



ANTONI CIEŚLA*, WOJCIECH KRASZEWSKI**, MIKOŁAJ SKOWRON**,
AGNIESZKA SUROWIAK***, PRZEMYSŁAW SYREK**

Wykorzystanie bębnowego separatora elektrodynamicznego do separacji odpadów elektronicznych

Wstęp

W krajach Unii Europejskiej każdego roku powstaje około 8 mln ton zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (przy czym roczny przyrost tempa powstawania tych odpadów to 3–5%), podczas gdy na całym świecie w skali roku powstaje około 20–50 mln ton tych odpadów. Przykładowy skład morfologiczny obwodów drukowanych z elementami elektroniki przedstawiono na rysunku 1 (Veit i in. 2005; Birloaga 2013). Głównymi pierwiastkami są: miedź, żelazo, aluminium, cyna i ołów, ale także włókna szklane i żywice.

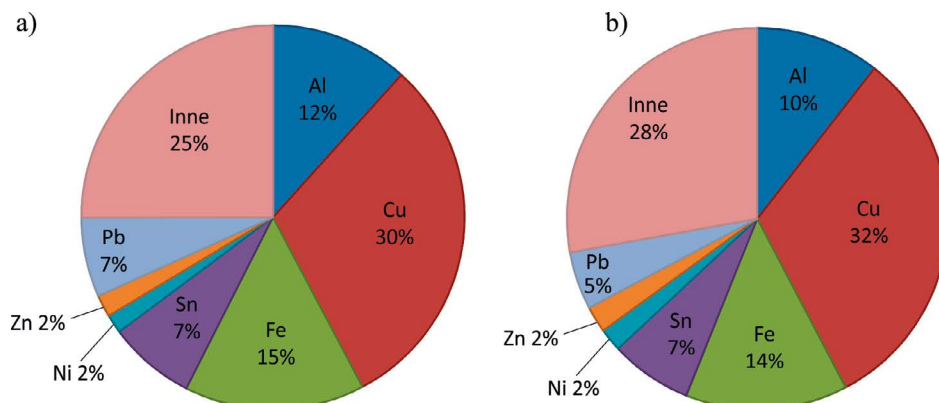
Jednym z założeń racjonalnej gospodarki surowcami i odpadami jest jak najlepsze wykorzystanie pierwotnych składników surowca naturalnego i odzysk w znacznej mierze przetworzonych elementów z produktów odpadowych.

W przeróbce różnego rodzaju odpadów do odzysku składników użytecznych można zastosować metody rozdziału używane w przeróbce surowców mineralnych. Wówczas wydzielenie składników użytecznych z odpadów dokonuje się w procesach separacji według ściśle określonej cechy. Cechą tą, którą nazywa się argumentem rozdziału, może być różnica w gęstościach ziaren rozdzielanych składników, prędkościach opadania ziaren, zwilżalności

* Dr hab. inż., Prof. AGH, ** Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków;

e-mail: aciesla@agh.edu.pl, wkraszew@agh.edu.pl, mskowron@agh.edu.pl, syrekp@agh.edu.pl

*** Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Kraków;
e-mail: asur@agh.edu.pl



Rys. 1. Przykładowy skład chemiczny odpadów elektronicznych różnego pochodzenia:
 a) płyty główne z komputerów b) różne drukowane płyty elektroniczne (Veit i in. 2005; Birloaga 2013)

Fig. 1. Example of chemical composition of electric waste of various origin:
 a) computer main boards; b) various printed electric boards (Veit et al. 2005; Birloaga 2013)

(hydrofobowości i hydrofilności), podatności magnetycznej, przewodności elektrycznej i innych (Brożek i Surowiak 2004, 2010; Krawczyk i Skowron 2014; Łuszczkiewicz i Kurzyca 1986; Surowiak 2014; Surowiak i Brożek 2014a, 2014b, 2016; Brożek i in. 2015).

Materiał do separacji wymaga odpowiedniego przygotowania poprzez procesy rozdrabniania i klasyfikacji w celu dostatecznego uwolnienia w znacznym stopniu przetworzonych już produktów odpadowych, które przyjmują postać bardzo drobno uziarnionych, skomplikowanych mieszanin najróżniejszych składników, często o zbliżonych właściwościach, a wymagających rozdzielania w procesie utylizacji. Bardzo często, w celu przygotowania i separacji materiałów bardzo drobno uziarnionych, stosuje się metody rozdrabniania i klasyfikacji na mokro. Zaletą separacji elektrodynamicznej jest fakt, że można uzyskać rozdział składników metodą na sucho, co eliminuje operacje zagęszczania, odwadniania i dosuszania drobno uziarnionych zawiesin, przez co zmniejsza się energochłonność procesów i obniża koszty.

Celem prezentowanego artykułu jest wykazanie możliwości zastosowania laboratoryjnego elektrodynamicznego separatora bębnowego do odzysku metali z odpadów elektronicznych przy wykorzystaniu różnic we właściwościach fizycznych (w tym przypadku przewodności elektrycznej) oraz analiza otrzymanych rezultatów. W badaniach doświadczalnych jako cechę rozdziału wykorzystano różnicę w podatnościach elektrycznych składników tworzących mieszaninę tzw. śmieci elektronicznych (Cieśla i Skowron 2013; Li i in. 2007a, 2008).

1. Model separacji z wykorzystaniem elektrodynamicznego separatora bębnowego

Wyładowanie koronowe (ulot) ma zastosowanie w wielu procesach technologicznych: oczyszczanie gazów, jonizacja powietrza, rozpylanie proszków, czy separacja mieszanin ziarnistych. Separacja z wykorzystaniem pola elektrycznego znajduje zastosowanie w procesach przemysłowych. Technika ta jest uważana za najlepszą możliwość oddzielania cząstek o różnych właściwościach elektrycznych – przewodzących i izolacyjnych – z mieszanin ziarnistych. W branży recyklingu, metoda ta zapewnia wyższy odzysk i lepszą jakość produktów w porównaniu do konwencjonalnych sposobów przetwarzania odpadów.

1.1. Podstawy fizyczne separacji elektrycznej

Separatory bębnowe są jedną z odmian separatorów elektrodynamicznych. Ich praktyczne zastosowanie to rozdział cząstek o różnych właściwościach elektrycznych, tj. przewodności.

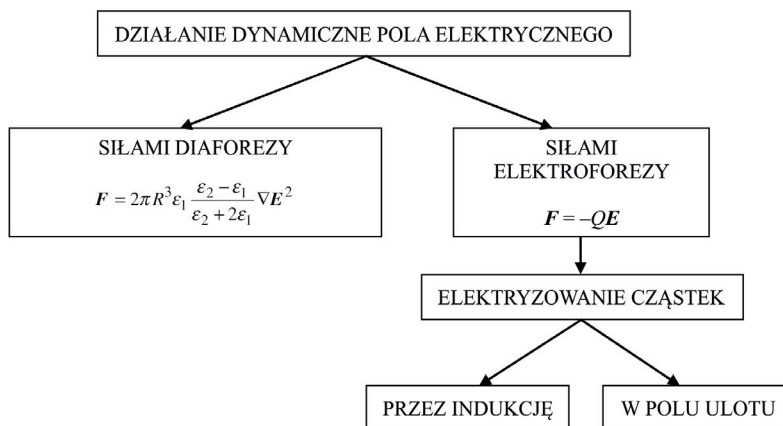
Cząstki umieszczone w polu elektrycznym podlegają oddziaływaniu tego pola zgodnie z zależnością:

$$F_e = 2\pi R^3 \varepsilon_1 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \nabla E^2 + QE \quad (1)$$

- ↪ F_e – siła oddziaływania pola elektrycznego [N],
- R – promień cząsteczki,
- ε_1 – przenikalność elektryczna względna cząsteczki,
- ε_2 – przenikalność elektryczna względna ośrodka,
- E – natężenie pola elektrycznego [Vm^{-1}],
- Q – ładunek elektryczny cząstek [C].

