

## ***Characteristics of separators and some limitations for electrostatic separation of polymer blends***

# **Charakterystyka separatorów i niektórych uwarunkowań separacji elektrostatycznej składników mieszanin polimerowych**

DOI: [dx.medra.org/10.12916/przemchem.2014.220](https://dx.medra.org/10.12916/przemchem.2014.220).

***An extended review, with 50 refs., of the constructions of free-fall and roll-off electrostatic separators used in plastics recycling as well as of the some current studies on electrostatic sepn. process of polymer blends. Compn. and humidity of polymer blends, kind of tribocharger material, charging time and electric field strength in the sepn. zone were taken into consideration.***

**Przedstawiono przegląd różnych konstrukcji separatorów swobodnych i walcowych, a także niektóre wyniki współczesnych badań procesu elektrostatycznej separacji mieszanin polimerowych. Wyniki prac eksperymentalnych wskazują, że proces ten uwarunkowany jest wieloma czynnikami. Do najważniejszych z nich należą skład i wilgotność mieszaniny polimerowej, materiał tryboelektryzatora, czas elektryzowania oraz natężenie pola elektrostatycznego w strefie rozdzielania separatora. Elektrostatyczna separacja mieszanin polimerowych może znaleźć zastosowanie w procesach recyklingu tworzyw polimerowych.**

Proces separacji elektrostatycznej (zwanej dalej separacją) poszczególnych składników mieszanin tworzywowych stanowi obiecującą alternatywę klasycznego rozdzielania mieszanin odpadów tworzywowych podczas recyklingu materiałowego. W warunkach przemysłowych proces ten musi być poprzedzony przygotowaniem rozdzie-

lanych mieszanin. Kolejność i rodzaj przygotowawczych operacji technologicznych zależy głównie od postaci, stanu zanieczyszczenia i składu rozdzielanej mieszaniny. Operacje te obejmują oczyszczanie wstępne, rozdrabnianie, oczyszczanie właściwe, suszenie, a niekiedy również kondycjonowanie, polegające na poddawaniu mieszaniny zabiegom mającym na celu uzyskanie przez niążądanego stanu fizycznego (wilgotność, temperatura). W wielu przypadkach, a szczególnie wówczas, gdy separacji poddaje się odpady zawierające metale (np. kable i przewody elektryczne, sprzęt elektroniczny, urządzenia z gospodarstw domowych, samochody i inne pojazdy), w pierwszym etapie separacji należy oddzielić cząstki metali.

Pomijając opisy przygotowania mieszanin tworzywowych, proces ich separacji przebiega na ogół wg schematu ogólnego przedstawionego na rys. 1. Po przygotowaniu wstępnym mieszanina (M) dostarczana jest do zasobnika (1), a następnie za pomocą dozownika (2) o działaniu periodycznym, jej porcje o odpowiednio dobranej masie są wsypywane do tryboelektryzatora (3). Masa porcji i częstotliwość dozowania zależą od warunków tryboelektryzowania cząstek mieszaniny oraz od wymaganego poziomu ich naelektryzowania, określanego najczęściej na podstawie gęstości powierzchniowej ładunku elektrycznego. Alternatywną miarą tego naelektryzowania może być potencjał elektrostatyczny mierzony za pomocą miernika. Po naelektryzowaniu mieszanina jest wprowadzana do zbiornika buforowego (4), z którego dostarczana jest za pomocą dozownika (5) o działaniu ciągłym do układu (6) rozdzielania elektrostatycznego. W polu elektrostatycznym układu (6) cząstki poszczególnych tworzyw (różniące się wartością ładunku elektrostatycznego lub znakiem tego ładunku) poruszają się po różnych trajektoriach i tym samym opadają do poszczególnych pojemników zestawu (7). Z pojemników tych odbiera się odseparowane składniki (S) mieszaniny (M).

Prof. dr hab. inż. Marian ŻENKIEWICZ – notkę biograficzną i fotografię Autora wydrukowaliśmy w nr 1/2014, str. 54.

\* Autor do korespondencji:

Katedra Inżynierii Materiałowej, Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, ul. Chodkiewicza 30, 85-064 Bydgoszcz, tel.: (52) 341-93-32, fax: (52) 341-47-73, e-mail: marzenk@ukw.edu.pl

Mgr inż. Tomasz ŻUK – notkę biograficzną i fotografię Autora wydrukowaliśmy w nr 1/2014, str. 54.

