

SEPARACIJA OTPADNIH TISKANIH PLOČICA U ELEKTROSTATIČKOM SEPARATORU

UWASTE PRINTED CIRCUIT BOARDS SEPARATION IN ELECTROSTATIC SEPARATOR

BRANIMIR FUK

Ministarstvo zaštite okoliša i prirode, Ulica Republike Austrije 14, 10000 Zagreb, HRVATSKA

Ključne riječi: tiskane pločice, elektrostatička separacija, kvaliteta koncentrata, maseno iskorištenje

Key words: printed circuit boards, electrostatic separation, concentrate quality, recovery

Sažetak

Tiskane pločice iz elektroničkog otpada važan su izvor plemenitih metala u recikliranju. Najveći izazov je osloboditi i odvojiti korisnu komponentu; tanki film koji sadrži bakar, cink, kositar, olovo i plemenite metale poput srebra, zlata i paladija od nekorisne komponente; polimera, keramike i staklenih vlakana. U radu su prikazani rezultati separiranja usitnjenih tiskanih pločica iz TV aparata u elektrostatičkom separatoru. Testiranje je provedeno sa materijalom klasa 2/1 i 1/0.5 mm u laboratoriju na uređajima za oplemenjivanje mineralnih sirovina. Rezultati pokazuju utjecaj nezavisnih varijabli; nagiba separacijskog noža, brzine okretanja bubnja i napona na kvalitetu koncentrata i maseno iskorištenje.

Abstract

Printed circuit boards from electronic waste are very important source of precious metals by recycling. The biggest challenge is liberation and separation of useful components; thin film which contains copper, zinc, tin, lead and precious metals like silver, gold and palladium from non useful components; polymers, ceramics and glass fibers. The paper presents results for separation of shredded printed circuit boards from TV sets in electrostatic separator. Testing where conducted with material class 2/1 and 1/0.5 mm in laboratory on equipment for mineral processing. Results showed influence from independent variable; separation knife gradient, drum rotation speed and voltage on concentrate quality and recovery.

Uvod

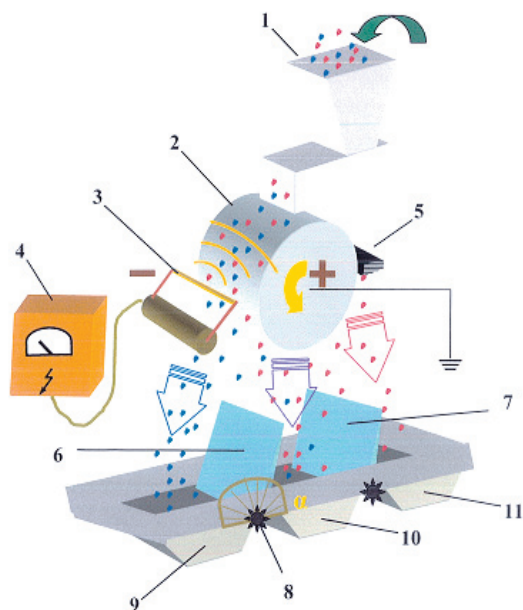
Na tržište Republike Hrvatske u razdoblju 2008. do 2010. stavljeno je 15 512,45 tona opreme široke potrošnje za razonodu (AZO, 2011). U istom razdoblju je sakupljeno 7 121,42 tona i obrađeno 6 942,55 tona elektroničkog otpada u kojem veliki dio predstavljaju televizijski aparati sa katodnom cijev. Tiskane pločice zbog zastupljenosti velikog broja metala i nemetala, koji predstavljaju 7 % prosječnog sastava televizijskog aparata (Seebacher, H. et al, 2004), predstavljaju vrlo važan izvor sekundarnih sirovina.

Nakon odvajanja velikih metalnih komponenti i elektrolitičkih kondenzatora, većeg promjera i/ili visine od 25 mm, sa tiskane pločice (obveza - Directive 2002/96/EC on WEEE), preostaje još mnogo elemenata koji prema analizi pepela, nakon pirolize na 800 °C, sadrži slijedeće metale; Mn, Mg, K, Cu, Fe, Na, Cr, Co, Pb, Ag, Ni, Zn, Bi, Cd, Ti, Al, Sr, Sb i druge koji se pojavljuju u količini manjoj od 10 mg/kg uzorka tiskanih pločica od televizora (Hall, W. J. and Williams, P.T., 2007). Prosječni sastav tiskanih pločica predstavljaju sa > 70 % nemetali (plastika,

epoksidne smole i staklena vlakna), ~16 % bakar, lemilo ~4 %, željezo, feriti ~3 %, nikal ~2 %, srebro 0,05%, zlato 0,03 %, pladij 0,01 % i ostalo (bizmut, antimon, tantal i dr.) s <0,01% (Eswaraiah, C., et al., 2008).

