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \rho \cdot (g \cdot \sin \theta - \omega^2 \cdot R)} \quad (1)$$

gde su:

$r_0$  – poluprečnik čestice bakra, [ $\mu\text{m}$ ]

$\epsilon$  – dielektrična propustljivost sredine – vazduha, (1,00059)

E – jačina električnog polja, [V/m]

$\rho$  – gustina bakra, ( $8,9 \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ )

g – gravitaciono ubrzanje, ( $9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ )

$\theta$  – ugao između horizontalne ose bubnja i koronarne elektrode, ( $65 \text{ [}^\circ\text{]}$ )

$\omega$  – ugaona brzina bubnja, [rad/s]

R – poluprečnik bubnja, ( $0,18 \text{ [m]}$ )

**Tabela 3.** Računske vrednosti poluprečnika čestica bakra

Broj	$r_0$ [ $\mu\text{m}$ ]				
	$n$ [o/min]	$\alpha$ [°]	U=20 kV	U=25 kV	U=30 kV
1	40	15	3,79	5,93	8,54
2		20	5,35	8,37	12,05
3		25	7,81	12,21	17,58
4		45	52,18	81,53	117,41
5		50	90,17	140,9	202,89
6		55	150,69	235,45	339,05
7	50	15	5,5	8,59	12,37
8		20	7,76	12,12	17,46
9		25	11,32	17,69	25,48
10		45	75,61	118,15	170,13
11		50	130,67	204,17	294,01
12		55	218,36	341,18	491,3
13	60	15	12,19	19,04	27,42
14		20	17,2	26,87	38,7
15		25	25,1	39,22	56,48
16		45	167,9	261,88	377,11
17		50	289,64	452,56	651,69
18		55	484	754,25	1089,01

Analizom rezultata teoretskih izračunavanja može se konstatovati veliki uticaj odabranih tehničkih parametara na veličinu ggk čestica koje se iz otpadnih bakarnih kablova primenom elektrostatičke separacije mogu izdvojiti. Shodno teoretskim rezultatima za izvođenje eksperimenata opredelili smo se za tehničke parametre definisane u teoretskom obračunu br. 18.

Druga faza istraživanja predstavlja izvođenje eksperimenata elektrostatičke separacije pri sledećim tehničkim parametrima,  $U = 30$  (KV);  $n = 60$  ( $^{\circ}$ /min);  $\alpha = 50$  ( $^{\circ}$ ), kao i raslojavanje proizvoda separacije po frakcijama gustina.

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja su prikazani u tabelama 4 i 5.

**Tabela 4.** Rezultati elektrostatičke separacije otpadnih kablova

Parametri procesa			Proizvodi separacije								
			Provodni proizvod			Međuproizvod			Neprovodni proizvod		
U (kV)	N ( $^{\circ}$ /min)	$\alpha$ (°)	m (%)	Cu (%)	$I_{Cu}$ (%)	m (%)	Cu (%)	$I_{Cu}$ (%)	m (%)	Cu (%)	$I_{Cu}$ (%)
30	60	50	68,99	88,35	98,80	23,69	3,12	1,2	7,32	0,00	0,00

**Tabela 5.** Rezultati raslojavanja proizvoda separacije po frakcijama gustina

Gustina (kg/m <sup>3</sup> )	Proizvodi separacije								
	Provodni proizvod			Međuproizvod			Neprovodni proizvod		
	$m_k$ (%)	$m_k^u$ (%)	$m_k^{100}$ (%)	$m_k$ (%)	$m_k^u$ (%)	$m_k^{100}$ (%)	$m_k$ (%)	$m_k^u$ (%)	$m_k^{100}$ (%)
- 2960	11,65	8,04	20,99	96,88	22,95	59,91	100,00	7,32	19,10
+ 2960	88,35	60,95	98,80	3,12	0,74	1,20	0,00	0,00	0,00
	100,00	68,99		100,00	23,69		0,00	7,32	