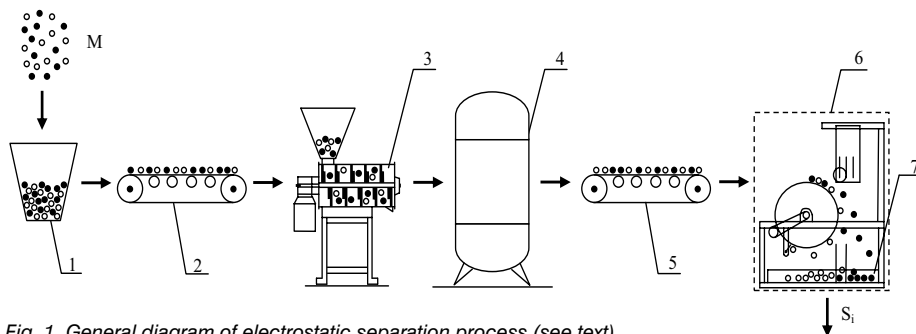


Fig. 1. General diagram of electrostatic separation process (see text)

Rys. 1. Schemat ogólny procesu separacji elektrostatycznej (opis w tekście)

Poprzednio<sup>1)</sup> zostały przedstawione podstawowe definicje i fizyczne podstawy procesu separacji elektrostatycznej tworzyw polimerowych oraz opisano działanie modelowego separatora swobodnego. Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie wybranych rozwiązań konstrukcyjnych separatorów elektrostatycznych, będących przedmiotem różnych patentów, oraz analiza wpływu niektórych warunków separacji elektrostatycznej na efekty tego procesu.

## Budowa separatorów elektrostatycznych

### Separator swobodny

Separator swobodny (*free-fall electrostatic separator*) charakteryzuje się tym, że cząstki naelektryzowanego tworzywa opadają swobodnie w polu elektrostatycznym układu rozdzielania. Istnieje wiele różnorodnych konstrukcji tego rodzaju separatorów, ogólną zasadę ich działania przedstawiono na rys. 2 i 3.

Separator przedstawiony na rys. 2 zawiera tryboelektryzator fluidyzacyjny (1), którego złożę tworzą cząstki mieszaniny tworzywowej zawieszona w strumieniu powietrza przygotowywanego w komorze (2). Układ sterowania pracą komory (2) umożliwia dokładne regulowanie wartości ciśnienia, natężenia przepływu, temperatury i wilgotności względnej tego powietrza, stanowiących istotne warunki tryboelektryzowania cząstek tworzywa, przez co zwiększają się możliwości eksploatacyjne separatora. Efekty procesu tryboelektryzowania są mierzone przez czujnik ładunku elektrycznego (3) umieszczony w tryboelektryzatorze (1) i sprzężony z komputerem (4). Ukośne ułożenie względem siebie elektrod wysokiego napięcia (5), zasilanych z układu (6), stosuje się w celu zwiększenia odległości, na jaką mogą być przemieszczane cząstki poszczególnych tworzyw pod wpływem pola elektrostatycznego. Wartość bezwzględna napięcia elektrycznego między elektrodami wynosi 144 kV (od -72 do +72 kV), a odległości między górnymi i dolnymi krawędziami tych elektrod wynoszą odpowiednio 0,32 i 0,72 m. Droga pionowa, jaką przebywają naelektryzowane cząstki w polu elektrostatycznym wynosi ok. 1 m, a natężenie tego pola zmienia się w przedziale 4,5–2,0 kV/cm. Warunki te umożliwiają poprawną separację poszczególnych tworzyw zawartych

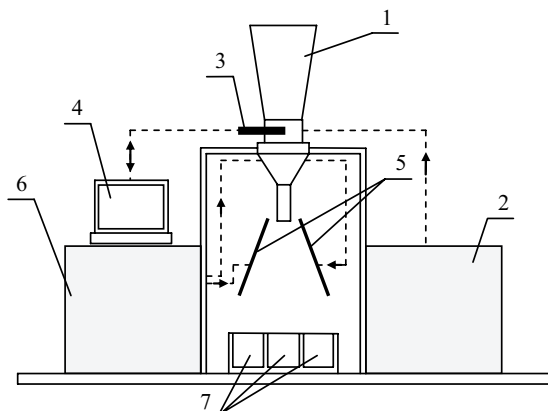


Fig. 2. Diagram of the free-fall separator (see text)<sup>2)</sup>

Rys. 2. Schemat separatora swobodnego (opis w tekście)<sup>2)</sup>

w różnych mieszaninach wieloskładnikowych i zbieranie ich w pojemnikach (7).