Obzirom da su korisne komponente tj. metali, fizičko-mehaničkim odnosno kemijskim putem, spojene sa nekorisnom komponentom tj. izolacijskom podlogom, glavna zadaća je postizanje potpunog oslobađanja komponenti. Oslobađanje različitih metala od nemetala je od ključnoj značaja za mehaničku separaciju. Ispitivanjem je utvrđeno da se usitnjavanjem tiskanih pločica ispod 2 mm, metalne čestice gotovo u potpunosti oslobađaju od izolacijske podloge (Zhang, S. and Forssberg, E., 1997). Unatoč činjenici da postoje kemijska, biološka i metalurška rješenja za dobivanje metala iz tiskanih pločica, važno je naglasiti da su fizičko-mehanički suhi postupci separacije ekološki prihvatljiviji jer ne onečišćuju zrak štetnim plinovima, a nema ni potrebe za pročišćavanjem otpadnih voda. Primjena elektrostatičkog separatora za separiranje mješavine materijala, koja je dobivena nakon usitnjavanja tiskanih pločica, jedna je od ekološki prihvatljivijih metoda za odvajanje metala od izolacijskih materijala.

Princip rada bubnjastog elektrostatickog separatora prikazan je na slici 1.



Slika 1. Shematski prikaz elektrostatickog bubnjastog separatora
Figure 1. Schematic view of electrostatic drum separator

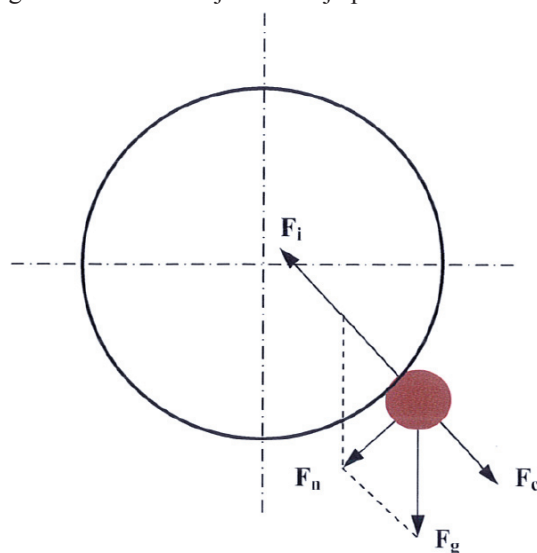
Separator se sastoji od; dozatora materijala sa grijačem (1), bubnja (2), ionizacijske elektrode (3), izvora visokog napona (4), četke za čišćenje bubnja (5), dva separacijska noža (6 i 7), regulatora za nagib noža (8) i posuda za prihvatanje materijala – koncentrat (9), među produkt (10) i produkt (11). Usitnjeni materijal određene klase usipava se u lijevak iznad dozatora koji sa određenim intenzitetom ravnomjerno donosi materijal na površinu bubnja. Ionizacijska elektroda sastoji se od elektrode velikog raspona i tanke žice koja je smještena nasuprot bubnja, a pod utjecajem visokog napona nastaje jaka korona koja utječe na čestice izolatora. Na princip rada separatora može se utjecati i pomoću grijača, izmjenom polariteta, intenzitetom doziranja, a u ovom radu se na učinkovitost separiranja utjecalo brzinom okretanja bubnja, naponom na elektrodi i položajem separacijskog noža. Na kvalitetu separacije utječe i veličina zrna, stoga je prije separiranja potrebno usko klasiranje jer bi prevelika razlika između zrna rezultirala lošom separacijom. Na rezultate separacije također negativno može utjecati i praškasta nevodljiva komponenta u klasi – 0,5 mm jer se taloži na ionizacijskoj elektrodi i na kućištu uređaja (Wu., J et al., 2009).

