



# Elektrostatyczna metoda oddzielania mieszaniny PET/PVC

## Electrostatic separation of PET/PVC mixture

Gordan BEDEKOVIĆ<sup>1)</sup>, Branko SALOPEK<sup>2)</sup>, Ivan SOBOTA<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Prof. Dr.; University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering; Pierottijeva 6, 10002 Zagreb, Croatia; E-mail: gordan.bedekovic@rgn.hr, tel.: +385 1 5535 861

<sup>2)</sup> Prof. Dr.; University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering; Pierottijeva 6, 10002 Zagreb, Croatia; E-mail: branko.salopek@rgn.hr, tel.: +385 1 5535 888

<sup>3)</sup> Dr.; University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering; Pierottijeva 6, 10002 Zagreb, Croatia; E-mail: isobota@rgn.hr, tel.: +385 1 5535 8889

### Streszczenie

Ze względu na korzystne właściwości tworzywa sztuczne, wypierają inne typy materiałów, zwłaszcza w przemyśle pakowniczym. Przyczynia się to do ciągłego wzrostu ilości odpadów. Duża ilość odpadów, malejące powierzchnie ich składowania, długi czas rozkładu, czy emisja niebezpiecznych substancji powstałych na skutek procesów: spalania, wietrzenia i, przyczyniły się do stwierdzenia, że składowanie odpadów stało się bardzo ważnym zagadnieniem środowiskowym. Odpady tworzyw sztucznych poddane recyklingowi charakteryzują się mniejszym, szkodliwym wpływem na środowisko oraz umożliwiają zaoszczędzenie powierzchni oraz naturalnych zasobów. Celem tego raportu jest ocena wydajności elektrostatycznego separatora podczas oddzielania mieszaniny PET/PVC. Wpływ potencjału elektrodowego oraz prędkości obrotu wirnika na proces oddzielania był badany dla trzech różnych wielkości cząstek (4/3.15, 3.15/2 i 2/1 mm). Wskaźniki wydajności procesu separacji mieszaniny dwuskładnikowej to: stopień zagęszczenia, oraz stopień odzysku. Najlepsze wyniki (100% stopień i 87% odzysku) otrzymano dla procesu oddzielania cząstek gruboziarnistych 4/3.15 mm, po dwóch wcześniejszych etapach separacji przy potencjale elektrodowym 15,5 kV i dla prędkości obrotu 35 m/min.

### Summary

Nowadays, due to their numerous favourable properties, plastic materials replace other materials in many industries, especially packaging industries, and therefore the generation of plastic waste is constantly increasing. Due to increasing waste volume and decreasing landfill disposal capacity, as well as a long decomposition time of plastic materials and emissions of hazardous substances either by weathering, natural drying or incineration processes, the disposal of plastic waste has become an important environmental problem worldwide. Waste plastics can be recycled which decreases potential harmful influence on the environment and saves landfill space and natural resources. The aim of the research presented in this paper was to evaluate the performance of the electrostatic separator when separating a PET/PVC mixture. The effect of electrode potential and rotor speed on the separation have been studied on three different particle size classes (4/3.15, 3.15/2 and 2/1 mm). Indicators of separation efficiency for two-component plastic mixture were the concentrate grade and recovery. The best result (100% grade and 87% recovery) was obtained by separating coarse particle size class 4/3.15 mm after two separation stage at the electrode potential of 15.5 kV and rotor speed of 35 m/min.

Słowa kluczowe: polimer, PVC, PET, separacja elektrostatyczna

Keywords: polymers; PVC; PET; electrostatic separation

## 1. Wstęp

Tworzywa sztuczne posiadają wiele pożądanych właściwości takich jak: relatywnie niska gęstość, odporność na korozję oraz doskonałe właściwości izolacyjne dla przewodnictwa prądowego i cieplnego. Łatwość formowania złożonych kształtów, umożliwia łączenie różnych materiałów o różnych właściwościach. Pożądane właściwości dla produktu o określonym zastosowaniu, osiąga się poprzez dodatek: wypełniaczy, barwników, środków pianących (surfaktantów), środków przeciwzapalnych, plastyfikatorów itp. (PlasticsEurope, 2010a). Z tych powodów materiały plastikowe, bardzo szybko zastępują w wielu działach przemysłu (zwłaszcza w usługach pakowniczych), materiały takie jak: metal, szkło,

## 1. Introduction

Plastic materials have many desirable properties such as relatively low density, corrosion resistance and excellent thermal and electrical insulation properties. They are also easy to mould into complex shapes and forms, allowing integration of different materials and functions. If it is necessary, the property balance can be modified with the addition of reinforcing fillers, colours, foaming agents, flame retardants, plasticisers, etc. to meet the demands of the specific application (PlasticsEurope, 2010a). For these reasons, plastic materials are more and more replacing other materials such as metals, glass, ceramics, wood and paper in various products, especially in packaging. Packaging accounts for 35% of

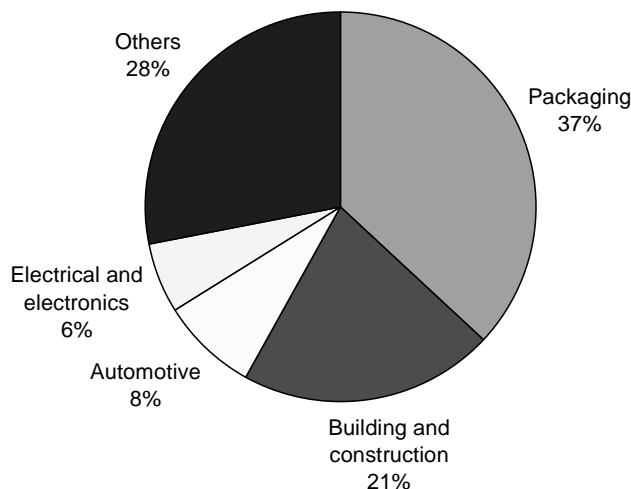
ceramika, drewno, a także papier. Przemysł opakowaniowy konsumuje ok. 35% wytwarzanego plastiku na świecie (Al – Salem et. al., 2009). Całkowita ilość wytworzonych produktów plastikowych na świecie, wzrosła z 1,5 mln ton (1950 rok) do 245 mln ton (dane na rok 2008) (PlasticsEurope, 2010b). Europejska produkcja plastiku (UE 27 + Norwegia i Szwajcaria) o wartości 60 mln ton rocznie stanowi 25% globalnej produkcji. Jak przedstawia rysunek 1, przemysł opakowaniowy jest największym konsumentem plastiku, ok. 37%, na dalszych miejscach plasuje się: przemysł budowlany ok. 21%, motoryzacyjny ok. 8%, elektryczny 6%, rolniczy, medyczny, turystyczny stanowią pozostałe 28% (EUPR, 2010). Z drugiej strony, nieustanny wzrost produkcji tworzyw sztucznych, prowadzi do powstawania coraz większej ilości odpadów, które powinny być w odpowiedni sposób utylizowane, aby nie wpływały negatywnie na środowisko. Całkowitą ilość odpadów plastikowych, wyprodukowanych w Europie w 2007 roku szacuje się na 24,6 mln ton, prawie dwie trzecie z tej ilości stanowią odpady pochodzące z przemysłu pakowniczego (Interpack, 2010). Odpady tworzyw sztucznych są jedną z najliczniejszych grup odpadów komunalnych (MSW), w szczególności w krajach uprzemysłowionych (Braun, 2002; Shen et al. 1999). Tak duża ilość zróżnicowanych mieszanin plastiku stanowi duże obciążenie zarówno dla składowisk jak i środowiska.