Na rys. 3 przedstawiono uproszczony schemat separatora swobodnego, w którym tryboelektryzacja zachodzi podczas tarcia między cząstkami tworzywa oraz między tymi cząstkami a wewnętrzną ścianką wirującego pojemnika walcowego, pełniącego funkcję tryboelektryzatora. Odpowiednia konstrukcja tryboelektryzatora (1) powoduje, że ładunki elektrostatyczne cząstek mieszaniny wędrujących wzdłuż osi głównej tryboelektryzatora stopniowo wzrastają i uzyskują wartości wymagane w procesie separacji. Jednocześnie drobne zanieczyszczenia, w tym cząstki metalu,

są usuwane pod wpływem siły odśrodkowej przez otwory w jego ściance bocznej. Taka konstrukcja i z nią związany sposób działania tryboelektryzatora umożliwia wyeliminowanie dozowników (periodycznego oraz ciągłego) przedstawionych na rys. 1 i wprowadzanie naelektryzowanych cząstek mieszaniny bezpośrednio do leja (4). Układ rozdzielania w tym separatorze ma podobne parametry do parametrów układu przedstawionego na rys. 2 (napięcie elektryczne elektrod wynosi -68 i +68 kV). W literaturze patentowej przedstawiono wiele rozwiązań konstrukcyjnych podobnych tryboelektryzatorów.

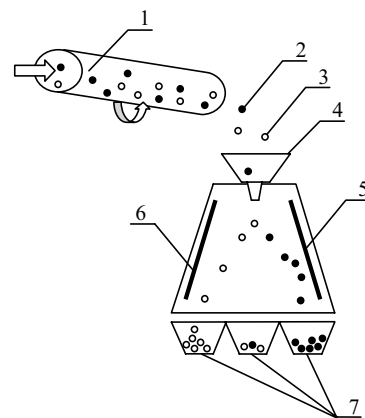


Fig. 3. Diagram of free-fall separator containing rotating tube as a tribocharging unit (1 – tribocharging unit, 2 – particles containing negative charge, 3 – particles containing positive charge, 4 – feeder of separation unit, 5 – positive electrode, 6 – negative electrode, 7 – collectors)<sup>3)</sup>

Rys. 3. Schemat separatora swobodnego z tryboelektryzатorem w postaci wirującego pojemnika walcowego (1 – tryboelektryzator, 2 – cząstki o ładunku ujemnym, 3 – cząstki o ładunku dodatnim, 4 – lej zasilania układu rozdzielającego, 5 – elektroda dodatnia, 6 – elektroda ujemna, 7 – pojemniki)<sup>3)</sup>

Schemat dwustopniowego separatora swobodnego przedstawiono na rys. 4. Jest on przeznaczony do sortowania dwuskładnikowych mieszanin tworzywowych zawierających składniki A i B, przy czym składnik A elektryzuje się dodatnio w stosunku do składnika B. Separator zawiera podzespoły (I) i (II) zbudowane w podobny sposób. Podzespół I

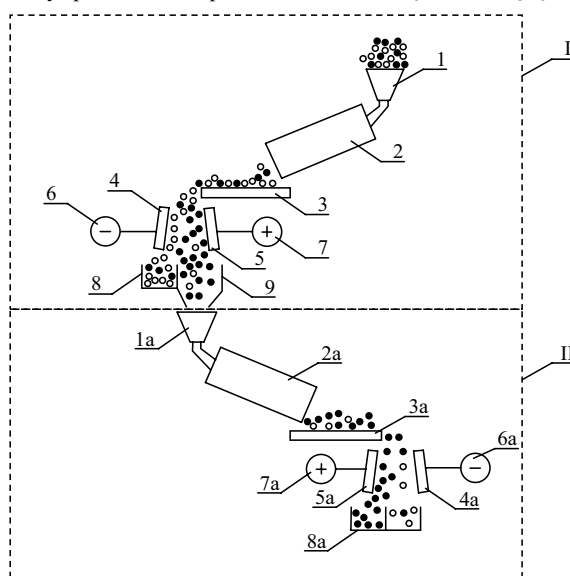


Fig. 4. Diagram of two-stage free-fall separator (○ – component A, ● – component B; see text)<sup>4)</sup>