Teorija elektrostaticke separacije

Elektrostaticka separacija je postupak razdvajanja materijala na korisnu i nekorisnu komponentu, uslijed međudjelovanja između električnog polja i električnog naboja čestice. Ukoliko postoji razlika u električnoj vodljivosti između materijala, izmjenom intenziteta električnog polja i drugih radnih parametara unutar elektrostatickog separa-

tora moguća je i učinkovita separacija. U ovisnosti o naboju, čestice se kreću prema suprotnom naboju odnosno izolacijske čestice koje imaju negativni površinski naboj priljubljuju se uz površinu bubnja koji ima pozitivan naboj. Vodiči koji imaju niski pozitivni naboj i električnu silu, zbog privlačenja prema ionizacijskoj elektrodi i većeg utjecaja centrifugalne sile, bivaju odbačeni sa površine bubnja nakon čega su podvrgnuti utjecaju gravitacijske sile, otporu zraka i elektrodinamičkoj sili.

Općenito, na česticu koja napušta bubanj djeluju četiri vrste sile, a to su električna sila, gravitacijska sila, centrifugalna sila i sila trenja kao što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Sile koje djeluju na česticu izolatora (Zhang, S. et al, 1998)
Figure 2. Forces acting on insulation particle (Zhang, S. et al, 1998)

Električna sila (F_i) ovisna je o električnom polju (E_e) koje se može izraziti kao;

$$F_e = E \times Q \quad (1)$$

gdje je:

E – intenzitet električnog polja,

Q – površinski naboj čestice.

Prema Coulomb-ovom zakonu dobivamo izraz:

$$F_i = K \cdot \frac{Q^2}{d_p^2} \quad (2)$$

gdje je:

K – koeficijent vezan uz prirodu elektriciteta čestice,

d_p – udaljenost između čestica (u ovom slučaju je jednak dijimetru čestice)

Za gravitacijsku silu F_g vrijedi slijedeći izraz:

$$F_g = \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \cdot \rho_p \cdot g \quad (3)$$

gdje je:

ρ_p – gustoća čestice,

g – gravitacijsko ubrzanje.

Dok se centrifugalna sila može izraziti kao:

$$F_c = \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \cdot \rho_p \cdot R\omega^2 \quad (4)$$

gdje je:

R – radijus rotora,
 ω – kutna brzina rotora

Sila trenja F_f suprotnog je smjera u odnosu na kretanje čestice i u odnosu na druge sile je zanemariva, a može se izraziti kao:

$$F_f \leq \mu F_n \quad (5)$$

gdje je:

μ – koeficijent trenja,
 F_n – normalna sila koja nastaje između dviju površina

Kombinacija tih sila i sila trenja između bubnja i čestice, neposredno prije odbacivanja, utječu na putanju zrna kroz prostor. Vodiči padaju prema dnu gdje na njihovu putanju možemo izravno utjecati separacijskim nožem koji svojim položajem tj. nagibom siječe putanju zrna čime ono pada u posudu za među produkt. Nasuprot vodičima izolatori se nakon prestanka utjecaja korone odvajaju od površine bubnja ili ih sastruže četka (5), na slici 1, postavljena sa svrhom čišćenja površine bubnja. Većina izolatora pada u posljednju posudu, a neka veća zrna mogu biti odbačena u posudu sa vodičima utječu na kvalitetu koncentrata, no u većini slučajeva zbog nagiba separacijskog noža od kojeg se odbiju, padnu u posudu sa među produktom.