Pierwszy składnik równania (1) określa siłę diaforezy pojawiającą się tylko w polach niejednorodnych, zaś drugi składnik tego równania – siłę elektroforezy działającą na naelektryzowaną uprzednio cząstkę. Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie sposoby oddziaływania pola elektrycznego na cząstki i podstawowe metody ich elektryzowania.

Siła diaforezy występuje w polach niejednorodnych. Wykorzystanie jej do celów separacji jest trudne, gdyż wymaga dużego gradientu pola elektrycznego, co stwarza duże trudności techniczne. Drugi wyraz równania (1) określa siłę elektroforezy, czyli siłę działania pola elektrycznego na naładowaną wcześniej cząstkę. Działanie większości stosowanych w laboratoriach i przemyśle elektroseparatorów opiera się na zjawisku elektroforezy. Warunkiem separacji jest wcześniejsze selektywne naelektryzowanie mieszaniny w celu uzyskania różnicowanych wielkości ładunku przez ziarna rozdzielanych składników. Istnieje kilka



Rys. 2. Schemat możliwych oddziaływań dynamicznych pola elektrycznego

Fig. 2. Scheme of possible dynamic interactions of electric field

metod elektryzowania ziaren. Najczęściej w procesach elektroseparacji wykorzystuje się indukcję elektrostatyczną, ulot (wyładowania koronowe) oraz elektryzowanie przez tarcie i kontakt. Dwie pierwsze metody stosuje się w konduktancyjnych separatorach bębnowych, trzecią w elektrostatycznych separatorach odchylających.

1.2. Elektrodynamiczny separator bębnowy

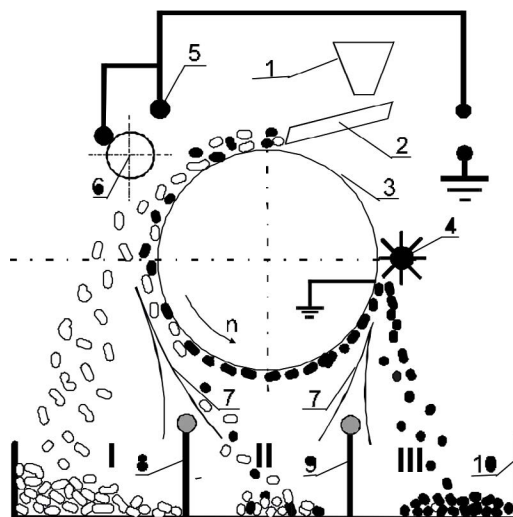
Na rysunku 3 przedstawiono schemat elektrodynamicznego separatora bębnowego według konstrukcji Huffa (Szczerbiński 1983). Cząstki o różnej przewodności elektryzują się w polu ulotu i opadają na bęben. Cząstki dobrze przewodzące oddają swój ładunek i odrywają się od bębna, natomiast cząstki słabo przewodzące zachowują swój ładunek i są przytrzymywane na powierzchni bębna siłą zwierciadlanego odbicia.

Zależność wartości ładunku od właściwości elektrycznych ziaren i czasu kontaktu cząstki z bębniem podał Szczerbiński (Szczerbiński 1983) w następującej postaci:

$$Q(t) = U \cdot \frac{C_p C_z}{C_p + C_z} + U \cdot \frac{C_p^2}{C_p + C_z} \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{R_z (C_p + C_z)}\right) - Q_0 \cdot \exp\left(\frac{-t}{R_z (C_p + C_z)}\right) \right] \quad (2)$$

gdzie:

$$Q_0 = \left(1 + 2 \frac{\varepsilon_z - \varepsilon_0}{\varepsilon_z + \varepsilon_0} \right) \varepsilon_0 E \pi r^2 \quad (3)$$



Rys. 3. Schemat elektrodynamycznego separatora bębnowego
1 – zbiornik nadawy, 2 – podajnik nadawy, 3 – bęben, 4 – szczotka, 5 – elektroda ulotowa,
6 – elektroda odchylająca, 7 – przegroda, 8, 9, 10 – zbiorniki produktów separacji

Fig. 3. Scheme of electrodynamic drum separator
1 – feed container; 2 – feeder; 3 – drum; 4 – brush; 5 – outlet electrode; 6 – angling electrode;
7 – diaphragm; 8, 9, 10 – separation products containers

- ↪ Q_0 – ładunek, który przyjmuje cząstka w polu ulotu [C],
- C_p – pojemność elektryczna ładunku na ziarnie względem elektrody ulotowej [F],
- C_z – pojemność elektryczna ładunku na ziarnie względem bębna [F],
- R_z – oporność elektryczna pomiędzy ładunkiem na ziarnie a bębniem [Ω],
- ε_z – przenikalność dielektryczna względna cząstki [Fm^{-1}],
- ε_0 – przenikalność dielektryczna próżni [Fm^{-1}],
- r – promień cząstki [m].

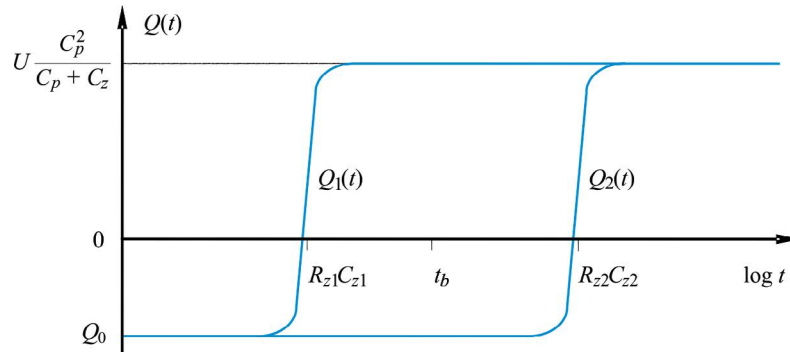
Przebieg ładunku cząstki w funkcji czasu przebywania na bębnie pokazano na rysunku 4.

Na podstawie zależności (3) i przebiegu ładunku na ziarnie pokazanego na rysunku 4 można określić zakres zastosowań separatora bębnowego w postaci zależności:

$$R_{z1}C_{z1} \ll t_b \ll R_{z2}C_{z2} \quad (4)$$

w której $R_{z1}C_{z1}$, $R_{z2}C_{z2}$ oznaczają odpowiednio właściwości elektryczne rozdzielanych cząstek, t_b czas przebywania cząstek na powierzchni bębna.

Zatem separacja jest skuteczna, jeśli spełniony jest warunek (4). Pełny opis modelu matematycznego separacji elektrodynamicznej przy użyciu separatora Huffa znaleźć można w opracowaniu Szczerbińskiego (1983).