Rys. 4. Schemat dwustopniowego separatora swobodnego (○ – składnik A, ● – składnik B; opis w tekście)<sup>4)</sup>

zawiera dozownik (1) zasilający mieszaniną tworzywową tryboelektryzator (2), transporter tworzywa (3), elektrodę ujemną (4), elektrodę dodatnią (5), źródło (6) zasilania elektrody (4), źródło (7) zasilania elektrody (5), pojemnik (8) zawierający składnik A w niewielkim stopniu zanieczyszczony składnikiem B oraz lej zsypany (9), w którym znajduje się głównie składnik B, zanieczyszczony w niewielkim stopniu składnikiem A. Cechą charakterystyczną tryboelektryzatora (2) i transportera (3) jest to, że ścianki mające kontakt z rozdzielaną mieszaniną składników A i B są wyłożone materiałem A lub materiałem znajdującym się w szeregu tryboelektrycznym obok materiału A. Umożliwia to zintensyfikowanie tryboelektryzowania, a następnie rozdzielania mieszaniny tworzywowej w podzespołe (I). Tryboelektryzator (2) ma postać wirującego cylindra, mającego na powierzchni wewnętrznej żebra intensyfikujące proces tryboelektryzowania. Poszczególne elementy podzespołu (II) zostały oznaczone cyframi i dodatkowo literą „a”, przy czym cyfry oznaczają elementy takie same jak w podzespołe (I). Proces sortowania zachodzący w podzespołe (II), stanowiącym drugi stopień separatora, przebiega podobnie jak w podzespołe (I).

### Separatorzy z wirującą elektrodą walcową

Separatorzy z wirującą elektrodą walcową stanowią w wielu przypadkach korzystną alternatywę separatorów swobodnych. Mogą być stosowane zarówno do oddzielania cząstek metali od tworzyw polimerowych, jak i do rozdzielania mieszanin tworzywowych. Jedną z elektrod tych separatorów jest wirujący wałek metalowy, najczęściej uziemiony. Druga elektroda, zwana elektrodą wysokonapięciową, może mieć postać pręta, płaskownika, wycinka walca lub kształtownika o przekroju poprzecznym w kształcie elipsy.

Schemat układu rozdzielania separatora walcowego, przeznaczonego do oddzielania cząstek metali od tworzywa przedstawiono na rys. 5. Mieszanina cząstek metalu (1) i cząstek tworzywa (2) jest dostarczana transporterem (3) na powierzchnię elektrody walcowej (uziemionej) (4), o średnicy 250 mm, wirującej z prędkością 150–250 s<sup>-1</sup>. Nad elektrodą (4) umieszczona jest elektroda jonizacyjna (5), w postaci okrągłego drutu o małej średnicy, podłączona do źródła wysokiego napięcia stałego o wartości ok. 30 kV. Elektroda (5) generuje wyładowania koronowe, które jonizują warstwę powietrza (6) znajdującą się nad elektrodą (4), a elektrony i jony powstające w wyniku jonizacji powietrza elektryzują cząstki (1) i (2). Ładunki elektryczne cząstek (1), odznaczających się dużą przewodnością elektryczną, są szybko odprowadzane poprzez uziemienie elektrody (4), natomiast ładunki elektryczne cząstek (2), charakteryzujących się małą przewodnością elektryczną, pozostają dłużej na ich powierzchni. Wskutek tego cząstki (1) są szybko odrzucane z powierzchni elektrody (4) przez siłę odśrodkową, a cząstki (2) przylegają do tej powierzchni. Dzięki zastosowaniu wysokonapięciowej elektrody odchylającej (7) powstaje pole elektrostatyczne w przestrzeni między elektrodami (4) i (7), które indukują ładunki elektrostatyczne w cząstkach (1), co powoduje odchylenie trajektorii ich lotu. Cząstki (2) są zgarniane z powierzchni elektrody (4) za pomocą szczotki (8) i trafiają do odpowiedniego pojemnika.