Materijali

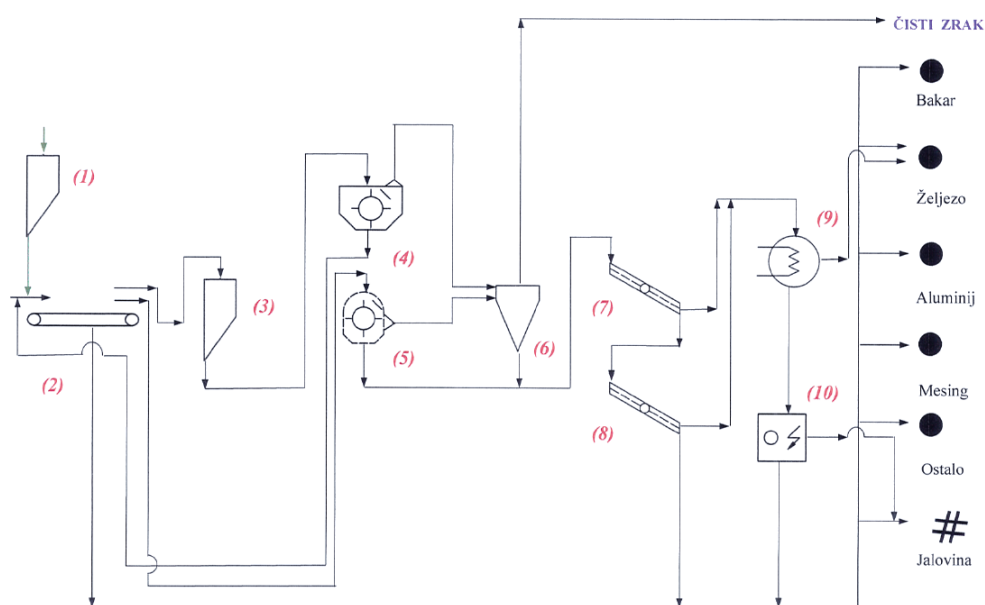
Za potrebe ovog rada su iz 8 različitih TV aparata odstranjene tiskane pločice sa svim elektroničkim kom-

ponentama poput trafo-a, tranzistora, memorija, dioda i sl. Tiskana pločica ili PCB (*printed circuit board, engl.*) naziv je za sredstvo kojim se mehanički i električki povezuju elektroničke komponente. Sastoji se od podloge od izolatorskog materijala na kojoj se različitim postupcima oblikuje vodljiva struktura. Podloga se tipično izrađuje od celuloznih vlakna impregniranih fenolnom smolom (“*perlinaks*”) ili staklenih vlakana impregniranih epoksidnom smolom (“*vitroplast*”), međutim za više frekvencije koriste se i drugi materijali. Vodljiva struktura u ovom radu predstavlja korisnu komponentu koju treba odvojiti od izolacijske podloge (jalovina) iako i takav materijal sve više nalazi primjenu u industriji građevinskog materijala i keramičkoj industriji. Vodljiva struktura se postupkom jetkanja odnosno uklanjanjem određenog dijela bakrene folije kaširane na podlogu oblikuje u željenu shemu kojom su povezane elektroničke komponente. Upravo zbog tehnike sitotiska kojom se nanosi bakreni sloj sa jedne ili obje strane dolazi i naziv tiskane pločice. Prijašnje tiskane pločice su imale rupice kroz koje su se provlačili dijelovi komponenti koji su se povezivali unutar sheme, a danas se sve više primjenjuje tehnologija površinskog montiranja (*Surface-mount technology, engl.*), gdje se komponente prislanjaju ili lijepe na površinu pločice, te im se izvodi ili rubne plohe leme na onu stranu tiskane pločice na kojoj se nalazi i komponenta.

Ekperimentalni dio

Priprema uzorka

Svaki imalo složeniji proces recikliranja obuhvaća tri glavna postupka: sitnjenje, klasiranje i sortiranje odnosno separiranje (Salopek, B. et al., 2005). Prema segregacijskoj shemi na slici 3 vidljiv je tijek materijala sve do separiranja u elektrostatičkom separatoru.

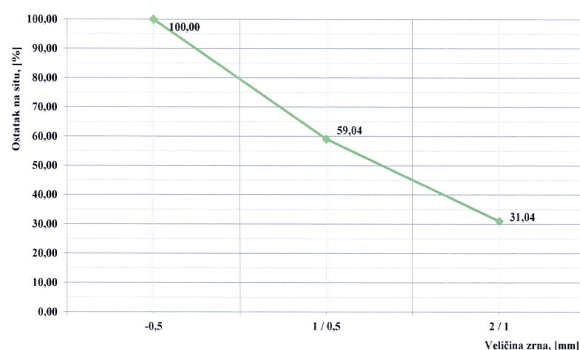


Slika 3. Segregacijska shema recikliranja otpadnih tiskanih pločica
 Figure 3. Segregation scheme of waste printed circuit board recycling

Po dolasku u laboratorij (1) tv aparati se na probirnoj traci (2) rasklapaju i sa njih se odstranjuju pojedine komponente, a u ovom slučaju su to tiskane pločice. Nakon ručne demontaže i odvajanja kondenzatora većih od 25 mm u promjeru i visini, te mehaničkog odstranjivanja, metalnih okvira, transformatora i krupnijih komponenti sa tiskane pločice, iste je trebalo prelomiti na manje komade kako bi mogle ući u udarnu drobilicu. Za eksperiment je u spremniku (3) pripremljeno 8565 grama materijala.