Rys. 4. Przebieg ładunku na ziarnie w czasie przebywania na powierzchni bębna dla $U_0 \neq 0$ (cząstka naelektryzowana uprzednio w polu ulotu ładunkiem Q_0 – wg zależności (3))

Fig. 4. Course of charge on particle during stage on drum surface for $U_0 \neq 0$ (particle previously charged in outlet field with charge Q_0 – according to formula (3))

1.3. Mikroskopowy model separacji z wykorzystaniem separatora bębnowego

Warunek (4) informuje o zakresie zastosowania separatora bębnowego według konstrukcji Huffa. Dla określenia skuteczności rozdziału cząstek o różnych właściwościach elektrycznych konieczne jest określenie trajektorii ruchu cząstek po opuszczeniu przez nie powierzchni bębna, a więc stworzenie modelu mikroskopowego separacji. Na trajektorie separowanych cząstek wpływa wiele czynników, wśród których najważniejsze to: układ systemu elektrod, wartość wysokiego napięcia (oba czynniki determinują rozkład pola elektrycznego między bębnami), prędkość obrotowa bębna, granulacja separowanych cząstek, wilgotność względna otaczającego powietrza.

Kształt trajektorii cząstek w separatorze bębnowym związany jest z działaniem na cząstkę sił w czasie gdy znajduje się na powierzchni bębna, jak i po oderwaniu się od bębna: w obszarze pola elektrycznego.

Ogólne równanie reprezentujące działające siły ma postać:

$$m \frac{dv}{dt} = \Sigma F \quad (5)$$

↗ m – masa cząstki [g],

$\frac{dv}{dt}$ – przyspieszenie cząstki [ms^{-2}],

ΣF – suma sił działających na cząstkę [N].

W czasie, w którym cząstka znajduje się na powierzchni bębna działają na nią siły (zapisane są ich moduły):

- ◆ pola elektrycznego:

$$F_e = QE \quad (6)$$

- ◆ odbicia zwierciadlanego:

$$F_i = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0(d^2)} \quad (7)$$

- ↗ Q – ładunek cząstki [C],
- E – natężenie pola elektrycznego [Vm^{-1}],
- d – średnica bębna [m];

- ◆ odśrodkowa:

$$F_o = m \frac{v^2}{r} = m\omega^2 \frac{d}{2} \quad (8)$$

- ◆ grawitacji:

$$F_g = mg \quad (9)$$

- ↗ ω – prędkość kątowa bębna [s^{-1}],
- g – przyspieszenie ziemskie [ms^{-2}];

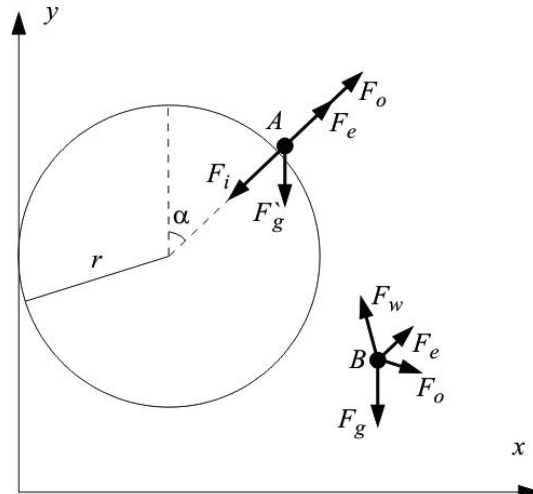
- ◆ dynamicznego oporu ośrodka:

$$F_w = \Psi S \frac{\rho v^2}{2} \quad (10)$$

- ↗ Ψ – współczynnik dynamicznego oporu środowiska [–],
- S – powierzchnia rzutu cząstki na płaszczyznę prostopadłą do kierunku ruchu [m^2],
- ρ – gęstość ośrodka, w którym porusza się ziarno [kgm^{-3}],
- v – prędkość ziarna [ms^{-1}].

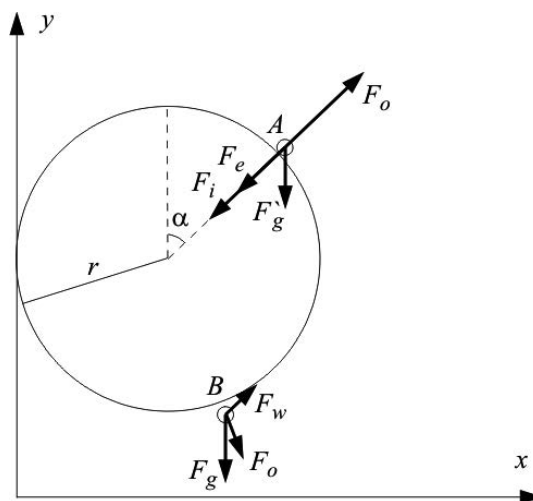
Ponadto, w procesie separacji na cząstki działają również siły zderzeń międzycząsteczkowych i inne, jednak mają one pomijalny wpływ na trajektorie cząstek i ich pominięcie nie wpływa na dokładność analizy.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono układy sił działających na cząstki w separatorze bębnowym (Li i in. 2007b). Natomiast na rysunku 5 przedstawiono siły działające na cząstki



Rys. 5. Rozkład sił działających na cząstki przewodzące

Fig. 5. Distribution of forces acting on conductive particles



Rys. 6. Rozkład sił działających na cząstki nieprzewodzące

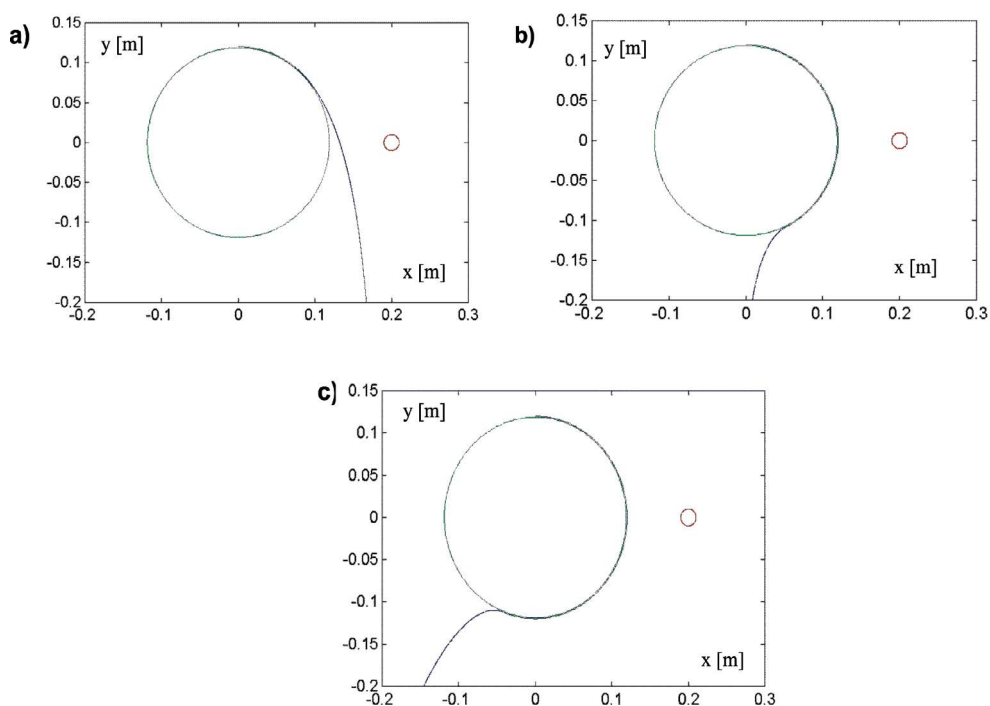
Fig. 6. Distribution of forces acting on non-conductive particles

przewodzące, cząstka *A* znajduje się na powierzchni bębna, cząstka *B* została oderwana z powierzchni bębna. Na rysunku 6 zaprezentowane zostały rozkłady sił działających na cząsteczki nieprzewodzące (cząstka – ze względu na dłuższą stałą czasową – wolniej się rozładowuje i dłużej pozostaje na powierzchni bębna). Jak widać z rozkładów sił zaprezentowanych na rysunkach 5 i 6, decydującą rolę w przypadku separacji cząstek przewodzących odgrywa suma siły elektrycznej (F_e) i siły odśrodkowej (F_o), natomiast w sytuacji,

gdy rozpatrujemy ruch cząstki nieprzewodzącej, efekt rozdziału zapewnia większa wartość siły elektrycznej (F_e) i siły zwierciadlanego odbicia (F_i).