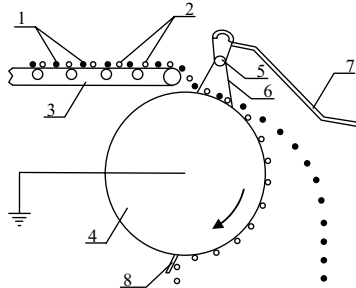


Fig. 5. Representation of the principle of the tube separator intended for the separation of metallic particles (see text)<sup>5)</sup>

Rys. 5. Zasada działania separatora walcowego, przeznaczonego do separacji cząstek metali (opis w tekście)<sup>5)</sup>

Ważnymi wielkościami w procesie rozdzielania mieszanin tworzywowych są natężenie i rozkład pola elektrostatycznego w przestrzeni międzyelektrodowej. Zbyt małe natężenie tego pola nie pozwala na zmianę kierunku lotu cząstek naelektryzowanych, a przy zbyt dużym natężeniu powstają wyładowania koronowe między elektrodami sepa-

ratora, zakłócające proces separacji. Zgodnie z definicją, natężenie pola elektrostatycznego jest wprost proporcjonalne do napięcia ( $U$ ) między elektrodami i odwrotnie proporcjonalne do odległości ( $d$ ) między nimi. Przedmiotem europejskiego patentu<sup>6)</sup> jest separator elektrostatyczny przeznaczony do rozdzielania tworzyw polimerowych, w którym jednym zastrzeżeniem jest relacja  $U/d \leq 10$ .

W separatorach z elektrodą walcową mieszaninę naelektryzowaną należy dostarczać na powierzchnię tej elektrody w sposób ciągły, ze ściśle określoną wydajnością. Przykład separatora spełniającego ten warunek przedstawiono na rys. 6, jest on przedmiotem patentów<sup>7, 8)</sup>. W separatorze tym odpowiednio rozdrobniona mieszanina tworzywowa (1) jest dostarczana transporterem taśmowym (2) w określonych porcjach do mechanicznego tryboelektryzatora (3). Każda porcja mieszaniny jest elektryzowana przez odpowiednio dobrany czas. Następnie jest ona wysypywana do leja (4), pełniącego jednocześnie funkcję zbiornika buforowego, umieszczonego nad podajnikiem ślimakowym (5). Ślimak (6) podajnika (5) jest napędzany silnikiem (7) o regulowanej prędkości obrotowej. Utrzymując tę prędkość na stałym poziomie, uzyskuje się stałą wydajność dozowania mieszaniny (1) na powierzchnię wirującej elektrody walcowej (8). Dalej proces rozdzielania składników mieszaniny (1) przebiega w sposób opisany wyżej. Warunkiem właściwego funkcjonowania tego separatora jest zsynchronizowanie wydajności periodycznego zasilania mieszaniną (1) tryboelektryzatora (3), wydajności tryboelektryzatora i wydajności podajnika (5), przy czym przez cały czas trwania procesu należy również utrzymywać pełen zasyp zwojów ślimaka (6). Na rys. 6 symbolem M oznaczono silniki elektryczne, stanowiące napędy poszczególnych elementów separatora.

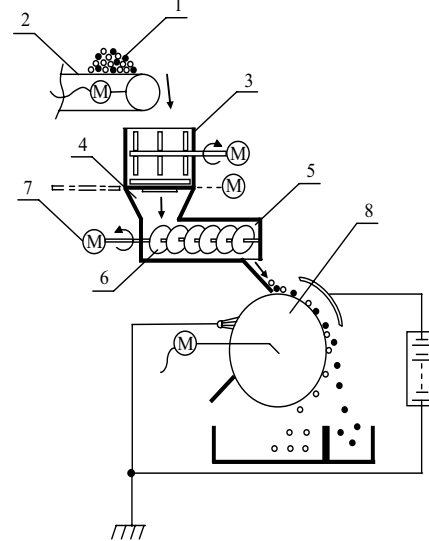


Fig. 6. Diagram of the separator equipped with screw feeder (see text)<sup>7, 8)</sup>

Rys. 6. Schemat separatora zawierającego dozownik ślimakowy (opis w tekście)<sup>7, 8)</sup>

Dwustopniowy separator walcowy przedstawiono na rys. 7. Jest on przeznaczony do rozdzielania mieszanin tworzywowych zawierających cząstki metali. Mieszaninami takimi są np. odpady kabli i przewodów elektrycznych. Rozdrobnione odpady, których cząstki nie powinny mieć rozmiarów większych niż 5 mm, są kierowane do separatora zbudowanego z podzespołu (I) oddzielania cząstek metalu, podzespołu (II) pełniącego