Pomimo, że wywóz odpadów tworzyw sztucznych jest najmniej pożądaną opcją zarządzania odpadami, główna ich ilość jest składowana na wysypiskach albo

all plastics consumed worldwide (Al-Salem et al., 2009). The total global production of plastics grew from around 1.5 million tonnes in 1950 to 245 million tonnes in 2008 (PlasticsEurope, 2010b). Plastics production in Europe (EU27 + Norway and Switzerland) represents 25% of the global plastics production, with approximately 60 million tonnes per year. As seen in Fig. 1, the packaging industry remains the biggest plastics end-user at 37%, followed by the building and construction sector at 21%, automotive industry 8%, electrical and electronics industry 6%, agriculture, medical, leisure and other applications 28% (EuPR, 2010). On the other hand, the incessant increase in the consumption of plastic products inevitably results in the generation of a vast solid waste stream that needs to be properly managed to avoid environmental damage. E.g., the total amount of around 24.6 million tonnes of plastic waste was generated in Europe in 2007 and, on average across the EU, almost two-thirds of that came from the packaging industry (INTERPACK, 2010). Plastics waste has become one of the larger categories in municipal solid waste (MSW), particularly in the industrialised countries (Braun, 2002; Shen et al., 1999). Such large quantities of a diverse mixture of plastics place a great burden on limited landfill capacity and environment without considering an appropriate waste management strategy.

Although waste disposal is the least desirable waste management option, a major portion of plastic waste is still either disposed to landfills or incine-

Europe (EU27+NO,CH)



Rys. 1  
Zastosowanie tworzyw sztucznych w Europie w 2008 r.

Fig. 1  
End-use applications of plastics processed in Europe in 2008

spalana (bez odzysku energii). Pozostała ilość jest poddawana recyklingowi (ACRR, 2004; Aguado et al., 2007). Zagrożenia środowiskowe są związane z tradycyjnymi metodami utylizacji się odpadów, wliczając w to spalanie bez odzysku energii oraz składowanie. Spalanie plastiku, może powodować emisję toksycznych gazów oraz pyłów, zawierających ołów i kadm (Dodbiba and Fujita, 2004; Gente et al., 2003; Wey et al., 1998). Szczególnie odpady zawierające PVC prowadzą do zanieczyszczenia powietrza i znacznego skrócenia „żywności” spalarni na skutek generowania niebezpiecznych substancji takich jak: kwas chlorowodorowy (HCl) i dioksyny zawierające chlor (Braun, 2002; Park et al., 2007). W świetle tych rozważań, jak również rosnących cen paliw kopalnych (jako surowiec w produkcji tworzyw sztucznych) oraz potrzebę ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, recykling, szybko zyskuje na znaczeniu jako alternatywne rozwiązanie do zarządzania odpadami tworzyw sztucznych (ACRR, 2004; Shen et al., 1999).

Każdy kolejny krok w procesie recyklingu (zbiórka, sortowanie, separacja, przetwarzanie polimerów i produkcja nowych wyrobów z przetworzonego plastiku) stanowi wartość dla wykorzystanych tworzyw sztucznych i stawia je na uprzywilejowanej pozycji dla innych wytwórców i użytkowników końcowych, którzy wykorzystują je do wytwarzania nowych produktów. Ilość produktu i rodzaj procesów: sortowania i przetwarzania, zależy od stopnia czystości przetworzonych tworzyw sztucznych, jak również końcowego zastosowania, do którego są przeznaczone (Hurd, 1997). Istnieje wiele problemów, którym recykling musi stawić czoła. Głównie dotyczą się one separacji i oczyszczania. Podstawowy problem związany jest z dużą różnorodnością polimerów występujących w odpadach oraz złymi właściwościami mechanicznymi wyrobów powstałych z przetworzenia takiej mieszanki. Dodatkowo PVC i PET powodują największe problemy związane z zanieczyszczeniem środowiska. (Drelich et al., 1998, 1999; Marques and Tenório, 2000; Paci and La Mantia, 1999). Poużytkowy PET jest zanieczyszczony przez wiele substancji, takich jak: kwaśne produkty (octan winylu, kleje, PVC), barwniki (np. fragmenty szklanych butelek), wodę, aldehyd octowy, pozostałości detergentów, paliwo i pestycydy, co powoduje pogorszenie jego właściwości fizycznych jak i chemicznych w czasie procesu przetwarzania. Podstawowe zanieczyszczenie PET w procesie recyklingu stanowi każde źródło PVC (Awaja and Pavla, 2005; Hurd, 1997). PET i PVC mają różne temperatury topnienia i mięknienia. Z tego powodu nie mogą być przetwarzane razem. PET topi się w temperaturze 260°C, podczas gdy PVC w 200°C uwalniając przy tym kwas solny, który

rated (without energy recovery) and the rest is recycled/reused (ACRR, 2004; Aguado et al., 2007). Environmental hazards are associated with traditional methods of waste disposal including incineration without energy recovery and landfilling. The incineration of some plastics may cause the emission of large amounts of toxic gases, together with generation of toxic fly and bottom ash that contain lead and cadmium (Dodbiba and Fujita, 2004; Gente et al., 2003; Wey et al., 1998). Particularly, waste plastics containing PVC lead to air pollution and shorten the life of incinerator as generating many hazardous substances such as hydrogen chloride gas (HCl) and dioxins containing chlorine (Braun, 2002; Park et al., 2007). In view of these considerations, as well as the rising prices of fossil fuels (as the raw material in plastics production) and need for limiting greenhouse gases emissions, recycling are rapidly gaining importance as an alternative solution to manage plastic waste (ACRR, 2004; Shen et al., 1999).

Each subsequent step in the recycling process (collection, sorting and separation, reprocessing of polymers and manufacturing of new products from the melted plastic) adds value to the post-consumer plastics and puts it into marketable form for other processors and end-users that will use them to manufacture new products. The amount and type of sorting and processing required depends on the purity level to which plastic flakes are processed i.e. the end-use applications for which they are intended (Hurd, 1997). There are many problems facing the plastics recycling industry but are primarily in the areas of separation and purification. The major problem is connected to a great incompatibility of different polymers present in the waste and inferior mechanical properties of the products resulting from the processing of such a mixture of polymers. For instance, most packaging plastics are mutually incompatible, and PVC and PET present the worst of the cross-contamination problems (Drelich et al., 1998, 1999; Marques and Tenório, 2000; Paci and La Mantia, 1999). Although post-consumer PET is contaminated with many substances, causing deterioration of its physical and chemical properties during reprocessing, such as acid producing contaminants (polyvinyl acetate, adhesives, PVC), colouring contaminants (e.g. fragments of coloured bottles), water, acetaldehyde, the remains of detergents, fuel, pesticides, etc. stored in PET bottles, the primary contaminant to the PET recycling process is any source of PVC (Awaja and Pavel, 2005; Hurd, 1997). PET and PVC have different melting points and thermal stabilities and must not be remelted together. PET melts at ca. 260 °C, while PVC will degrade at ca. 200 °C releasing hydrochloric acid that destroys the

powoduje niszczenie pożądanych właściwości PET (żółknienie i kruchość). W temperaturze topnienia PET, PVC pali się i ulega zwęgleniu. Spalony PVC tworzy czarne plamki na przezroczystym PET, czyniąc go bezużytecznym dla wielu zastosowań. Co więcej, może to powodować poważne uszkodzenia aparatury procesowej. Nawet bardzo niskie stężenie PVC (do 100 ppm) w stopie, może powodować podczas przetwarzania PET, degradację, przebarwienia oraz znacznie obniżać jakość całej partii (Beck et al., 1992; Kobler, 1993; Paci and La Mantia, 1999). Dlatego usuwanie zanieczyszczeń jest ważnym aspektem w szczególności przy rozdzielaniu różnych polimerów, celem uzyskania cennych. W związku z tym podjęte zostały próby do opracowania praktycznych metod oddzielania zmieszanych tworzyw sztucznych.