Analizując działanie najważniejszych sił według rysunków 5 i 6, można określić trajektorie cząstek dla przyjętych warunków separacji. Na rysunkach 7a, b, c pokazano trajektorie cząstek o różnej rezystancji, obliczone za pomocą programu komputerowego (Cieśla 2002).

Przedstawione trajektorie potwierdzają wpływ podstawowego parametru, jakim jest przewodność elektryczna cząstek, na skuteczność rozdziału.



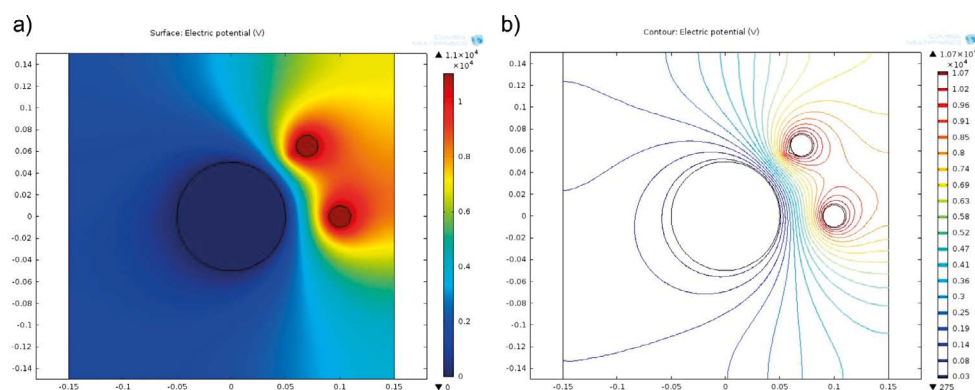
Rys. 7. Trajektorie cząstek (dla różnej rezystancji R_z) obliczone za pomocą programu komputerowego: a) $R_z = 1E4$ [Ω], b) $R_z = 4E6$ [Ω], c) $R_z = 7E6$ [Ω], $U = 15$ [kV] = const; $\omega = 8$ [rads $^{-1}$] = const.

Fig. 7. Trajectories of particles (for various resistance R_z) calculated by computer program: a) $R_z = 1E4$ [Ω], b) $R_z = 4E6$ [Ω], c) $R_z = 7E6$ [Ω], $U = 15$ [kV] = const; $\omega = 8$ [rads $^{-1}$] = const.

1.4. Numeryczna analiza rozkładu potencjału i pola elektrycznego

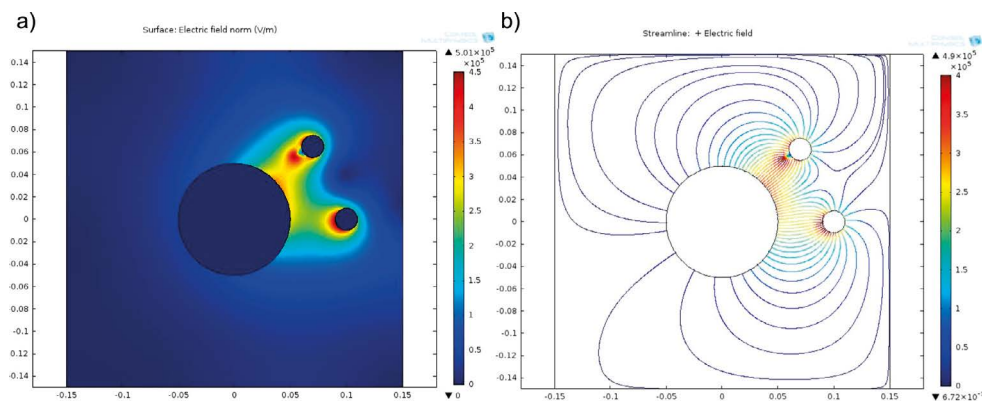
Fizyczne zasady elektroseparacji są znane od początków XX wieku. Niemniej jednak każda nowa aplikacja wymaga dużej ilości prac laboratoryjnych przed zastosowaniem przemysłowym. Z pomocą technice wychodzą naprzeciw wiarygodne modele matematyczne. Modelowanie nie jest substytutem badań eksperymentalnych, niemniej jednak może

przybliżyć wskazówki do rozwiązania problemów pojawiających się podczas badań empirycznych. Autorzy pracy przeprowadzili obliczenia rozkładu potencjału oraz natężenia pola elektrycznego w układzie separatora bębnowego (Krawczyk i Skowron 2014; Śliwa i Skowron 2014a, b). Obliczenia wykonane zostały przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych w środowisku COMSOL Multiphysics. Na rysunkach 8 i 9 zaprezentowano rozkłady potencjału i natężenia pola elektrycznego. Przedstawiono bęben oraz elektrody koronową i odchylającą. W związku z niewielkimi odległościami między elektrodą koronową a bębniem, może nastąpić wyładowanie zupełne, jest to zjawisko bardzo niekorzystne



Rys. 8. Rozkład potencjału elektrycznego w układzie analizowanego separatora
a) rozkład powierzchniowy, b) linie potencjału elektrycznego

Fig. 8. Distribution of electric potential in analyzed separator system
a) surface distribution; b) lines of electric potential



Rys. 9. Rozkład natężenia pola elektrycznego w układzie analizowanego separatora
a) rozkład powierzchniowy, b) linie natężenia pola elektrycznego

Fig. 9. Distribution of electric field intensity in analyzed separator system
a) surface distribution; b) lines of electric field intensity

dla procesu separacji. Natomiast zbyt małe natężenie pola elektrycznego może spowodować zbyt małe naładowanie cząstek przeznaczonych do separacji, a co za tym idzie zbyt małą skuteczność procesu rozdziału. Po wykonaniu szeregu symulacji i analizie wyników, podano rozkład potencjału elektrycznego dla optymalnej wartości napięcia równego 11 kV, dla którego wykonywano doświadczenia separacji próbek.