U laboratorijskoj udarnoj drobilici (4) postignuto je primarno sitnjenje i odvajanje dijela pojedinih uklopljenih elemenata, te je na taj način iz ukupne mase bilo moguće odstraniti aluminijsku foliju iz manjih kondenzatora, kao i veće komade bakra, željeza, aluminijska i mesinga koji bi nepotrebno opterećivali postupak sekundarnog sitnjenja, a mogu biti vrednovani kao gotov proizvod u ukupnoj količini od 769 grama.

Za postupak sekundarnog sitnjenja korištena je drobilica s nezavisno rotirajućim pločicama (5) i otvorom rešetke promjera 2 mm. Prethodno usitnjeni materijal se ubacivao na gornjem dijelu kućišta gdje uslijed rotiranja neovisnih pločica na četiri osovine, koje su spojene kroz središnje diskove sa glavnom osovinom, dolazi do odbacivanja materijala na nazubljenu površinu na gornjem dijelu bubnja. Kombinacija odbijanja, sudaranja zrna s kućištem, zrno o zrno te udaranjem neovisno rotirajućih pločica o materijal, traje sve dok materijal ne prođe kroz otvor rešetke promjera 2 mm. Sav usitnjeni materijal odlazi na vibracijsko sito sa prosječnom površinom pravokutnih otvora 1 mm (7), odsjev nam predstavlja klasu 2/1 mm, a prosjev odlazi na sito promjera otvora 0,5 mm (8). Odsjev predstavlja klasu 1/0,5 mm, a prosjev klasu -0,5 mm koja se zbog negativnog utjecaja praškaste komponente izolatora odvodi u skladište materijala sa ostalim produktima.



Slika 4. Granulometrijska analiza tiskanih pločica

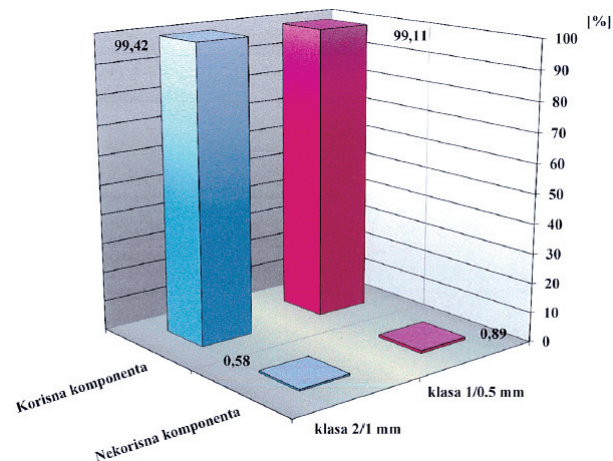
Figure 4. Granulometric PCB analysis

Sastav uzorka materijala korištenog za granulometrijsku analizu, vidljiv je na slici 4, gdje je maseni udio materijala u omjerima; 31 % klase 2/1 mm, 28 % klase 1/0,5 mm i 41 % klase -0,5 mm.

Prije provođenja eksperimenta elektrostatičkom separatoru dobiveni materijal je podvrgnut zračnom separiranju (6) kako bi se odstranila aluminijska folija. Po-

stupkom magnetske separacije (9) dodatno je izdvojena magnetska komponenta iz cijele mase materijala.

Jednostavnim postupkom ručnog probiranja i vaganjem na elektronskoj vagi, s točnošću na dvije decimale, za klase 2/1 i 1/0,5 mm određeni su maseni udjeli korisne komponente kao i maseni udio nekorisne komponente koja je označena kao jalovina što je vidljivo u slici 5.