Wprawdzie technologie separacji bazują na różnicy w fizycznych lub chemicznych właściwościach tworzyw sztucznych, (w tym automatyczne sortowanie, separacja grawitacyjna, flotacja pianowa i rozdzielanie elektrostatyczne) i mogą być stosowane do ich skutecznego oddzielania, jednak posiadają one na ogół ograniczenia (Shen et al., 1999). Zautomatyzowane systemy sortowania bazują na promieniach Rentgena (fluorescencji rentgenowskiej (XRF) używanej do sortowania butelek zrobionych z PVC), analizie bliskiej podczerwieni (NIR) spektroskopii (sortowanie na podstawie typu żywicy) lub metodach optycznych (sortowanie na podstawie koloru) są drogie, a ich skuteczność jest ograniczona przez odchylenie charakterystyki procesu, pod wpływem wielkości, kształtu zanieczyszczenia powierzchniowego tworzywa sztucznego (Carvalho et al., 2009; CWC, 2010). Metody oddzielania grawitacyjnego są skuteczne do oddzielania materiałów o różnych gęstościach (np. PVC, PP). Polimery o podobnym ciężarze właściwym (np. PVC i PET) nie mogą być oddzielone za pomocą tych metod (Beck et al., 1992; Drelich et al., 1998). Flotacja pianowa wykorzystuje różnice we właściwościach powierzchniowych cząstek materiałów i może być używana do rozdzielania mieszanin tworzyw sztucznych (Burat et al., 2009; Drelich et al., 1998; Izumi and Tanaka, 1975; Kobler, 1993; Marques and Tenório, 2000; Shen et al., 1999; Sisson, 1993). Flotacja pianowa, jak również metody mokrego oddzielania grawitacyjnego, napotykają problemy związane z: oczyszczaniem ścieków, ceną odczynników służących do chemicznego zwilżania i wstępnej obróbki tworzyw sztucznych, czy odwadnianiem (suszeniem) (Dodbiba and Fujita, 2004). Oddzielanie elektrostatyczne wykorzystuje różnice w przewodności elektrycznej, tarcia ładunków i właściwościach dielektrycznych pomiędzy składnikami mieszaniny (Kelly and Spottiswood, 1989a; Manouchehri et al., 2000a). Chociaż metoda ta posiada ograniczenia, należy ją stosować, zwłaszcza w suchym środowisku. Metody

desirable properties of PET, causing it to turn yellow and brittle. At PET melting temperature the PVC will burn and char. Burnt PVC creates black flecks in the otherwise clear PET material, making it unusable for many end-use applications. Furthermore, it can seriously damage the processing equipment. Even a very low concentration of PVC (as low as 100 ppm) in a melt of PET during reprocessing can induce degradation and discoloration, and substantially decrease the quality of the whole batch (Beck et al., 1992; Kobler, 1993; Paci and La Mantia, 1999). Therefore, the removal of contaminants i.e. the separation of different polymers by type in order to get a valuable plastic product is a vital step in the mechanical recycling process of plastics. Accordingly, attempts have been made to develop practical methods for separating mixed plastics.

Although several separation technologies based on the difference in physical or chemical properties of the plastics being separated, including automatic sorting, gravity separation, froth flotation and electrostatic separation, can be applied to efficiently separate mixed plastics waste, they generally have their limitations (Shen et al., 1999). Automated sorting systems based on X-ray detection (X-ray transmission (XRT) and X-ray fluorescence (XRF) used to sort out PVC bottles), near infrared (NIR) spectroscopy (sorting by resin type) or optical sorting (sorting by colour) are expensive and their efficiency is limited by the deviation of the process feed characteristics, such as size, shape and surface contamination of plastics object, from predetermined ones (Carvalho et al., 2009; CWC, 2010). Gravity separation methods are effective for separating materials of different specific gravity (e.g. PVC and PP), but polymers of similar specific gravity (e.g. PVC and PET) cannot be separated using these methods (Beck et al., 1992; Drelich et al., 1998). Froth flotation utilises the differences in surface properties of particles of various materials and can be effectively used for separating different mixtures of plastics (Burat et al., 2009; Drelich et al., 1998; Izumi and Tanaka, 1975; Kobler, 1993; Marques and Tenório, 2000; Shen et al., 1999; Sisson, 1993). However, froth flotation as well as wet gravity separation encounters problems such as: treatment of wastewater, the requirement for expensive wetting reagents and chemical pretreatment of plastics, and dewatering (drying) the mixture after separation (Dodbiba and Fujita, 2004). Electrostatic separation utilises the differences in electric conductivity, friction charge and dielectric properties between the components in a particulate mixture (Kelly and Spottiswood, 1989a; Manouchehri et al., 2000a). Although this separation method has its limitations, it should be taken into consideration, espe-

suchej separacji elektrostatycznej mają wyraźną przewagę nad metodami mokrymi dzięki: nie występowaniu ścieków, braku konieczności suszenia materiału po procesie separacji, mniejszemu zużyciu energii, mniejszemu występowaniu korozji i niskim kosztom eksploatacji i amortyzacji (Lungu, 2004; Manouchehri i in., 2000b). Bardziej szczegółowy opis zasady działania separatora wysokiego napięcia stosowanego w tym badaniu podany jest w dalszej części tekstu (patrz punkt 2.2.).

Głównym celem badań przedstawionych w niniejszej pracy była ocena skuteczności oddzielania elektrostatycznego, separatorem wysokiego napięcia podczas oddzielania mieszaniny PET/PVC. Badania koncentrują się na oszacowaniu wpływu zmiennych procesowych – potencjału elektrody i prędkości wirnika na efektywność separacji. Zagęszczenie i odzysk, zdefiniowane są jako wskaźniki efektywności rozdzielania i stopień.

## 2. Część doświadczalna

### 2.1. Materiały i procedury

Próbki użyte w badaniu to politereftalan etylenu (butelki PET) i polichlorek winylu (PVC rury) zebrane z domowych odpadów. Próbki rozdrobnione w młynie tnącym SM 2000, firmy Retsch GmbH (Niemcy), a następnie pobrane próbki tworzyw sztucznych, poddano analizie sitowej na sitach o rozmiarze oczek 4,0 mm, 3,15 mm, 2,0 mm i 1,0 mm. Badania przeprowadzono dla mieszaniny tworzyw sztucznych PET i PVC o stosunku 50/50% dla wszystkich trzech wielkości cząstek (4.0/3.15 mm, 3.15/2.0 mm i 2.0/1.0 mm). Na podstawie wstępnych wyników badań (Salopek i in., 2009), podjęto decyzję, aby przeprowadzić próby oddzielania dla potencjału elektrody w przedziale od 14,5 kV do 17,5 kV i dla prędkości wirnika od 35 m/min do 52 m/min. Po rozdzielaniu w separatorze elektrostatycznym, różnica w kolorze między PET (zielony) i PVC (szary) umożliwiła ręczne sortowanie oraz przeprowadzenie analizy wizualnej rozdzielonych produktów (koncentratu i pozostałości). Kapsle nie były uwzględnione w badaniu, ponieważ są wykonane z polietylenu (PE).

### 2.2. Metoda oddzielania oraz oprzyrządowanie

Próbki PVC/PET zostały rozdzielone na podstawie różnicy w przewodnictwie powierzchniowym, przy użyciu separatora elektrostatycznego wysokiego napięcia. Materiał oddawany jest wyładowaniu koronowemu wychodzącemu z drutu elektrodowego (elektrody wysokiego napięcia). Promiennik zamontowany jest powyżej podajnika, celem usunięcia wilgoci z materiału. Wysokie napięcia przyłożone do elektrody, powoduje jonizację powietrza w pobliżu drutu elektrodowego. Cząsteczki ulegają „naładowaniu” (dodatniemu, jeżeli przewód jest ujemny,

co w arid areas. Being a dry method, electrostatic separation has a clear advantage over wet methods because of avoiding wastewater generation and dewatering the material after separation, less energy consumption, less equipment corrosion and low operation and amortization costs (Lungu, 2004; Manouchehri et al., 2000b). More detailed description of the operating principle of high-tension separator used in this study is given in further text (see section 2.2.).

The main purpose of the study presented in this paper was to evaluate the separation performance of the high-tension electrostatic separator when separating a PET/PVC mixture. The study was focused on estimating the influence of process variables – electrode potential and rotor speed on the separation efficiency, with the concentrate grade and recovery defined as the indicators of separation efficiency.