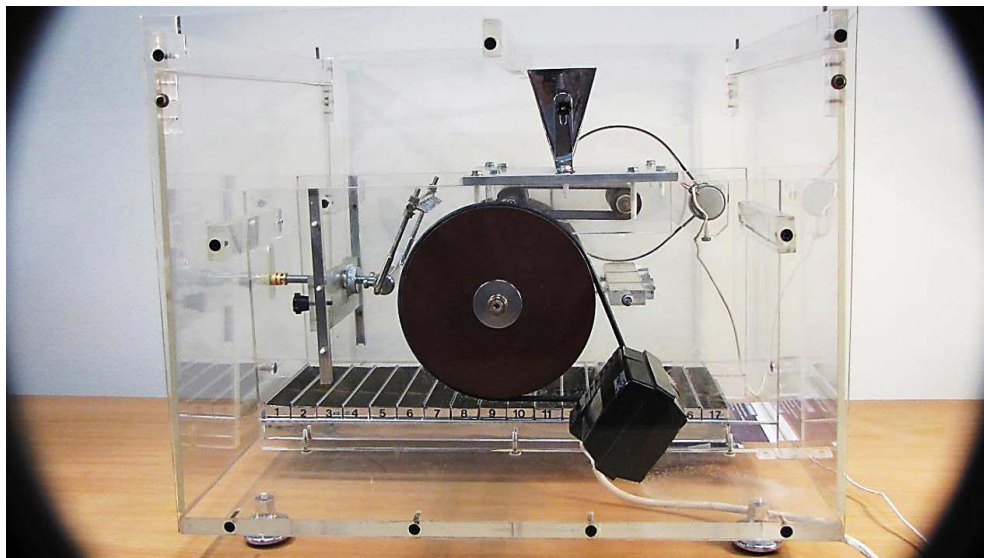
Jak wynika z przedstawionych symulacji (rys. 8 i 9), natężenie pola elektrycznego ma największą wartość w obszarze między elektrodą koronową (ulotową) a bębniem, czyli tam gdzie separowane cząstki są ładowane ulotem. Dużą wartość pole elektryczne ma także między elektrodą odchylającą a bębniem, czyli w obszarze, w którym cząstki są odrywane od bębna, a ich trajektorie odchylane w kierunku elektrody. Wyniki analizy numerycznej, mimo zastosowania profesjonalnego oprogramowania i dużej dokładności jaką zapewnia Metoda Elementów Skończonych, obarczone są w tym przypadku pewnym błędem. Rozważane zagadnienie należy do tzw. zagadnień o brzegu otwartym, a więc poza granicami bęben–powietrze oraz przewodnik–powietrze, konieczne było uznaniowe zamknięcie analizowanego obszaru brzegiem (tutaj: prostokąt jak na rys. 8 i 9). Użyte oprogramowanie nie udostępnia tzw. elementów nieskończonych, a zastosowanie innego pakietu, np. wykorzystującego Metodę Elementów Brzegowych, gdzie tego typu problem nie odgrywa istotnego znaczenia, przyczyniłoby się – zdaniem autorów – do wystąpienia błędów na istotnym poziomie w otoczeniu elektrod i bębna.

2. Badania eksperymentalne

Analiza modelu fizycznego wskazuje na fakt, że ważne jest określenie trajektorii separowanych ziaren. Istotne jest, aby ziarna w odpowiednim momencie zostały oderwane od powierzchni bębna i wpadły do odpowiedniego pojemnika. Zależy to od rozkładu sił działających na ziarna. Siły te są zależne od wielkości ziaren, prędkości obrotowej bębna, właściwości fizycznych ziaren (zdolności do elektryzowania), a przede wszystkim od natężenia pola elektrycznego. Konieczne jest obliczenie rozkładu potencjału i natężenia pola elektrycznego, aby określić siły wynikające z jego oddziaływania. Zbyt duże natężenie pola elektrycznego może powodować wyładowania zupełne, co jest bardzo niekorzystne w procesie separacji. Ziarna mogą też naładować się zbyt dużym ładunkiem i nie zdążą się w odpowiednim czasie rozładować. Zbyt małe natężenie pola może spowodować niedostateczne naładowanie ziaren, a co za tym idzie zbyt szybkie oderwanie się od powierzchni bębna. Przedstawione analizy i obliczenia, pozwoliły na przybliżone oszacowanie parametrów separacji.

2.1. Stanowisko badawcze

Separację elektrodynamiczną wykonano za pomocą laboratoryjnego separatora bębnowego (rys. 10). Na podstawie dostępnej literatury (Cieśla i Skowron 2013; Śliwa i Skowron



Rys. 10. Zdjęcie separatora bębnowego elektrodynamicznego

Fig. 10. Photo electrodynamic drum separator

2014, 2014a), dotyczącej separacji oraz obliczeń numerycznych i wykonaniu szeregu symulacji pracy separatora wybrano następujące parametry pracy separatora: napięcie elektrod równe 11 kV oraz stałe obroty bębna 60 obr/min.

Materiał do separacji stanowiły odpady elektroniczne z komputerowych płyt głównych. Najpierw rozdrobniono je w kruszarce wirnikowej nożowej, a następnie z rozdrobnionego materiału wysiano dwie klasy ziarnowe o wielkości ziaren 0–0,25 mm i 0,25–0,5 mm. Tak przygotowane próbki poddano separacji w elektrodynamicznym separatorze bębnowym przy zachowaniu stałych warunków temperatury i wilgotności otoczenia. Produkty separacji zebrano w pojemnikach ponumerowanych od 1 do 10. Materiał z każdego pojemnika zważono i wyliczono udziały masowe produktów separacji. W każdym produkcie zebranym w kolejnych pojemnikach oznaczono zawartość poszczególnych pierwiastków tj: Ti, Fe, Cu, Sn, Pb, Bi przy użyciu spektrometru XRF odpowiednio dla obydwu klas ziarnowych.

2.2. Analiza wyników badań

Rozkład udziału masowego i zawartości poszczególnych pierwiastków w produktach zebranych w wyniku separacji odpadów elektronicznych w klasach ziarnowych zestawiono w tabelach 1 i 2.

Separację elektrodynamiczną powszechnie stosuje się w celu rozdzielania ziaren przewodzących od nieprzewodzących. Takiemu rozdziałowi najprawdopodobniej będzie

towarzyszyła koncentracja jednego rodzaju pierwiastków w konkretnych pojemnikach znajdujących się w określonej odległości od bębna separatora. Rozkład zawartości pierwiastków: tytanu, miedzi, żelaza, ołowiu, cyny w ponumerowanych pojemnikach od 1 do 10 w badanych klasach ziarnowych po separacji w elektrodynamicznym separatorze bębnowym zestawiono na rysunkach 11–20. Przy każdym rysunku podano średnią zawartość pierwiastka w materiale wyjściowym i oznaczono jako α .

Tabela 1. Zawartość poszczególnych pierwiastków w produktach separacji odpadów elektronicznych, klasa 0,25–0,5 mm

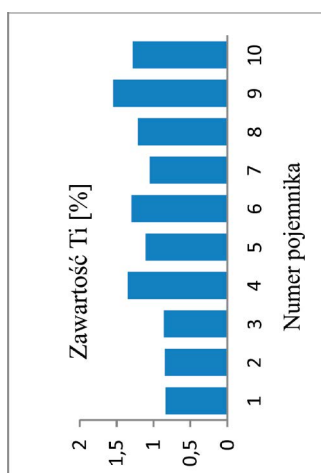
Table 1. Contents of individual elements in products of electronic wastes separation, fraction 0.25–0.5 mm

| Nr pojemnika | Udział [%] | Ti [%] | Fe [%] | Cu [%] | Sn [%] | Pb [%] | Bi [%] |
|--------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 3,29 | 0,51 | 1,89 | 39,97 | 5,5 | 6,09 | 0 |
| 2 | 8,98 | 0,51 | 1,81 | 38,05 | 5,1 | 5,03 | 0 |
| 3 | 18,86 | 0,57 | 2,86 | 32,3 | 4,53 | 4,91 | 0 |
| 4 | 20,06 | 0,69 | 3,61 | 18,77 | 2,2 | 2,35 | 0,68 |
| 5 | 15,87 | 0,89 | 3,08 | 15,14 | 1,71 | 2,16 | 0,52 |
| 6 | 13,47 | 0,92 | 1,40 | 10,21 | 0,84 | 1,05 | 0,65 |
| 7 | 11,98 | 1,04 | 1,13 | 5,21 | 0,62 | 0,73 | 0,87 |
| 8 | 5,69 | 1,51 | 1,41 | 3,7 | 0,27 | 0,39 | 1,06 |
| 9 | 1,80 | 1,26 | 1,04 | 0,88 | 0,13 | 0,19 | 1,09 |
| 10 | 26,5 | 1,37 | 1,18 | 1,01 | 0,14 | 0,2 | 0,77 |