Analizom ostvarenih tehnoloških pokazatelja elektrostatičke separacije prikazanih u tabeli 4 može se doneti generalni zaključak o efikasnoj valorizaciji bakra. Maseno iskorišćenje bakra, kao osnovne korisne komponente, od 98,80 % sa sadržajem istog u proizvodu od 88,35 % potvrđuju predhodnu konstataciju. Međutim, suštinska ocena efikasnosti rada uređaja, sa stanovišta oštine razdvajanja, kako osnovne tako i prateće korisne komponente, bakra i plastike, na osnovu prikazanih pokazatelja ne može se izvršiti. Sagledavanje i definisanje oštine rada uređaja u funkciji distribucije obe komponente u provodnom proizvodu, međuproizvodu i neprovodnom proizvodu, daju mogućnost analitičnije. Ocene rada uređaja, neophodne za adekvatnu kontrolu, regulaciju i optimizaciju u cilju ostvarivanja najboljih tehnoloških pokazatelja.

U cilju dobijanja dodatnih informacija o ostvarenoj efikasnosti elektrostatičke separacije u izvedenim eksperimentima izvršeno je raslojavanje proizvoda separacije po frakcijama gustina. Rezultati ovih istraživanja prikazani su u tabeli 5.

gde su:  $m_k$  (%) – učešće komponenta (frakcija)

u proizvodima procesa

$m_k^u$  (%) – učešće komponenta u odnosu na ulaz

$m_k^{100}$  (%) – raspodela komponenta za 100 % u ulazu

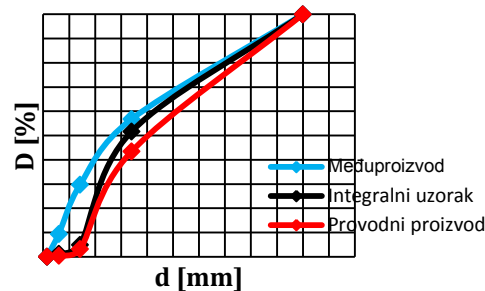
Raslojavanje proizvoda elektrostatičke separacije, provodnog proizvoda, međuproizvoda i neprovodnog proizvoda po frakcijama gustina, s obzirom na apsolutnu oslobođenost komponenta, uslovalo je idealno razdvajanje lake i teške komponente, odnosno bakra i plastike.

Dobijeni rezultati upućuju na generalni zaključak o nedovoljnoj efikasnosti procesa elektrostatičke separacije sa aspekta oštine razdvajanja. Ova konstatacija se prvenstveno odnosi na efikasnost razdvajanja plastike. Iskorišćenje bakra od 98,80 % u odnosu na ukupni sadržaj u ulaznom uzorku otpadnih bakarnih kablova je respektabilno. Efikasno izdvajanje bakra potvrđuje se rezultatima koji pokazuju da je preostalih 1,2 % zalutalo u međuproizvodu, dok neprovodni proizvod ne sadrži ovu osnovnu korisnu komponentu.

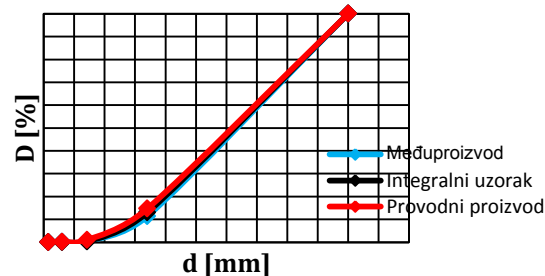
Međutim, rezultati razdvajanja plastike nisu zadovoljavajući. Raspodela plastike po proizvodima procesa separacije pokazuje veću distribuciju u provodnom nego u neprovodnom proizvodu, 20,99 %, odnosno 19,10 %, kao i dominantnu distribuciju u međuproizvodu, 59,91 %. Na osnovu ovih pokazatelja,

kao i sračunatih procenata zalutale mase pojedinih komponenta u proizvodima separacije, dobijenih na osnovu analiza po frakcijama gustina, u mogućnosti smo da kvalitetnije kontrolišemo tehnološki proces a time i utičemo na bolju regulaciju i optimizaciju parametara od kojih zavise, kako oština razdvajanja, tako i tehnološki rezultati.