## 2. Experimental

### 2.1. Materials and Procedure

The samples used in this study were polyethylene terephthalate (PET bottles) and polyvinyl chloride (PVC pipes) collected from household waste. The samples were shredded in a cutting mill SM 2000, provided by Retsch GmbH (Germany) and then a representative fraction of the plastics was sieved on testing sieves with mesh sizes 4.0 mm, 3.15 mm, 2.0 mm and 1.0 mm. The experiments were carried out using 50/50% artificial mixture of PET and PVC plastics in all three particle size classes (4.0/3.15 mm, 3.15/2.0 mm and 2.0/1.0 mm). On the basis of preliminary test results (Salopek et al., 2009), it was decided to perform separation tests at the electrode potential ranging from 14.5 kV to 17.5 kV and rotor speed from 35 m/min to 52 m/min. After separation in electrostatic separator, the difference in color between PET (green) and PVC (gray) allowed easy hand-sorting and visual analysis of the separated products (concentrate and gangue). Bottle caps were not included in testing because they are made of polyethylene (PE).

### 2.2. Separation Method and Equipment

The PVC/PET samples were separated on the basis of differences in surface conductivity, using a high-tension electrostatic separator. The material to be separated is fed on to the earthed rotating roll and subjected to corona discharge from a fine wire electrode (high-tension electrode). A radiant heater is mounted above feed tray to remove moisture from material. When high voltage is applied to the electrode, the air in the vicinity of the wire electrode is ionised and charged air molecules (positive if the wire is negative, negative if the wire is positive)

ujemnemu, jeżeli przewód jest dodatni), a następnie wędrują do wirnika, gdzie zderzają się z cząsteczkami niezjonizowanymi. Cząstki o dobrej przewodności (przewodniki) tracą nabyty ładunek w ciągu milisekund i są „wyrzucane” z wirówki przez siłę odśrodkową. Cząstki o złej przewodności (izolatory) zatrzymują uzyskany ładunek. Zatrzymany ładunek indukuje równe i przeciwne co do znaku „widmo” ładunku wewnątrz wirnika, zaś nieprzewodzące cząsteczki ulegają zatrzymaniu w wirniku, aż do usunięcia ich przez pędzel rozładowywujący (rys. 2a). Zmiany napięcia, prędkości wirnika, pozycji splittera (filtru), pozycji elektrody i polaryzatora mają wpływ na stopień separacji i tylko poprzez badanie można uzyskać optymalne ustawienia dla różnych materiałów (Kelly and Spottiswood, 1989b; Manouchehri i in., 2000b; Eriez Magnetics Europe Ltd., 2007). Rysunek 2b przedstawia użyty w badaniach laboratoryjny elektrostatyczny separator wysokiego napięcia (typ HT 150 firmy Eriez).

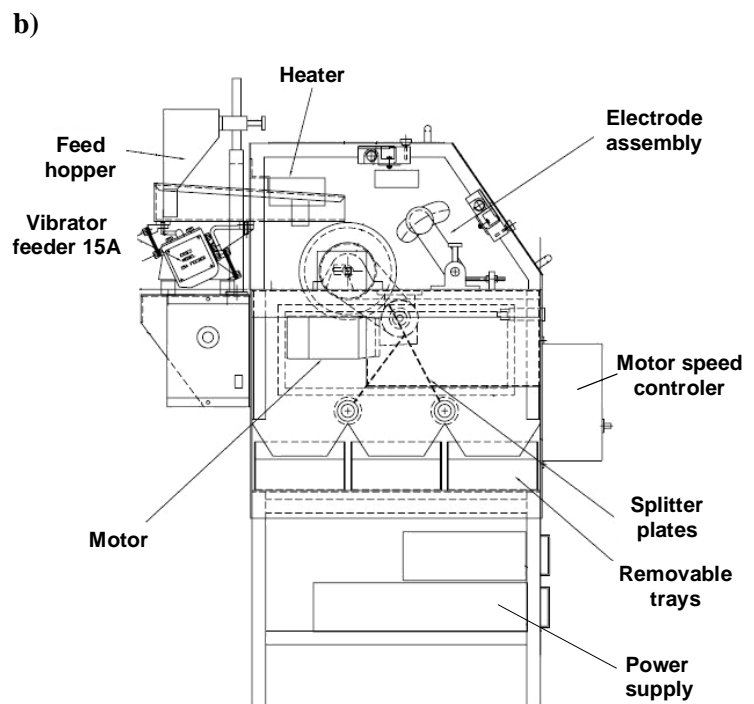
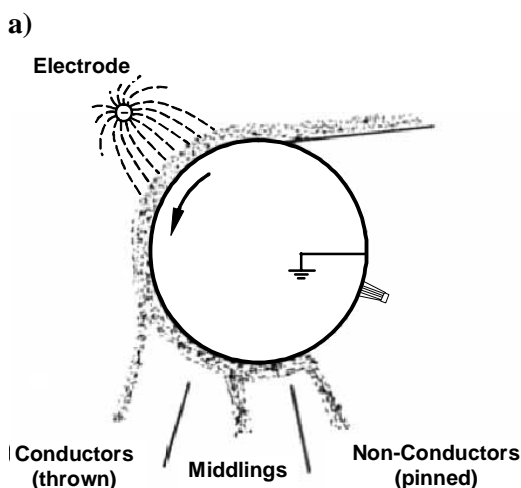
### 2.3. Ocena efektywności procesu separacji

Celem procesu separacji jest zebranie cennego składnika w koncentracie i oddzielenia go od pozostałości. Poza cennym składnikiem (PET), koncentrat zawiera nierównocenny (PVC), jak również pozostałość. Ponadto w nieprzydatnym produkcie mogą zawierać się cenne składniki. Czasami pro-

travel to the rotor, where they strike the particles. Particles with good surface conducting properties (“conductors”) lose the charge gained from the air molecules in milliseconds and are “thrown” from the rotor by centrifugal force. Particles with poor surface conducting properties (“non-conductors”) retain the charge gained from the air molecules. This retained charge induces an equal and opposite “image” charge inside the rotor and thus non-conducting particles are held or “pinned” to the rotor by these image charges until dislodged by the discharge brush (Fig. 2a). Variation of voltage, rotor speed, splitter position, electrode position and polarity all influence the degree of separation, and only through testing can the optimum settings for different material be established (Kelly and Spottiswood, 1989b; Manouchehri et al., 2000b; Eriez Magnetics Europe Ltd., 2007). Fig. 2b shows the outline of laboratory high-tension electrostatic separator (type HT 150 provided by Eriez) used in tests.

### 2.3. Evaluation of Separation Efficiency

The aim of separation process is to collect valuable component in the concentrate and non-valuable in the gangue. Besides containing valuable component (PET), the concentrate usually also contains non-valuable component (PVC), as well as the gangue, besides non-valuable component, also



Rys. 2  
Laboratoryjny separator wysokiego napięcia Eriez HT 150: (a) zasada działania, (b) zarys (Eriez Magnetics Europe Ltd., 2007)

Fig. 2  
Laboratory high-tension electrostatic separator Eriez HT 150: (a) operating principle, (b) outline (Eriez Magnetics Europe Ltd., 2007)

dukty pośrednie oddzielane są w procesie jako trzeci składnik, który ponownie zawracany jest do procesu. W przeprowadzonych badaniach, próbki oddzielone zostały na dwa produkty – koncentrat i pozostałość (brak produktu pośredniego, płyty rozdzielacza są blisko siebie). Cząstki PVC uważa się za składnik nieprzydatny, ponieważ nawet jego niewielka zawartości w mieszaninie powoduje pogorszenie właściwości PET. Oddzielone produkty ważono na końcu każdego badania. Wskaźniki efektywności separacji był stopień zagęszczenia i odzysku.