Tabela 2. Zawartość poszczególnych pierwiastków w produktach separacji odpadów elektronicznych, klasa 0–0,25 mm

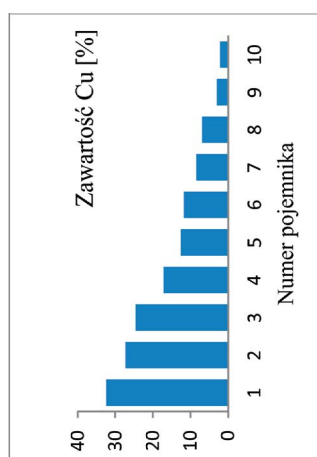
Table 2. Contents of individual elements in products of electronic wastes separation, fraction 0–0.25 mm

| Numer pojemnika | Udział [%] | Ti [%] | Fe [%] | Cu [%] | Sn [%] | Pb [%] | Bi [%] |
|-----------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 4,44 | 0,84 | 6,0 | 32,38 | 7,15 | 7,4 | 0 |
| 2 | 4,44 | 0,87 | 7,39 | 27,34 | 6,41 | 6,34 | 0 |
| 3 | 3,89 | 0,96 | 7,93 | 24,63 | 4,86 | 4,98 | 0,16 |
| 4 | 4,44 | 1,35 | 10,25 | 17,17 | 3,43 | 3,81 | 0,29 |
| 5 | 2,78 | 1,11 | 9,53 | 12,54 | 2,39 | 2,74 | 0,37 |
| 6 | 2,78 | 1,3 | 6,76 | 11,78 | 2,0 | 2,45 | 0,4 |
| 7 | 5,00 | 1,3 | 6,05 | 8,48 | 1,91 | 2,09 | 0,4 |
| 8 | 2,78 | 1,31 | 6,14 | 6,91 | 1,49 | 1,99 | 0,49 |
| 9 | 7,78 | 1,55 | 5,43 | 3,05 | 0,66 | 1,0 | 0,63 |
| 10 | 61,67 | 1,23 | 3,41 | 2,14 | 0,83 | 0,9 | 0,4 |



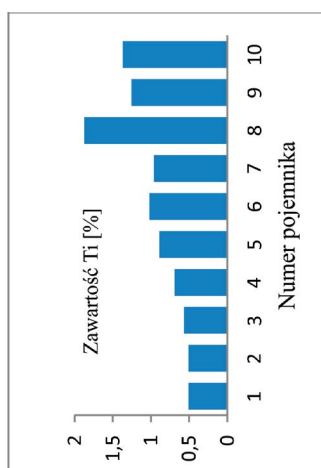
Rys. 11. Rozkład zawartości Ti w produktach po separacji, klasa 0–0,25 mm, $\alpha = 1,22\%$

Fig. 11. Distribution of Ti contents in separation products, fraction 0–0.25 mm, $\alpha = 1.22\%$



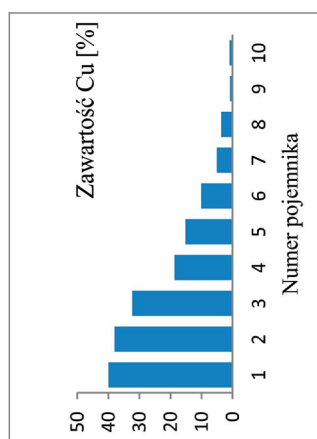
Rys. 13. Rozkład zawartości Cu, w produktach po separacji, klasa 0–0,25 mm, $\alpha = 7,22\%$

Fig. 13. Distribution of Cu contents in separation products, fraction 0–0.25 mm, $\alpha = 7.22\%$



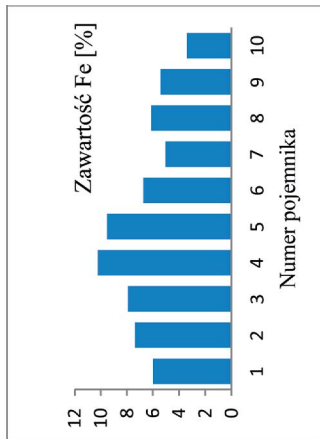
Rys. 12. Rozkład zawartości Ti w produktach po separacji, klasa 0,25–0,5 mm, $\alpha = 1,042\%$

Fig. 12. Distribution of Ti contents in separation products, fraction 0.25–0.5 mm, $\alpha = 1.042\%$



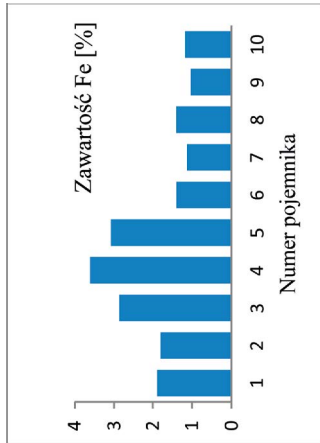
Rys. 14. Rozkład zawartości Cu, w produktach po separacji, klasa 0,25–0,5 mm, $\alpha = 19,22\%$

Fig. 14. Distribution of Cu contents in separation products, fraction 0.25–0.5 mm, $\alpha = 19.22\%$



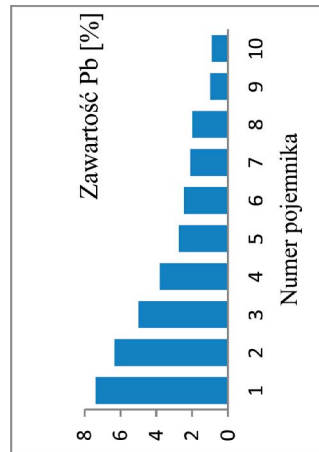
Rys. 15. Rozkład zawartości Fe w produktach po separacji, klasa 0–0,25 mm, $\alpha = 4,18\%$

Fig. 15. Distribution of Fe contents in separation products, fraction 0–0.25 mm, $\alpha = 4.18\%$



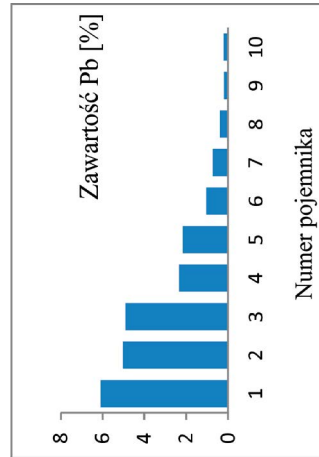
Rys. 16. Rozkład zawartości Fe w produktach po separacji, klasa 0,25–0,5 mm, $\alpha = 2,40\%$