U cilju dodatne kontrole efikasnosti elektrostatičke separacije otpadnih bakarnih kablova, urađene su analize granulometrijskih sastava bakra i plastike u proizvodima separacije. Rezultati ovih ispitivanja prikazani su dijagramima na slikama 2 i 3.



Slika 2. Granulometrijski sastav bakra u proizvodima elektrostatičke separacije



Slika 3. Granulometrijski sastav plastike u proizvodima elektrostatičke separacije

Rezultati granulometrijskih analiza bakra i plastike distribuiranih u pojedinim proizvodima separacije su indikativni, i sa stanovišta optimizacije procesa veoma korisni.

Očekivana veća krupnoća čestica bakra u međuproizvodu u odnosu na krupnoću bakra u integralnom uzorku i provodnom proizvodu, zbog teoretski određene vrednosti ggk, nije se ostvarila. Suprotno tome, u međuproizvodu je distribuiran bakar u sitnozrnijoj formi, dijagrami na slici 2. Za razliku od bakra, granulometrijski sastav plastike u svim proizvodima procesa elektrostatičke separacije je skoro identičan, dijagrami na slici 3.

Generalno se može zaključiti da efikasnost razdvajanja bakra, u ispitivanoj sirovini otpadnih

bakarnih kablova, u velikoj meri zavisi od granulometrijskih karakteristika ove korisne komponente. Takođe, u primenjenom tehničko-tehnološkom režimu procesa separacije granulometrijski sastav plastike nema značajniji uticaj na efikasnost razdvajanja.

Analizom rezultata eksperimentalnih istraživanja u skladu sa teorijom procesa elektrostatičke separacije, može se zaključiti sledeće:

- Veća ggk uspešno izdvojenih čestica bakra u odnosu na teoretski određene vrednosti, posledica su različitog oblika čestica bakra koje figurišu u teorijskim obračunima, sferični oblik, i realnog oblika čestica u eksperimentima, od valjkastog, pločastog do igličastog, odnosno različitih specifičnih površina ovih čestica što shodno teoriji procesa, proporcionalno utiče na intenzitet njihovog naelektrisanja. Shodno tome, teorijsko izračunavanje ggk čestica bakra, prikazano relacijom (1), za praktičnu primenu treba dopuniti popravnim koeficijenom (k) koji bi se odnosio na ovu karakteristiku sirovine.

- Manja efikasnost izdvajanja bakra finije granulacije može se rešavati na više načina, smanjenjem donje granične krupnoće ulazne sirovine, ili povećanjem intenziteta onih sila koje finoizrne čestice efikasnije odbacuju od površine bubnjaste elektrode u provodni proizvod, a iste su povećanje intenziteta električnog polja i broja obrtaja bubnjaste elektrode.

- Nezadovoljavajuća efikasnost izdvajanja plastike, odnosno njena dominantna preraspodela u međuproizvodu i provodnom proizvodu, ukazuju na nedovoljan intenzitet sila koje istu zadržavaju na rotirajućoj bubnjastoj elektrodi. Povećanje intenziteta tih sila uslovljen pre svega većim intenzitetom električnog polja i drugim tehničko tehnološkim faktorima doprineće povećanju efikasnosti elektrostatičke separacije plastike iz otpadnih bakarnih kablova.

## ZAKLJUČAK

Analizom teorijskih i rezultata praktičnih istraživanja sa sigurnošću se može zaključiti da primena postupka raslojavanja po frakcijama gustina proizvoda elektrostatičke separacije otpadnih bakarnih kablova daje mogućnost boljeg sagledavanja efikasnosti procesa razdvajanja komponenata. Definisane pokazatelja oštine razdvajanja omogućava kvalitetniju kontrolu, regulaciju i optimizaciju procesa u cilju ostvarivanja boljih tehnoloških pokazatelja procesa separacije.