Odzysk odnosi się do odsetka cennego składnikiem (PET) zawartego w materiale, który zostały zebrany z koncentratu (Wills, 1992):

$$R = \frac{C \cdot c}{F \cdot f} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1)$$

gdzie:

- $R$  – odzysk (%)
- $C$  – masa koncentratu (g)
- $c$  – zawartość PET w koncentracie (%)
- $F$  – masa surowego materiału (g)
- $f$  – zawartość PET w surowym materiale (%)

Stopień zagęszczenia jest to procentowa zawartość (PET) w koncentracie.

$$G = \frac{C_{PET}}{C} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2)$$

gdzie:

- $G$  – stopień zagęszczenia (%)
- $C_{PET}$  – zawartość PET w koncentracie (g)
- $C$  – masa koncentratu (g)

### 3. Rezultaty i dyskusja wyników

Wyniki elektrostatycznej separacji przedstawiono na rysunkach 3–9. W pierwszej serii badań (rys. 3–5), poddane badaniom zostały trzy wielkości cząstek (4/3.15 mm; 3.15/2 mm, 2/1 mm) zaś potencjał elektrody wahał się od 14,5 do 17,5 kV. Inne zmienne parametry zostały utrzymane na stałym poziomie: 5 cm odległości elektrody jonizujące od wirnika, 35 m / min prędkość wirnika.

Rys. 3 pokazuje, że odzysk PET wzrasta wraz ze wzrostem potencjału elektrody. Niższe wartości odzysku PET (60% i 58,33%) uzyskano dla niskich wartości potencjału elektrody (14,5 kV do 15 kV), a najwyższy odzysku (74,33%) dla największego potencjału elektrody (17,5 kV). Należy pamiętać, że wyższy potencjał elektrody od 17,5 kV powoduje wyrzucenie cząstek PET i PVC z wirnika. Biorąc pod uwagę stopień koncentracji, zawartość PET wzrasta wraz ze wzrostem potencjału elektrody aż do 100% (nie ma cząstek PVC w koncentracie). Naj-

contains valuable component. Sometimes, the middlings are separated in the process as a third component which is re-treated. In conducted tests, samples were separated into two products – concentrate and gangue (no middling product; splitter plates closed together), considering PVC particles as non-valuable component since even small PVC content in the mixture causes degradation of PET properties. The separated products were weighed at the end of each test. Indicators of separation efficiency were the concentrate grade and recovery.

Recovery refers to the percentage of valuable component (PET) contained in the feed material that was collected in the concentrate (Wills, 1992):

$$R = \frac{C \cdot c}{F \cdot f} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1)$$

where:

- $R$  – recovery (%)
- $C$  – mass of the concentrate (g)
- $c$  – mass content of PET in the concentrate (%)
- $F$  – mass of the feed (g)
- $f$  – mass content of PET in the feed material (%)

The concentrate grade is the percentage of valuable component (PET) in the concentrate:

$$G = \frac{C_{PET}}{C} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2)$$

where:

- $G$  – concentrate grade (%)
- $C_{PET}$  – mass of PET in the concentrate (g)
- $C$  – mass of the concentrate (g)

### 3. Results and Discussion

The results of electrostatic separation tests are shown in Figs. 3–9. In the first series of tests (Figs. 3–5), three particle size classes were tested (4/3.15 mm; 3.15/2 mm; 2/1 mm) and the electrode potential ranged from 14.5 to 17.5 kV. Other operating variables were kept constant at the following values: 5 cm distance of the ionizing electrode from the rotor and 35 m/min rotor speed.

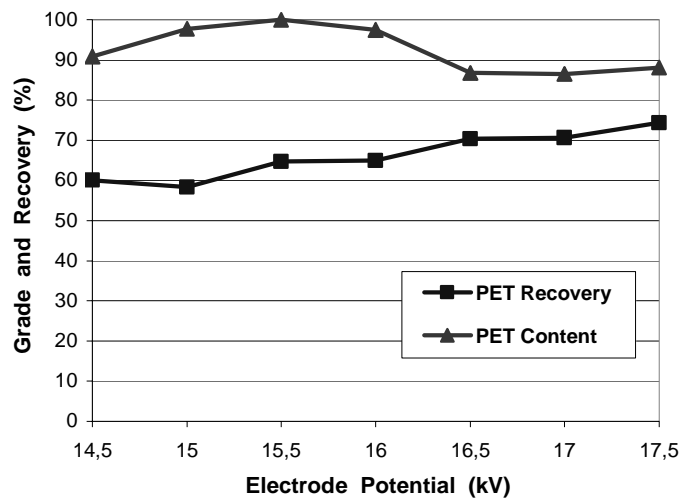
Fig. 3 shows that the PET recovery generally increases as the electrode potential increases. The lower values of PET recovery (60% and 58.33%) were obtained at the lower values of the electrode potential (14.5 kV to 15 kV), and the highest recovery (74.33%) at the highest electrode potential (17.5 kV). It is important to note that the electrode potential higher than 17.5 kV results in the rejection of both PET and PVC particles from the rotor. Regarding concentrate grade, PET content increases with the electrode potential up to 100% (there is no PVC particles in the concentrate).

wyższy stopień koncentracji (100%) zostaje osiągnięty przy potencjale 15,5 kV. Dalszy wzrost potencjału elektrody powoduje zmniejszenie stopnia koncentracji zaś pomiędzy 16,5 kV a 17,5 kV jest mniej więcej niezmienny, osiągając około 87%.

Rysunek 4 przedstawia wyniki badań procesu separacji dla wielkości cząstek 3.15/2 mm. Zauważa się, że wzrost odzyskanego PET gwałtownie wzrasta wraz ze wzrostem potencjału elektrody do 15 kV. Wraz ze wzrostem potencjału elektrody od 15 kV do 16,5 kV, odzysk nieznacznie zwiększa się (do około 73%). Dalszy wzrost potencjału do 17,5 kV, zmienia odzysk nieznacznie. Stopień zagęszczenia waha się od 86% do

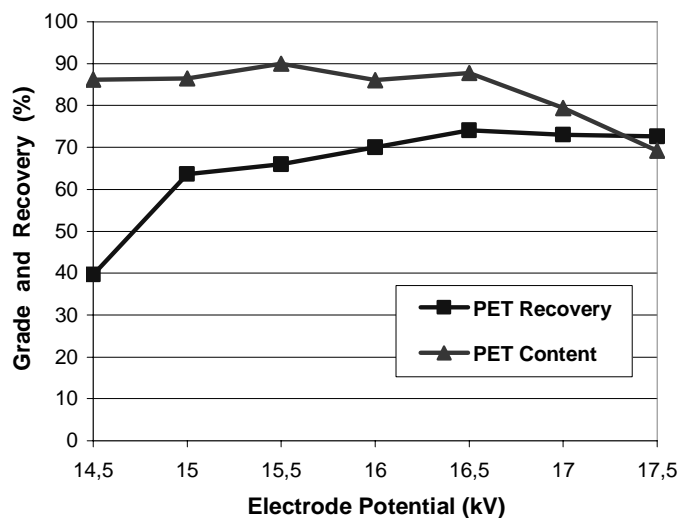
The highest concentrate grade (100%) is achieved at the potential of 15.5 kV. Further increase of electrode potential results in decrease of concentrate grade and between 16.5 kV and 17.5 kV it is more or less unchangeable, amounting to about 87%.

Fig. 4 shows the results of separation tests with particle size class 3.15/2 mm. It can be seen that PET recovery increases steeply with increasing electrode potential up to 15 kV. With increasing electrode potential from 15 kV to 16.5 kV, recovery increases slightly (up to about 73%) and by further increase up to 17.5 kV, it changes insignificantly. Concentrate grade varies from 86% to 90% with changes in elec-



Rys. 3  
Wpływ potencjału elektrody na separację mieszaniny PET/PVC, dla wielkości cząstek 4/3.15 mm

Fig. 3  
Effect of electrode potential on the separation of PET/PVC mixture; particle size class 4/3.15 mm



Rys. 4  
Wpływ potencjału elektrody na separację mieszaniny PET/PVC, dla wielkości cząstek 3.15/2 mm

Fig. 4  
Effect of electrode potential on the separation of PET/PVC mixture; particle size class 3.15/2 mm



90% wraz ze zmianą potencjału elektrody od 14,5 kV do 16,5 kV. Dalszy wzrost potencjału elektrody do wartości maksymalnej 17,5 kV zmniejsza stopień zagęszczenia osiągając najniższą wartość 69,21%.