Fig. 16. Distribution of Fe contents in separation products, fraction 0.25–0.5 mm, $\alpha = 2.40\%$



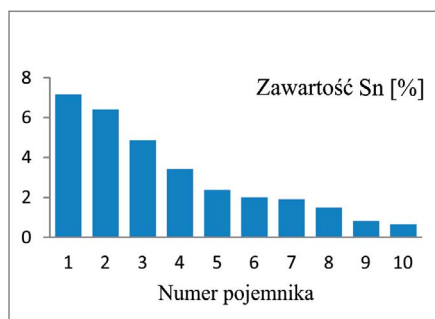
Rys. 17. Rozkład zawartości Pb w produktach po separacji, klasa 0–0,25 mm, $\alpha = 1,91\%$

Fig. 17. Distribution of Pb contents in separation products, fraction 0–0.25 mm, $\alpha = 1.91\%$



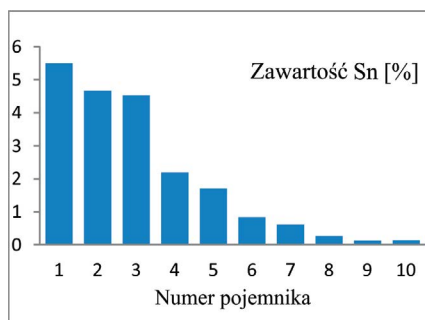
Rys. 18. Rozkład zawartości Pb w produktach po separacji, klasa 0,25–0,5 mm, $\alpha = 2,65\%$

Fig. 18. Distribution of Pb contents in separation products, fraction 0.25–0.5 mm, $\alpha = 2.65\%$



Rys. 19. Rozkład zawartości Sn w produktach po separacji, klasa 0–0,25 mm $\alpha = 1,77\%$

Fig. 19. Distribution of Sn contents in separation products, fraction 0–0.25 mm, $\alpha = 1.77\%$



Rys. 20. Rozkład zawartości Sn w produktach po separacji, klasa 0,25–0,5 mm $\alpha = 2,41\%$

Fig. 20. Distribution of Sn contents in separation products, fraction 0.25–0.5 mm, $\alpha = 2.41\%$

Analiza wyników przedstawionych w tabelach 1 i 2 i na rysunkach 11–20 pokazuje, że zawartość tytanu koncentruje się w pojemnikach o numerach od 7 do 9 w klasie o większych wymiarach ziaren, natomiast w klasie drobniejszej ($< 0,25$ mm) maksymalną koncentrację Ti obserwuje się w pojemnikach o numerach 6 do 10. Widać dość duże zawartości Cu, Pb, Sn w pojemnikach o niskich numerach (1–3) w obydwu przypadkach, tj. w badanych klasach ziarnowych. Przy czym największe zawartości tych składników obserwuje się w pojemnikach 1–3 w klasie 0,25–0,5 mm i w pojemnikach o numerach 1–7 w klasie 0–0,25 mm. Maksymalne zawartości Fe można uzyskać z pojemników o numerach 3 do 5. Z kolei koncentrację bizmutu obserwuje się w pojemnikach o numerach 6–9 w klasie 0,25–0,5 mm, natomiast w klasie drobniejszej rozkład zawartości ma dość nieregularny charakter. Taki rozkład zawartości poszczególnych pierwiastków związany jest z uziarnieniem materiału, co z kolei wpływa na stopień uwolnienia pierwiastków oraz z możliwością elektryzacji powierzchniowej. W tabeli 3 zestawiono właściwości elektryczne pierwiastków – konduk-

Tabela 3. Właściwości elektryczne wybranych pierwiastków

Table 3. Electric properties of selected elements

| | Konduktywność γ [MS/m] | Rezystywność ρ [$\mu\Omega\cdot m$] |
|--------|-------------------------------|--|
| Żelazo | 10,3 | 0,10 |
| Miedź | 58,5 | 0,02 |
| Cyna | 8,3 | 0,12 |
| Ołów | 4,8 | 0,21 |
| Tytan | 1,4 | 0,71 |
| Bizmut | 0,8 | 1,25 |

tywność i opór właściwy, na podstawie których można tłumaczyć zjawisko wpadania ziaren do pojemników, według ich zdolności do elektryzowania powierzchni.

Gdyby wziąć pod uwagę jedynie właściwości elektryczne rozdzielanych składników to materiał powinien się rozdzielić w kolejności: miedź, żelazo, cyna, ołów, tytan, bizmut poczynając od pojemnika nr 1 aż do ostatniego. Jednakże, nawet w specjalnych warunkach wykonywania laboratoryjnej separacji, na dokładność rozdziału ma wpływ szereg czynników, m.in. wielkość ziaren oraz ich gęstość (Niedoba 2013a, b). Doświadczenia wykonywano na wąskich klasach ziarnowych, aby wykluczyć efekt klasyfikacji ziaren, jednak najpewniej ujawnia się tutaj wpływ gęstości ziaren na efekt rozdziału.

Podsumowanie

Analiza wyników badań skłania do następujących wniosków i spostrzeżeń:

- ◆ Za pomocą separacji elektrodynamicznej można wydzielić składniki przewodzące od nieprzewodzących z odpadów elektronicznych. Dodatkowo zaobserwowano rozkład niektórych pierwiastków w produktach rozdziału. Można zatem stwierdzić, że z powodzeniem oddziela się Ti od pozostałych analizowanych składników. Dla produktów zawierających w swoim składzie Cu, Pb, Sn należałoby w celu rozdzielania tych pierwiastków zastosować inną metodę separacji lub odzyskiwać poszczególne metale w procesach metalurgii lub hydrometalurgii. Produkty zawierające żelazo można skierować do doczyszczczenia metodami separacji magnetycznej.
- ◆ Zaletą separacji elektrostatycznej jest prowadzenie jej na sucho, w związku z tym nie ma dodatkowych procesów zagęszczania i odwadniania zawieszin, co eliminuje konieczność stosowania dodatkowych maszyn i urządzeń.
- ◆ Wykorzystując różnice we właściwościach elektrycznych składników (pierwiastków) tworzących minerały, można podjąć próbę zaimplementowania tego rodzaju separacji na składniki pierwotne. Autorzy zamierzają podjąć próby wykonania eksperymentów w tym kierunku.