Rezultati eksperimenata pokazuju visoko tehnološko iskorišćenje bakra, 98,80 %, kao i niži kvalitet provodnog proizvoda, uslovljen izuzetno visokim procentom zalutalih čestica plastike, 20,99 %, u istom proizvodu. Takođe, primena postupka raslojavanja po frakcijama gustine, ukazuje na ostvareni maksimalni kvalitet i nezadovoljavajuće iskorišćenje plastike, 19,10 %, u neprovodnom proizvodu, kao i dominantnu distribuciju iste, 59,91 % u međuproizvodu.

Pokazatelji procesa elektrostatičke separacije dobijeni naknadnom karakterizacijom proizvoda separacije, analizom po frakcijama gustina i granulometrijskom analizom proizvoda i pojedinih komponenata, frakcija, sadržanih u istim upućuju na mogućnost poboljšanja efikasnosti procesa. Pored navedenih zaključaka i konstatacija koje se prvenstveno odnose na povećanje efikasnosti izdvajanja plastike, time i poboljšanja kvaliteta provodnog proizvoda, doprinos rezultata istraživanja je i ukazivanje na potrebu poboljšanja jednačine za određivanje teoretske vrednosti ggk čestica bakra, prikazane u radu (1), u cilju pouzdanije praktične primene. Prikazanu relaciju treba dopuniti popravnim koeficijentom (k), većim od 1, uslovljenim različitom specifičnom površinom otpadnog bakra tretiranog u procesu separacije.

Obim izvedenih istraživanja ne daje mogućnost pouzdanog određivanja vrednosti popravnog koeficijenta (k), kao i optimizacije procesa, već samo ukazuje na značaj primene postupka raslojavanja po frakcijama gustina proizvoda separacije i granulometrijske analize proizvoda separacije i pojedinih komponenata, frakcija, u kontroli i optimizaciji procesa, što je i bio osnovni cilj ovog rada.

## LITERATURA

1. Svoboda, J. Separation of Particles in the Corona-Discharge Field; *Magnetic and Electrical Separation* **1993**, 4, 173-192.
2. Li, J.; Lu, H.; Xu, Z.; Zhou, Y. A Model for Computing the Trajectories of the Conducting Particles from Waste Printed Circuit Boards in Corona Electrostatic Separators. *J. Hazard. Mater.* **2008**, 151, 52–57.
3. Cui, J.; Forssberg, E. Mechanical Recycling of Waste Wlectric and Electronic Equipment: A Review. *J. Hazard. Mater.* **2003**, B99, 243–263.
4. Lu, H.; Li, J.; Guo, J.; Xu, Z. Movement Behavior in Electrostatic Separation: Recycling of Metal

- Materials from Waste Printed Circuit Board. *J. Mater. Proc. Techn.* **2008**, *197*, 101–108.
5. Wu, J.; Qin, Y.; Zhou, Q.; Xu, Z. Impact of Nonconductive Powder on Electrostatic Separation for Recycling Crushed Waste Printed Circuit Board. *J. Hazard. Mater.* **2009**, *164*, 1352–1358.
  6. Xu, Z.M.; Li, J.; Lu, H.Z.; Wu, J. Dynamics of Conductive and Nonconductive Particles Under High-voltage Electrostatic Coupling Fields. *Sci China Ser E-Tech Sci* **2009**, *52*(8), 2359-2366.
  7. Shunli, Z.; Forssberg, Er. Optimization of Electrodynamics Separation for Metals Recovery from Electronic Scrap. *Resour. Conserv. Recycl.* **1998**, *22*, 143-162.
  8. Li, J.; Lu, H.Z.; Guo, J. et al. Recycle Technology for Recovering Resources and Products from Waste Printed Circuit Boards. *Environ. Sci. Technol.* **2007**, *41*(6), 1995-2000.
  9. Li, J.; Xu, Z.M.; Zhou, Y.H. Application of Corona Discharge and Electrostatic Force to Separate Metals and Nonmetals from Crushed Particles of Waste Printed Circuit Boards. *J. Electrostat.* **2007**, *65*, 233-238.
  10. Veit, H.M.; Diehl, T.R. et al., Utilization of Magnetic and Electrostatic Separation in the Recycling of Printed Circuit Boards Scrap. *Waste Management* **2005**, *25*, 67–74.