Rys. 5 przedstawia wyniki uzyskane dla wielkości cząstek 2/1 mm. Obserwuje się, że wraz ze wzrostem potencjału elektrody, odzysk PET wzrasta gwałtownie, aż do osiągnięcia 69% przy potencjale elektrody 15,5 kV. Następnie obserwuje się wahanie stopnia odzysku od 69% do 73% i ponowny jego wzrost. Wzrost ten zachodzi w mniejszym stopniu dla potencjału elektrody wyższego niż 16,5 kV. Zawartość PET, zmniejsza się wraz ze wzrostem potencjału elektrody. Od 84,21% (14,5 kV) do 62,08% (17,0 kV).

Rysunki 6–8 pokazują wyniki drugiej serii badań. Podobnie jak w pierwszej serii, testy przeprowadzono dla tych samych wielkości cząstek. Prędkość wirnika była zróżnicowana i wynosiła od 35 do 52 m/min. W pierwszej serii najwyższą zawartość PET w koncentracie (100%) uzyskano przy potencjale elektrody 15,5 kV. Dlatego zdecydowano się przeprowadzić kolejny test dla cząsteczek gruboziarnistych (klasa 4/3.15 mm), dla tego samego potencjału i dla tej samej odległości elektrody jonizującej od wirnika (5 cm). Na podstawie wyników przedstawionych na rysunku 6, zauważa się, że stopień odzysku zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości wirnika. Zawartość PET w koncentracie wynosiła 100%, za wyjątkiem pierwszego testu (96,74%) gdzie prędkość wirnika wynosiła 35 m/min.

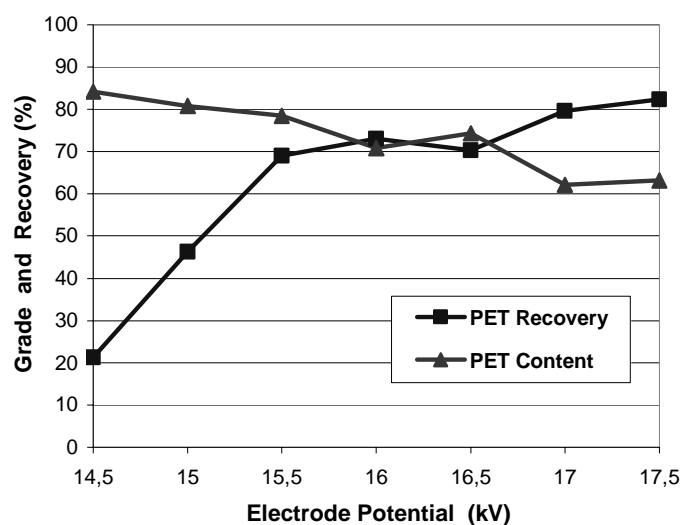
Ponieważ w pierwszej serii badań dla wielkości cząstek 3.15/2 mm i 2/1 mm, 100% stopień zagęszczenia nie został osiągnięty, drugą serię testów przeprowadzono dla maksymalnej wartości potencjału elektrody 17,5 kV.

trode potential from 14.5 kV to 16.5 kV. Further increase of electrode potential up to the maximum value of 17.5 kV reduces concentrate grade to the lowest value of 69.21%.

Fig. 5 shows the results obtained by testing particle size class 2/1 mm. With increasing electrode potential, PET recovery increases steeply up to 69% at the electrode potential of 15.5 kV, then fluctuates from 69% to 73%, and again increases but to a lesser extent at electrode potential higher than 16.5 kV. Regarding PET content, it can be generally said that it decreases with increasing electrode potential, from a maximum of 84.21% (14.5 kV) to a minimum of 62.08% (17.0 kV).

Figs. 6–8 show the results of the second series of tests. As in the first series, the same three particle size classes were tested. The rotor speed was variable and ranged from 35 to 52 m/min. In the first series, the highest PET content in the concentrate (100%) was obtained at the electrode potential of 15.5 kV, therefore it was decided to perform the next test with coarse particle size (class 4/3.15 mm) at this potential and the same distance of ionizing electrode from the rotor (5 cm). From the results shown in Fig. 6, it can be seen that recovery decreases with increasing rotor speed. PET content in the concentrate was 100%, except in the first test (96.74%) at the rotor speed of 35 m/min.

Since in the first series of tests with particle size classes 3.15/2 mm and 2/1 mm a concentrate grade of 100% was not achieved, the second series of tests with those classes was performed at a maximum



Rys. 5  
Wpływ potencjału elektrody na separację mieszaniny PET/PVC, dla wielkości cząstek 2/1 mm

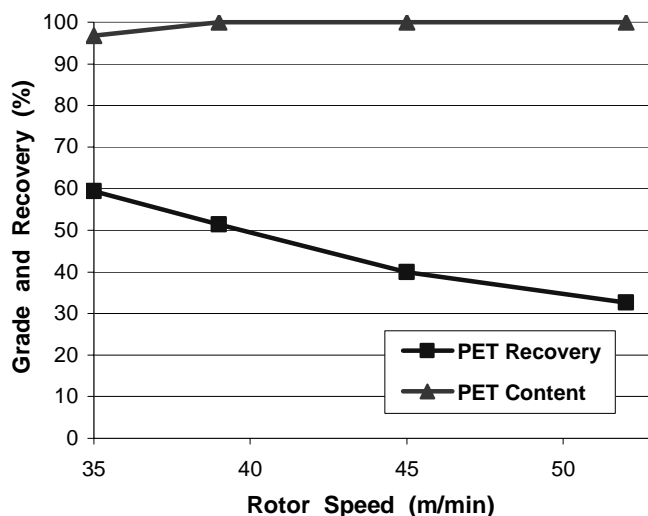
Fig. 5  
Effect of electrode potential on the separation of PET/PVC mixture; particle size class 2/1 mm

Umożliwiło to uzyskanie najwyższego odzysku PET, dla tej samej odległości elektrody od wirnika (5 cm). Wyniki badań uzyskane dla każdej wielkości cząstek przedstawiono na rys. 7 i rys. 8. W obu przypadkach odzysk zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości wirnika zaś zawartość PET w koncentracie jest najwyższa przy uzyskaniu maksymalnej prędkości obrotowej wirnika (93,86% uzyskanych dla cząstek o rozmiarze 3.15/2 mm i 89,15% dla wielkości 2/1 mm).

Po wyżej opisanej serii testów zdecydowano się przeprowadzić test wielostopniowej separacji w celu ustalenia wymaganej liczby etapów umożliwiających osiągnięcie wysokiego stopnia odzysku, a jeżeli jest to

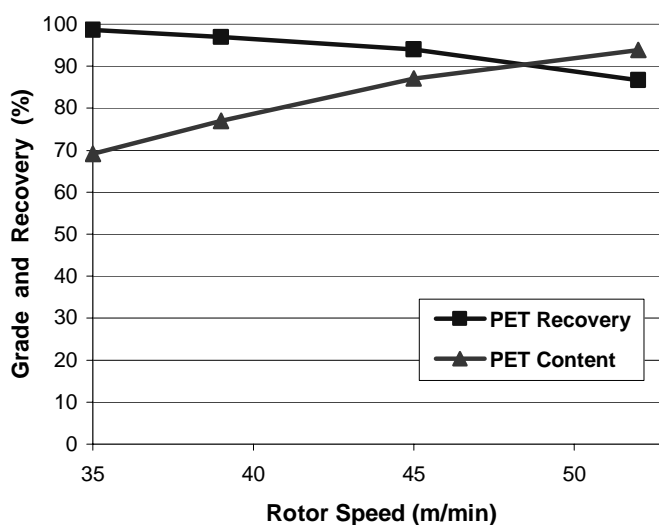
electrode potential of 17.5 kV enabling the highest PET recovery, and at the same distance of electrode from the rotor (5 cm). Test results obtained with each particle size class are shown in Fig. 7 and Fig. 8. In both cases, recovery decreases with increasing rotor speed and PET content in the concentrate is the highest at maximum rotor speed (93.86% obtained by testing size class 3.15/2 mm and 89.15% by testing size class 2/1 mm).