Ważnymi wielkościami w procesie rozdzielania mieszanin tworzywowych są natężenie i rozkład pola elektrostatycznego w przestrzeni międzyelektrodowej. Zbyt małe natężenie tego pola nie pozwala na zmianę kierunku lotu cząstek naelektryzowanych, a przy zbyt dużym natężeniu powstają wyładowania koronowe między elektrodami sepa-

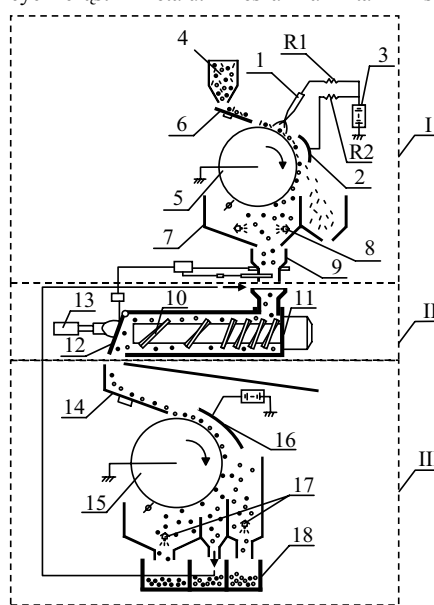


Fig. 7. Diagram of the separator used for separation of polymer blends and metallic particles (see text)<sup>9)</sup>

Rys. 7. Schemat separatora służącego do rozdzielania mieszanin tworzywowych i cząstek metali (opis w tekście)<sup>9)</sup>

funkcję tryboelektryzatora i podzespołu (III) rozdzielającego mieszaninę tworzywową. Podzespół (I) jest zbudowany podobnie jak separator walcowy przedstawiony na rys. 5, przy czym jest on wyposażony w elektrodę (1) składającą się z zestawu kilku igieł generujących wyładowania koronowe. Podobna elektroda jest przedmiotem zastrzeżeń patentu<sup>10</sup>. Elektroda (1) i elektroda odchylająca (2) zasilane są ze wspólnego źródła wysokiego napięcia stałego (3). W torach zasilających elektrody (1) i (2) są umieszczone rezystory nastawne (oznaczone symbolami R1 i R2), umożliwiające indywidualną nastawę potencjałów elektrod, a tym samym regulację natężenia i rozkładu pola elektrostatycznego. Doprowadzenie mieszaniny tworzywowej ze zbiornika (4) na powierzchnię uziemionej wirującej elektrody walcowej (5) odbywa się za pomocą transportera wiracyjnego (6). W przestrzeni między elektrodami (2) i (5) następuje oddzielenie cząstek metalu, zgodnie z mechanizmem opisanym przy omawianiu rys. 5. W leju (7) znajdującym się pod elektrodą (5), w którym przemieszcza się strumień cząstek tworzywowych, zamontowany jest neutralizator ładunków elektrostatycznych (8).

Mieszanina tworzywowa, z której w podzespole (I) zostały wydzielone cząstki metalu, jest kierowana przez dozownik (9) do podzespołu (II), w którym ulega elektryzowaniu. Elektryzowanie zachodzi pod wpływem tarcia między cząstkami tworzywa, między cząstkami tworzywa i powierzchnią ślimaka (10) oraz między cząstkami tworzywa i powierzchnią ścianki cylindra (11). Przekrój poprzeczny ścianki cylindra (11) ma kształt wielokąta foremnego (preferowany jest sześciokąt), a prędkość obrotowa ślimaka (10) jest większa niż  $200 \text{ s}^{-1}$ . Ustawiając odpowiednią wartość tej prędkości, uzyskuje się właściwy poziom naelektryzowania tworzywa. W końcowej części cylindra (11) znajduje się sterowana kłapa (12), wyposażona w siłownik (13), służąca do regulowania czasu przebywania mieszaniny tworzywowej w cylindrze (11), a także do regulowania natężenia przepływu strumienia tej mieszaniny kierowanego do zespołu (III).