Artykuł opracowano w ramach działalności statutowej nr 11.11.100.276

LITERATURA

- Birloaga i in. 2013 – Birloaga, I., De Michelis, I., Ferella, F., Buzatu, M. and Veglio, F. 2013. Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery. *Waste Management* 33, s. 935–941.
- Brożek, M. 1984. Evaluation of liberation efficiency index of coal mineral substance on the basis of Hall's separation curve. *Przegląd Górniczy* 11, s. 384–387.
- Brożek, M. i Surowiak A. 2004. Distribution of settling velocity of particles in samples of mineral raw materials. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 20, s. 67–84.
- Brożek, M. i Surowiak, A. 2010. Argument of separation at upgrading in the jig. *Archives of Mining Sciences*, 55, s. 21–40.
- Brożek i in. 2015 – Brożek, M., Surowiak, A. i Jarosiński A. 2015. Beneficiation of chromium waste by means of magnetic and gravitational separation. *Archives of metallurgy and materials* vol 60, iss. 3, s. 1737–1744
- Cieśla, A., 2002. Analiza dynamicznego działania statycznych pól: elektrycznego i magnetycznego w procesach technologicznych, *SPEYO XXV Międzynarodowa Konferencja z Podstaw elektrotechniki i teorii obwodów*, s. 37–40.
- Cieśla, A. i Skowron, M. 2013. Influence of high voltage on drum electrodynamic separator effectiveness. ISEF 2013 – *XVI International Symposium on Electromagnetic Fields in mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*, Ohrid, Macedonia.
- Cieśla, A. 2013. Badania eksperymentalne ruchu strugi naelektryzowanych ziaren w polu elektrycznym separatora odchylającego. *Przegląd Elektrotechniczny* 89, nr 12, s. 215–218.
- Drzymała J., 2001. Podstawy mineralurgii. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Krawczyk, M. i Skowron, M. 2014. Oddziaływanie pola magnetycznego na płynącą ciecz o wybranych właściwościach magnetycznych. *Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska* Vol. 4, nr 2, s. 24–27,
- Li i in. 2007a – Li, J., Xu, Z. and Zhou, Y. 2007a. Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards. *Journal of Electrostatics* 65, s. 233–238.
- Li i in. 2007b – Li, J., Lu, H., Guo, J., Xu, Z. and Zhou, Y. 2007b. Recycle Technology for Recovering Resources and Products from Waste Printed Circuit Boards. *Environmental Science and Technology* 41 (6), s. 1995–2000.
- Li i in. 2008 – Li, J., Lu, H., Liu, S. and Xu, Z. 2008. Optimizing the operating parameters of corona electrostatic separation for recycling waste scraped printed circuit boards by computer simulation of electric field. *Journal of Hazardous Materials* 153, s. 269–275.
- Łuszczkiewicz, A. i Kurzyca, M. 1986. Wydzielenie ilmenitu z półproduktów przeróbki piasków drogą wzbogacania elektrycznego. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii* 18, s. 179–191.
- Niedoba, T. 2013a. *Statistical analysis of the relationship between particle size and particle density of raw coal. Physicochemical Problems of Mineral Processing* 49 (1), s. 175–188.
- Niedoba, T. 2013b. Elementy metodologii stosowania dwu- i wielowymiarowych rozkładów właściwości materiałów uziarnionych do opisu wzbogacania węgla. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 29 (2), s. 155–172.
- Surowiak, A., 2014. Wpływ rozkładu gęstości ziaren na rozkład ich prędkości opadania dla wąskich klas ziarnowych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 30 z. 1, s. 105–122.
- Surowiak, A. i Brożek, M., 2014a. Methodology of calculation the terminal settling velocity distribution of spherical particles for high values of the Reynold's number, *Archives of Mining Sciences* vol. 59 iss. 1, s. 269–282.
- Surowiak, A. i Brożek, M., 2014b. Methodology of calculation the terminal settling velocity distribution of irregular particles for high values of the Reynold's number, *Archives of Mining Sciences* vol. 59 iss. 2, s. 553–562.

- Surowiak, A. i Brożek, M., 2016. A physical model of separation process by means of JIGS, *Physicochemical Problems of Mineral Processing* vol. 52 iss. 1, s. 228–243.
- Szczerbiński, M. 1983. Electrodynamic Conductance Separation with use of Alternating Fields. *Journal of Electrostatics*, s. 175-186.
- Śliwa, U. i Skowron, M. 2014a. *Analiza rozkładu pola elektrycznego w separatorze bębnowym o różnej konfiguracji elektrod. Współczesne Zagadnienia Modelowania Matematycznego, Warsztaty doktoranckie 2014*, Biały Dunajec s. 128–139.
- Śliwa, U. i Skowron, M. 2014b. *Analiza rozkładu pola elektrycznego w separatorze bębnowym o różnej konfiguracji elektrod. Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, (w druku).
- Veit i in. 2005 – Veit, H.M., Diehl, T.R., Salami, A.P., Rodrigues, J.S., Bernardes, A.M. and Tenorio, J.A.S. 2005. Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap. *Waste Management*, 25, s. 67–74.

WYKORZYSTANIE BĘBNOWEGO SEPARATORA ELEKTRODYNAMICZNEGO DO SEPARACJI ODPADÓW ELEKTRONICZNYCH

Słowa kluczowe

elektrodynamiczny separator bębnowy, rozkład natężenia pola elektrycznego,
odpady elektroniczne, separacja elektrodynamiczna

Streszczenie

Statyczne pola elektryczne są wykorzystywane m.in. w procesach technologicznych, takich jak separacja elektryczna. Separacja elektrodynamiczna jest procesem rozdzielania dwóch lub większej ilości faz stałych, zróżnicowanych pod względem właściwości fizycznych, siłami pola elektrycznego. Zaletą separacji elektrodynamicznej jest możliwość uzyskania rozdziału poszczególnych składników na sucho, co eliminuje szereg operacji, takich jak: zagęszczanie, odwadnianie, hydrotransport, dosuszanie. Czynności te zwiększają energochłonność i koszty procesu separacji. Efektywność wzbogacania zależy od wielu czynników, takich jak: właściwości elektryczne składników nadawy, uziarnienie nadawy, prędkości wirowania bębna, natężenie pola elektrycznego w przestrzeni roboczej separatora, konfiguracji elektrod czy warunków otoczenia.

W artykule przedstawiono działanie wysokonapięciowego separatora bębnowego. Dokonano analizy rozkładu pola elektrycznego przestrzeni roboczej separatora oraz sił działających na cząstki o właściwościach dielektrycznych i przewodzących, przedstawiono także tory ruchu naelektryzowanych cząstek. Wykonano laboratoryjne badania separacji odpadów elektronicznych w dwóch klasach ziarnowych: 0–0,25 mm i 0,25–0,5 mm. Zaobserwowano, że w wyniku selektywnego ładowania cząstek rozdzielają się one według zdolności powierzchniowego elektryzowania się, co pozwala uzyskać selektywny rozdział składników tworzących tzw. śmieci elektroniczne. Zastosowanie elektrodynamicznego separatora bębnowego pozwala rozdzielić pierwiastki, takie jak Ti, Cu, Fe, Pb, Sn od tworzyw sztucznych znajdujących się w odpadach elektronicznych.

APPLICATION OF ELECTRODYNAMIC DRUM SEPARATOR TO ELECTRONIC WASTES SEPARATION**Keywords**

electrodynamic drum separator, distribution of electric field intensity, electric wastes, electrodynamic separation

Abstract

Static electric fields are used, among others, in technological processes such as electric separation. Electrodynamic separation is a process of separating two or more solid phases of various physical properties by electric field forces. The advantage of electrodynamic separation is possibility of obtaining separation of individual components in dry conditions. This eliminates many operations such as thickening, dewatering, hydrotransportation, additional drying which cause higher energy consumption and higher separation process costs. Efficiency of beneficiation depends on many factors such as: electric properties of feed components, feed particle size distribution, drum rotary speed, electric field intensity in working space of separator, configuration of electrodes or surrounding conditions.

The paper presents the working of high-voltage drum separator. The analysis of electric field distribution in separator working space was done. Additionally, distribution of forces acting on particles of dielectric and conductive properties was examined, trajectories of charged particles movement were presented too. The laboratory investigations of electronic wastes were performed in two particle fractions: 0.25–0.5 mm and 0–0.25 mm. It was observed that as a result of selective charging of particles they separate according to surface ability to electrifying what allows to obtain selective separation of components being so-called electronic wastes. The application of electrodynamic drum separator allows to separate such elements as Ti, Cu, Fe, Pb, Sn from plastics occurring in electronic wastes.