After the above-described series of tests it was decided to conduct a multi-stage separation test with the aim to determine the number of stages required to achieve high recovery and, if it is possible, to



Rys. 6  
Wpływ prędkości wirnika w na separacje mieszaniny PET/PVC, dla wielkości cząstek 4/3.15 mm

Fig. 6  
Effect of rotor speed on the separation of PET/PVC mixture; particle size class 4/3.15 mm

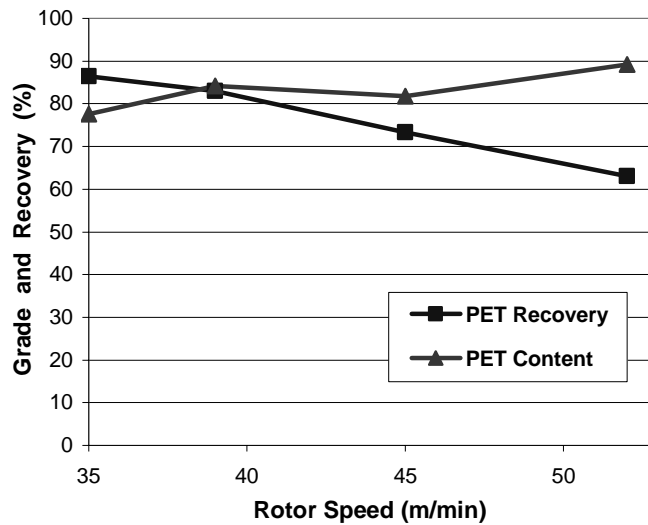


Rys. 7  
Wpływ prędkości wirnika w na separacje mieszaniny PET/PVC, dla wielkości cząstek 3.15/2 mm

Fig. 7  
Effect of rotor speed on the separation of PET/PVC mixture; particle size class 3.15/2 mm

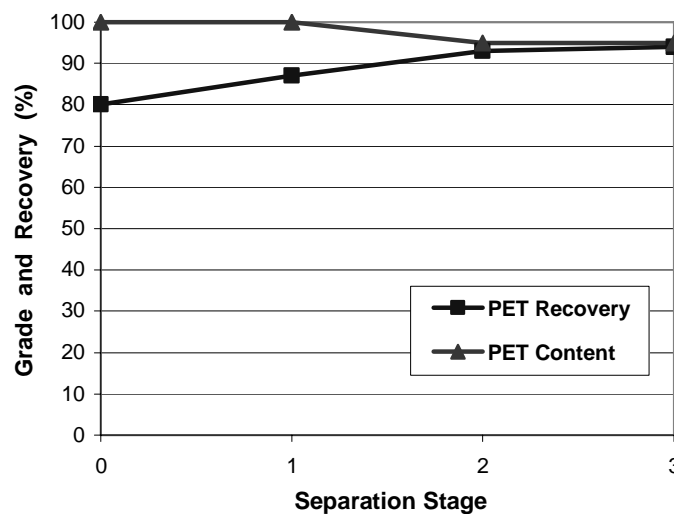
możliwe, zachowanie 100% zawartości PET w koncentracie. Wyniki tego badania przedstawiono na rysunku 9. Zauważa się, że uzyskano 80% odzysk PET po etapie „surowej” separacji surowca. Po pierwszym etapie separacji odzysk wzrósł z 80% do 87%, przy zachowaniu 100% stopnia zagęszczenia. Po drugim etapie separacji, odzysk zwiększył się do 93%, przy jednoczesnym spadku stopnia zagęszczenia ze 100% do 94,9%. Po trzecim etapie oddzielania, odzysk nieznacznie wzrósł z 93% do 94%, podobnie jak stopień zagęszczenia z 94,90% do 94,95%.

retain 100% PET content in the concentrate. The results of this test are shown in Fig. 9. As shown, PET recovery was 80% after rough separation stage, and increased from 80% to 87% after first separation stage, while concentrate grade had remained unchanged at the value of 100%. After second separation stage, recovery increased to 93% but at the same time concentrate grade decreased from 100% to 94.9%. Finally, after third separation stage, recovery increased slightly from 93% to 94% as well as concentrate grade from 94.90% to 94.95%.



Rys. 8  
Wpływ prędkości wirnika w na separacje mieszaniny PET/PVC, dla wielkości cząstek 2/1 mm

Fig. 8  
Effect of rotor speed on the separation of PET/PVC mixture; particle size class 2/1 mm



Rys. 9  
Wpływ etapowego procesu separacji na rozdzielanie mieszaniny PET/PVC, dla wielkości cząstek 4/3.15 mm

Fig. 9  
Effect of processing stage on the separation of PET/PVC mixture; particle size class 4/3.15 mm

## Wnioski

Celem przeprowadzonych badań była ocena efektywności elektrostatycznego oddzielania mieszaniny PET/PVC w separatorze wysokiego napięcia. Wpływ potencjału elektrody i szybkości wirnika na efektywność separacji badano dla trzech różnych wielkości cząstek (4/3.15mm, 3,15/2 i 2/1 mm). Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że separacja jest uzależniona od potencjału elektrody i szybkości wirnika. Generalnie, wraz ze wzrostem potencjału elektrody, stopień odzysku ulega zwiększeniu. Wzrost prędkości wirnika spowoduje zmniejszenie stopnia odzysku i zwiększenie stopnia zagęszczenia. Jeśli chodzi o wielkości cząstek, można uznać, że proces separacji zmniejsza się wraz ze spadkiem wielkości cząstek. Zawartość PET w koncentracie jak i odzysk może być zwiększony poprzez rozdzielanie wieloetapowe. Najlepszy wynik otrzymano dla wielkości cząstek 4/3.15 mm (cząstki gruboziarniste) dla potencjału elektrodowego 15,5 kV i prędkości wirnika 35 m/min po dwóch etapach separacji. Zawartość PET wynosiła nadal 100% przy 87% odzysku. Dalsze badania powinny obejmować określenie efektów interakcji pomiędzy wszystkimi zmiennymi.

## Podziękowania

Praca została wsparta finansowo przez Ministerstwo Nauki, Edukacji i Sportu Republiki Chorwacji.

## Conclusions

The objective of the conducted tests was to evaluate the separation efficiency of the high-tension electrostatic separator when separating a PET/PVC mixture. The effects of electrode potential and rotor speed on the separation efficiency have been studied on three different particle size (4/3.15mm, 3.15/2 and 2/1 mm). The results of conducted tests showed that separation is dependent on electrode potential and rotor speed. Generally, with increasing electrode potential, recovery will also increase. Rotor speed increase will cause a recovery decrease and concentrate grade increase. Regarding particle size, it could be concluded that the separability decreases with decreasing particle size. PET content in the concentrate and recovery could be improved by multi-stage separation. The best result was obtained by separating coarse particle size class 4/3.15 mm at the electrode potential of 15.5 kV and rotor speed of 35 m/min after two separation stage, because PET content was still 100% and recovery 87%. Further testing should include determination of interaction effects between all variables by using experimental design.

## Acknowledgement

This work was financially supported by Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia.

## Literatura – References

1. ACRR (Association of Cities and Regions for Recycling), 2004. *Good practices guide on waste plastics recycling: A guide by and for local and regional authorities*, Ed. J.P. Hannequart, Brussels.
2. Aguado, J., Serrano, D.P., San Miguel, G., 2007. *European trends in the feedstock recycling of plastic wastes*. *Global NEST J.* 9 (1), 12-19.
3. Al-Salem, S.M., Lettieri, P., Baeyens, J., 2009. *Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review*. *Waste Manage.* 29, 2625-2643.
4. Awaja, F., Pavel, D., 2005. *Review: Recycling of PET*. *Eur. Polym. J.* 41, 1453-1477.
5. Beck, M.H., Rollend, G.F., Nichols, R.C., Muszynski, J., 1992. *Electrostatic separation of plastic materials*, US Patent No. 5118407. Available at: <http://www.freepatentsonline.com/5118407.html>.
6. Braun, D., 2002. *Recycling of PVC*. *Prog. Polym. Sci.* 27, 2171-2195.
7. Burat, F., Güney, A., Kangal, M.O., 2009. *Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method*. *Waste Manage.* 29, 1807-1813.
8. Carvalho, M.T., Ferreira, C., Portela, A., Santos, J.T., 2009. *Application of fluidization to separate packaging waste plastics*. *Waste Manage.* 29, 1138-1143.
9. CWC (Clean Washington Center), 2010. *Best Practices in PET Recycling: Automated Sorting Systems*. Available at: [http://www.cwc.org/pet\\_bp/pbp3-0203.htm](http://www.cwc.org/pet_bp/pbp3-0203.htm).