Slika 5. Udio korisne i nekorisne komponente separiranog materijala

Figure 5. Share of useful and non useful components in separated material

Ispitivanje u elektrostatičkom separatoru

Za potrebe ispitivanja korišten je laboratorijski elektrostatički separator proizvođača Eriez Magnetics, model HT – 150. Parametri kojima se regulira rad separatora su brzina okretanja bubnja, napon na ionizacijskoj elektrodi i položaj separacijskog noža (6) prikazanog na slici 1. Krajnjim nagibom separacijskog noža (7) sa slike 1, sva nekorisna komponenta padala je u posudu (10) kao produkt, dok je u posudu (9) padala korisna komponenta odnosno koncentrat. Prilikom izvođenja pokusa u laboratoriju temperatura je iznosila 22 – 23 °C uz relativnu vlažnost, kod bubnjastog elektrostatičkog separatora postavljene su konstantne vrijednosti; grijač iznad dozatora nije uključivan, dozator je podešen na 55 % intenziteta, a žica ionizacijske elektrode svaki put je namješšana na 5 cm od bubnja. Određene su granične vrijednosti radnih parametara sa određenim rasponom nagiba separacijskog noža od 120° do 140°, napon je mijenjan u rasponu od 15 do 25 kV dok se brzina okretanja bubnja mijenjala u rasponu od 50 do 60 okretaja u minuti.

Rezultati

Obzirom na isključivanje drugog separacijskog noža i treće posude za prihvatanje materijala separiranjem su dobivena dva proizvoda. Prema centralno složenom planu ispitivan je utjecaj nezavisnih varijabli; napona na ionizacijskoj elektrodi, položaja separacijskog noža i brzine okretanja bubnja na zavisne varijable; kvalitetu koncentrata i maseno iskorištenje.

Kvaliteta koncentrata (K_k) može se prikazati kao maseni udio korisne komponente (metala) ili nekorisnih komponenti (nemetala) u koncentratu, izražen u postocima (Bedeković, G. et al., 2008.):

$$K_k = \frac{m_k}{K} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (6)$$

gdje je:

m_k - masa korisne ili nekorisne komponente u koncentratu (kg)

K - masa koncentrata (kg)

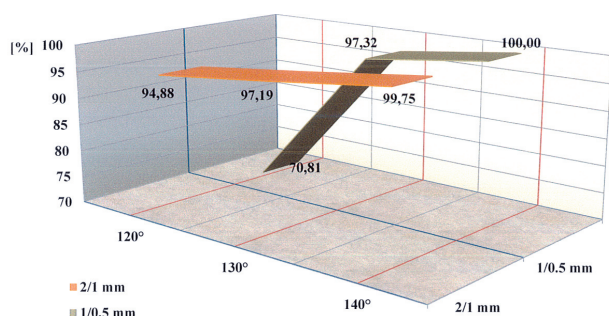
Maseno iskorištenje (I_m) je odnos mase koncentrata i mase ulazne sirovine (uzorka mješavine materijala). Izražava se u postocima i izračunava prema izrazu:

$$I_m = \frac{K}{U} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (7)$$

gdje je:

U - masa ulazne materijala (kg)

Prema izrazima (6) i (7) izračunate su vrijednosti koje ukazuju na značaj utjecaja promjene pojedinog radnog parametra na uspješnost separiranja. Analizom dobivenih rezultata najveći značaj na učinkovitost separacije pokazala je promjena nagiba separacijskog noža kod klase 1/0,5 mm gdje raspon između minimalnog i maksimalnog nagiba rezultirao razlikom u kvaliteti koncentrata većom od 29 %. Kod klase 2/1 mm ta razlika je oko 5 % što je vidljivo u slici 6.

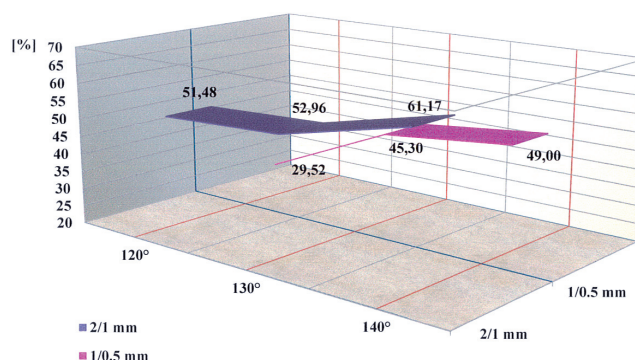


Slika 6. Utjecaj nagiba separacijskog noža na kvalitetu koncentrata
 Figure 6. Influence of separation knife gradient on concentrate quality

Kod masenog iskorištenja povećanje nagiba separacijskog noža prilikom ispitivanja klase 2/1 mm rezultiralo je rastom od gotovo 10 %, a kod klase 1/0,5 mm razlika je oko 19,5 % što je vidljivo u slici 7. Ovdje treba napomenuti da se radilo sa uzorkom koji je imao vrlo visok udio korisne komponente u obje klase.