Mieszanina tworzywowa pozbawiona cząstek metalu jest dostarczana za pomocą transportera wiracyjnego (14) na powierzchnię wirującej uziemionej elektrody walcowej (15). Następnie mieszanina, wskutek ruchu obrotowego elektrody (15), jest wprowadzana w obszar pola elektrostatycznego generowanego przez wysokonapięciową elektrodę odchylającą (16). W polu tym następuje rozdzielanie cząstek tworzyw o różnych ładunkach elektrostatycznych. Ładunki te są neutralizowane przez neutralizatory (17), umieszczone na drodze przepływu cząstek rozdzielonych tworzyw, wpadających do poszczególnych pojemników zestawu (18).

W przypadku gdy efekty opisanych sposobów separacji są niezadowalające, można zastosować separację wielostopniową. Walcowy separator trójstopniowy jest przedmiotem patentu<sup>11</sup>, a jego schemat przedstawiono na rys. 8. Pierwszy ze stopni zawiera tryboelektryzator (1), podajnik wiracyjny (2), wirującą elektrodę walcową (3), elektrodę odchylającą wysokiego napięcia (4), zasilacz wysokonapięciowy (5), przegrodę rozdzielczą (6) i transporter (7) odbierający frakcję oddzieloną. Sposób działania tego stopnia został wyjaśniony podczas opisów wyżej omawianych separatorów, a dwa pozostałe stopnie działają w sposób podobny. Dużą zaletą tego separatora jest to, że każdy stopień może być wyposażony w niezależny zasilacz wysokonapięciowy oraz w niezależny napęd wirującej elektrody walcowej. Umożliwia to, w zależności od potrzeb technologii procesu sepa-

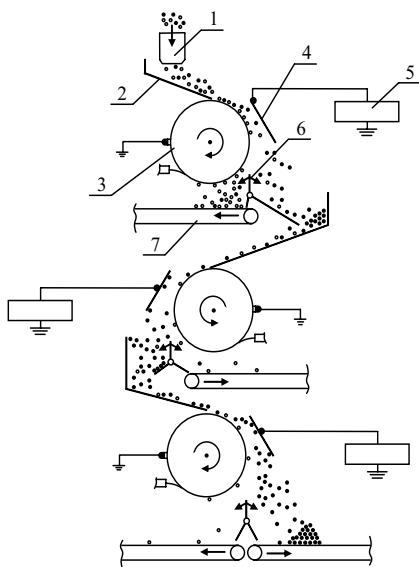


Fig. 8. Diagram of the three-stage tube separator (see text)<sup>11</sup>

Rys. 8. Schemat trójstopniowego separatora walcowego (opis w tekście)<sup>11</sup>

racji, stosowanie różnych wartości napięć zasilających poszczególne elektrody odchylające wysokiego napięcia, a także różnych prędkości obrotowych poszczególnych elektrod walcowych.

## Separatory ze wspomaganym tryboelektryzowaniem

Warunki elektryzowania mieszanin zawierających różne udziały masowe składników są często niewłaściwe. Niekorzystna sytuacja występuje wówczas, gdy udział jednego ze składników jest niewielki, co powoduje niewystarczające naelektryzowanie cząstek takiej mieszaniny. Aby temu przeciwdziałać, do mieszaniny dodaje się substancje dodatkowe, w tym także różne tworzywa polimerowe, lub cząstki mieszaniny poddaje się wstępnej modyfikacji powierzchniowej<sup>12-21</sup>.

W patencie<sup>13</sup> zastrzeżono, że masa składnika dodatkowego, wprowadzanego do mieszaniny zawierającej mniej niż 10% mas. jednego ze składników, musi spełniać relację (1):

$$0,1 \leq (m_s + m_d)/m \leq 0,9 \quad (1)$$

w której symbole  $m_s$ ,  $m_d$  i  $m$  oznaczają odpowiednio masę składnika o niewielkim udziale masowym, masę składnika dodatkowego i masę mieszaniny znajdującej się w tryboelektryzatorze, w tym także masę składnika dodatkowego. W patencie<sup>13</sup> zastrzeżono również to, że cząstki składnika dodatkowego powinny mieć średnicę 1,5–2 razy większą od średnicy cząstek mieszaniny.

W patentach<sup>14, 15</sup> przedmiotem zastrzeżenia jest tryboelektryzator w postaci wirującego pojemnika, mającego perforowane ścianki w taki sposób, że cząstki elektryzowanej mieszaniny przedostają się na zewnątrz, a cząstki wprowadzonego składnika dodatkowego pozostają w jego wnętrzu (rys. 9). Umożliwia to długotrwałe korzystanie ze składnika dodatkowego.