10. Dodbiba, G., Fujita, T., 2004. Progress in separating plastic materials for recycling. *Phys. Sep. Sci. Eng.* 13, 165-182.
11. Drelich, J., Kim, J.H., Payne, T., Miller, J.D., Kobler, R.W., 1999. Purification of polyethylene terephthalate from polyvinyl chloride by froth flotation for the plastics (soft-drink bottle) recycling industry. *Sep. Purif. Technol.* 15, 9-17.
12. Drelich, J., Payne, T., Kim, J.H., Miller, J.D., Kobler, R., Christiansen, S., 1998. Selective froth flotation of PVC from PVC/PET mixtures for the plastics recycling industry. *Polym. Eng. Sci.* 38 (9), 1378-1386.
13. Eriez Magnetics Europe Ltd., 2007. *Installation, Operation & Maintenance Instructions – Laboratory Electrostatic Separator Model HT-150, Caerphilly.*
14. EuPR (European Plastics Recyclers), 2010. *How to increase the mechanical recycling of post-consumer plastics: Strategy paper of the European Plastics Recyclers association.* Available at: [http://www.plasticsrecyclers.eu/uploads/media/eupr/HowIncreaseRecycling/1265184667EUPR\\_How\\_To\\_Increase\\_Plastics\\_Recycling\\_FINAL\\_low.pdf](http://www.plasticsrecyclers.eu/uploads/media/eupr/HowIncreaseRecycling/1265184667EUPR_How_To_Increase_Plastics_Recycling_FINAL_low.pdf).
15. Gente, V., La Marca, F., Lucci, F., Massacci, P., 2003. Electrical separation of plastics coming from special waste. *Waste Manage.* 23, 951-958.
16. Hurd, D.J., 1997. *Best Practices and Industry Standards in PET Plastic Recycling, Prepared for the Washington State Department of Community, Trade and Economic Development's Clean Washington Center.* Available at: <http://www.napcor.com/pdf/Master.pdf>.
17. INTERPACK - Processes and Packaging, 2010. *Plastics: A success story.* Available at: [http://www.interpack.com/cipp/md\\_interpack/custom/pub/content,lang,2/oid,11683/ticket,g\\_u\\_e\\_s\\_t/~mcat\\_id,3775/local\\_lang,2/~Plastics.\\_A\\_success\\_story..html](http://www.interpack.com/cipp/md_interpack/custom/pub/content,lang,2/oid,11683/ticket,g_u_e_s_t/~mcat_id,3775/local_lang,2/~Plastics._A_success_story..html).
18. Izumi, S., Tanaka, H., 1975. Method for separation of mixture of plastics, US Patent No. 3925200. Available at: <http://www.freepatentsonline.com/3925200.html>.
19. Kelly, E.G., Spottiswood, D.J., 1989a. The theory of electrostatic separations: A review, part I Fundamentals. *Miner. Eng.* 2, 33-46.
20. Kelly, E.G., Spottiswood, D.J., 1989b. The theory of electrostatic separations: A review, part III The separation of particles. *Miner. Eng.* 2, 337-349.
21. Kobler, R.W., 1993. Polyvinyl chloride-polyethylene terephthalate separation process and product, US Patent No. 5234110. Available at: <http://www.freepatentsonline.com/5234110.html>.
22. Lungu, M., 2004. Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect. *Miner. Eng.* 17, 69-75.
23. Manouchehri, H.R., Hanumantha Rao, K., Forssberg, K.S.E., 2000a. Review of electrical separation methods: Part 1 Fundamental aspects. *Miner. Metall. Process.* 17, 23-36.
24. Manouchehri, H.R., Hanumantha Rao, K., Forssberg, K.S.E., 2000b. Review of electrical separation methods: Part 2 Practical considerations, *Miner. Metall. Process.* 17, 139-166.
25. Marques, G.A., Tenório, J.A. S., 2000. Use of froth flotation to separate PVC/PET mixtures. *Waste Manage.* 20, 265-269.
26. Paci, M., La Mantia, F.P., 1999. Influence of small amounts of polyvinylchloride on the recycling of polyethyleneterephthalate. *Polym. Degrad. Stab.* 63, 11-14.
27. Park, C.H., Jeon, H.S., Park, J.K., 2007. PVC removal from mixed plastics by triboelectrostatic separation. *J. Hazard. Mater.* 144, 470-476.
28. PlasticsEurope, 2010a. *Plastics applications.* Available at: <http://www.plasticseurope.org/use-of-plastics.aspx>.

29. *PlasticsEurope, 2010b. The Compelling Facts About Plastics 2009: An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2008 in Europe. Available at: <http://www.plasticseurope.org/plastics-industry/market-data.aspx>.*
30. *Salopek, B., Bedeković, G., Sobota, I., 2009. Application of electrostatic separator in plastic separation, in: Proceedings of Conference on Technologies of Waste Disposal and Soil Protection. Croatian Academy of Engineering, Zadar, Croatia, October 18-21, 2009, 75-82.*
31. *Shen, H., Pugh, R.J., Forssberg, E., 1999. A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics. Resour. Conserv. Recycl. 25, 85-109.*
32. *Sisson, E.A., 1993. Process for separating polyethylene terephthalate from polyvinyl chloride, US Patent No. 5252614. Available at: <http://www.freepatentsonline.com/5252614.html>.*
33. *Wey, M.Y., Yu, L.J., Jou, S.I., 1998. The influence of heavy metals on the formation of organics and HCl during incinerating of PVC-containing waste. J. Hazard. Mater. 60, 259-270.*
34. *Wills, B.A., 1992. Mineral Processing Technology, fifth ed., Pergamon Press, Oxford.*

### **Rola źródła finansowania**

Badań prowadzone w ramach projektu naukowego "Quartz Sand Beneficiation and Environmental Impact Assessment" były wspierane finansowo przez Ministerstwo Nauki, Edukacji i Sportu Republiki Chorwacji. Ministerstwo nie ma żadnego wpływu na:

- badania projektowe,
- gromadzenie, analizowanie i interpretacje danych,
- pisane sprawozdania,
- decyzje o przedstawienie dokumentów do publikacji.

Laboratoryjny elektrostatyczny separator stosowany w badaniach został nabyty w celu pomiaru możliwości wzbogacania piasku kwarcowego. Celem prac badawczych prezentowanych w niniejszej pracy było zbadanie możliwości zastosowania separatora do oddzielania materiałów innych niż surowce mineralne.

### **Stanowisko o jawności**

Wszyscy wymienieni autorzy (Branko Salopek, Gordan Bedeković i Ivan Sobota) oświadczają, że nie występuje konflikt interesów w zakresie udostępnienia publicznego artykułu.

### **Role of the funding source**

The research is conducted as part of the scientific project "Quartz Sand Beneficiation and Environmental Impact Assessment" financially supported by the Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia. The Ministry had no any involvement in:

- study design;
- the collection, analysis, and interpretation of data;
- the writing of the report;
- the decision to submit the paper for publication.

Laboratory electrostatic separator used in conducted research had been purchased for the purpose of exploring the possibilities of silica sand beneficiation. The aim of the research work presented in this paper was to investigate the possibility of application of the separator for separating the materials other than mineral raw material.

### **Disclosure Statement**

All named authors (Branko Salopek, Gordan Bedeković and Ivan Sobota) hereby declare that they have no actual or potential conflicts of interest to disclose.