Utjecaj brzine okretanja bubnja ima najmanji utjecaj na kvalitetu koncentrata jer je razlika u kvaliteti koncentrata do 1,5 %, a masenog iskorištenja do 7,5 %. Povećanje napona uzrokuje smanjenje kvalitete koncentrata za oko 2,5 % i smanjenje masenog iskorištenja za oko 8 %.

Također treba naglasiti da je utjecaj promjene pojedinog radnog parametra izraženiji kod klase 1/0,5 mm nego kod klase 2/1 mm. Prilikom ispitivanja, sa drugim vrijednostima radnih parametara, u posudi sa produktom kod manjeg nagiba separacijskog noža uočena je povećana prisutnost zrna aluminija. U koncentratu najveći udio uz ostale metale ima bakar. Nakon završene separacije u najpovoljnijim uvjetima dobiveni vodiči su ručno probrani u svrhu utvrđivanja udjela pojedinog metala u koncentratu.



Slika 7. Utjecaj nagiba separacijskog noža na maseno iskorištenje
 Figure 7. Influence of separation knife gradient on recovery

Zaključak

Primarni cilj primjene elektrostatičkog separatora je ostvaren jer je uz vrlo visoku kvalitetu koncentrata moguće odvojiti vodiče od izolatora. Elektrostatičkom separacijom, sa promatranim radnim parametrima, na ovom uređaju može se postići vrlo visoka kvaliteta koncentrata ovisno o klasi i do 100 %. Maseno iskorištenje kreće se između 45 % i 61 % za klasu 2/1 mm, a najmanje maseno iskorištenje od 29,52 % kod klase 1/0.5 mm uzrokovano je smanjenim nagibom separacijskog noža. Ukoliko je cilj postići što čišći koncentrat tada će manji nagib separacijskog noža rezultirati sa više među produkta kojeg ćemo morati dodatno propuštati kroz separator. Smanjenjem napona povećavamo učinkovitost separacije, a najmanji utjecaj ima brzina rotacije bubnja. U ovom radu su razmatrane samo tri osnovne vrijednosti radnih parametara odnosno minimum, srednja i maksimalna vrijednost pojedinog parametra stoga su i razlike veće. Uže definiranje graničnih vrijednosti radnih parametara dalo bi bolji uvid u njihovo međudjelovanje i preciznije podatke za uspješnost separacije. Obzirom da se radilo sa manjom količinom uzorka i na uređaju sa ograničenim kapacitetom, ovdje uspješnu separaciju, potrebno je isprobati u pogonskim uvjetima sa većim količinama materijala. Također je utvrđeno da je obzirom na razliku u vodljivosti metala moguća separacija koncentrata gdje bismo mogli odvojiti bakar od ostalih metala.

Literatura

- Agencija za zaštitu okoliša, (2011): Izvješća o električnom i elektroničkom otpadu za 2010. godinu, Zagreb
- Bedeković, G., Salopek, B., Sobota, I., (2008): Učinkovitost separiranja metalnog otpada u magnetskom separatoru s vrtložnim strujama, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Volumen 20, 65-70, Zagreb.
- Directive 2002/96/EC on Waste electrical and electronic equipment (WEEE), OJ L37.
- Eswaraiyah, C., Kavitha, T., Vidyasagar, S, Narayanan, S.S. (2008): Classification of metals and plastics from printed circuit boards (PCB) using air classifier, Chemical Engineering and Processing, 47, 565-576.
- Hall, W.J. and Williams, P.T. (2007): Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards, Resources, Conservation and Recycling, 51, 691-709.
- Salopek, B., Bedeković, G., Sobota, I., (2005): The comminution of solid waste, Annual 2005 of the Croatia Academy of Engineering, XX, 139-150, Zagreb
- Seebacher, H., Antrekowitsch, Priar, F., Leitner, T., (2004): Recycling of Electronic scrap, REWAS, Volume 111., 2623-2633.
- Wu, J., Qin, Y., Zhou, Q., Xu, Z. (2009): Impact of nonconductive powder on electrostatic separation for recycling crushed waste printed circuit board, Journal of Hazardous Materials, 164, 1352-1358.
- Zhang, S. and Forsberg E. (1997): Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap, Resources, Conservation and Recycling, 21, 247-269.
- Zhang, S. and Forsberg E. (1998): Optimization of electrodynamic separation for metals recovery from electronic scrap, Resources, Conservation and Recycling 22, 143-162.

DETERMINATION OF OPERATIONAL PARAMETERS FOR AIR AND ELECTROSTATIC SEPARATORS BY WASTE PRINTED CIRCUIT BOARDS SEPARATION

Electronic waste, such as printed circuit boards from TV sets, represents an average 7% of the total mass of the device, however in terms of metal composition it represents a major source of copper, zinc, lead and tin, as well as a number of other rare metals. Due to the emergence of new technologies, for many old devices such as TV sets with cathode-ray tubes no repair is justified, and for certain models which are older than twenty years spare parts are no longer available, and thus an increasing number of such devices ends up as waste. For purposes of this thesis 8 TV sets of various sizes and different manufacturers were collected in order to obtain an optimal pattern of the devices found at disposal.

The guidelines from Directive 2002/96/EC on WEEE prescribe the recovery of 65% of the quantity of electrical and electronic equipment placed on the market of individual EU Member States by 2016, with the final goal of achieving 85% by 2020. The main purpose of such a high

set target is the maximum utilisation of available resources and a reduction in environmental pollution due to a lower consumption of energy necessary for the exploitation of new mineral resources, as well as a decrease in living environment deterioration.

The technology applied for recycling of electrical and electronic waste is rather specialised, depending on the equipment producer, and it often fails to achieve the desired effect, therefore interim actions in the preparation of materials or final processing is necessary to obtain the intended product. It is along these lines that considerations have been carried out on the utilisation of devices having the primary purpose of improving the mineral resources.

Over several decades of the last century mining has been developing procedures and technologies using the basic features of and differences between materials in order to separate useful components from the waste component. The same principle is applied also to electrical and electronic waste, where during manual disassembly a large part of iron, copper and aluminium is separated from other materials. Separation becomes more complex in case of components containing several integrated materials, out of which some are unwanted and have to be singled out.

An average printed circuit board from a TV set weighs ca. 500 gr, and depending on the age of the device it was manufactured with a one-side or double-side layer of conductive structure. It is from the manner of application of the thin layer of conductive structure to the insulation basis - by silkscreen printing technique - that the name *printed circuit board*, PCB, is derived. The base is typically manufactured from cellulose fibres impregnated with phenolic resin ("pertinax") or glass fibres impregnated with epoxy resin ("vitroplast"), however for higher frequencies also other materials are used.

Thermal treatment of printed circuit boards results in the occurrence of toxic gases such as dioxins, phenols and bisphenol, as well as bromine, which is indicative of the use of burning inhibitors. Such gases need to be treated before being discharged into the air, this raising the price of such a disposal procedure. By mechanical milling procedures it is possible to obtain separation of the conductive structure from the insulation base, and thereupon the main task is to submit the obtained material to quality separation.

In the experiment a laboratory impact crusher has been used with independently rotating plates and a grid ranging from -1.7 to + 0.3 mm, therefore by sample sieving two classes were obtained, 2/1 mm and 1/0.5 mm, representing 59 % of the sample of obtained material. Material of the class -0.5mm is not appropriate for air and electrostatic separation due to loss of material within the device, whereby the quality of obtained results of individual tests is affected in an essential manner, and therefore this material has been exempted from testing and needs to be separated in a much more complex manner.

In order to achieve optimal operation and practical application for individual devices, it is essential to carry out a series of tests with modified operational parameters, and by establishing the individual impact or interaction of two or more parameters the final parameters are determined. For this purpose a centrally designed plan with 17 tests per one sample of a specific class was used, and the obtained results were submitted to statistical analysis with the Statistica 8 programme of the StatSoft company. By inserting the obtained values a model of dependence or impact of the independent variables on the dependent variable is produced, and with a graph also border areas of specific independent variables can be defined.

By the carried out test and on the basis of the obtained results the basic assumption has been confirmed that for the separation of printed boards air and electrostatic separators can be applied which are used for refining mineral raw materials. Operational **parameters have been calculated**, such as air flow velocity, division height and distance from the inlet of air separators, as well as the location of the separation knife, drum rotation velocity and voltage at the ionising electrode of the electrostatic separator. Concentrate quality is very high with both devices, and utilisation of the concentrate mass is somewhat lower with electrostatic separators.