Patenty dotyczące dodawania składników dodatkowych zawierają wiele istotnych koncepcji, jednak w niektórych przypadkach ich opisy są przedstawione w postaci bardzo ogólnej. Zastrzeżenie sformułowane w patencie<sup>16</sup> dotyczy m.in. składnika dodatkowego o budowie chemicznej innej niż budowa składników mieszaniny rozdzielanej, przy czym zakres możliwego udziału masowego tego składnika jest bardzo szeroki. Interesującą koncepcję postaci składnika dodatkowego przedstawiono w patentach<sup>17, 18</sup>. Są nim dodatkowe elementy wymienne mieszadła stanowiącego fragment tryboelektryzatora, wykonane z odpowiednio dobranego tworzywa.

Mieszaniny, w których jednym ze składników jest PVC mogą być elektryzowane w tryboelektryzatorach zawierających specjalne wkładki wykonane z materiału, którego udział w rozdzielanej mieszaninie jest mały. Wkładki te są chronione patentem<sup>19</sup> i mogą mieć różne kształty, a proces elektryzowania może zachodzić w strudze powietrza o temp. do  $140^\circ\text{C}$ .

Szeroką klasę składników dodatkowych służących polepszeniu warunków tryboelektryzowania mieszanin polimerowych obejmują zastrzeżenia sformułowane w opisie patentowym<sup>20</sup>. Klasa ta obejmuje rozmaite materiały, w tym polimery, kopolimery blokowe, polimery zawierające materiały ferromagnetyczne, a także materiały rozrostowe lub spienione. Ważnym kryterium doboru składnika dodatkowego jest jego przenikalność dielektryczna, której wartość powinna być zbliżona do wartości średniej przenikalności dielektrycznej składników danej mieszaniny. Jako jeden z przykładów podano, że dobrym składnikiem dodatkowym podczas rozdzielania elektrostatycznego mieszaniny kopolimeru akrylonitryl/butadien/styren i wysoko udurowego poli-

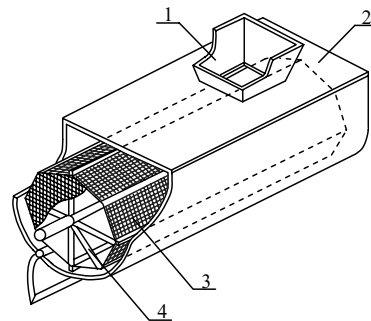


Fig. 9. A perspective view of rotating charging unit (1 – feeder, 2 – outer housing, 3 – perforated wall of rotating tube, 4 – stirrer)<sup>14, 15</sup>

Rys. 9. Widok tryboelektryzatora w postaci wirującego pojemnika z perforowanymi ściankami (1 – lej zasilający, 2 – obudowa zewnętrzna, 3 – perforowana ścianka wirującego zbiornika, 4 – mieszadło)<sup>14, 15</sup>

styrenu może być poliwęglan. Ze względu na bardzo zróżnicowane właściwości mieszanin elektryzowanych, zawsze konieczny jest indywidualny dobór składnika dodatkowego. Przedmiotem zastrzeżeń patentowych jest także zespół służący do oddzielenia tego składnika<sup>20</sup>.

Oryginalnym sposobem zwiększania efektywności tryboelektryzowania mieszanin polimerowych jest poddawanie ich działaniu plazmy niskotemperaturowej generowanej w atmosferze powietrza, azotu, tlenu lub amoniaku<sup>21</sup>. Dotyczy to głównie mieszanin zawierających poliolefiny, przy czym oddziaływanie plazmą niskotemperaturową odbywa się w warunkach niskiego ciśnienia (od  $10^{-6}$  do 1 Pa). Podstawową przeszkodą zastosowania tej metody w warunkach przemysłowych jest zbyt mała wydajność i zbyt wysokie koszty inwestycyjne, związane głównie z koniecznością stosowania szczelnych komór, w których generowana jest plazma niskotemperaturowa, wyposażonych w pompy próżniowe.

## Uwarunkowania procesu separacji

### Efekty procesu separacji

Efekty separacji zależą w bardzo dużym stopniu od sposobu przygotowania mieszaniny rozdzielanej. Przygotowanie to powinno obejmować dokładne oczyszczenie mieszaniny, tak aby znajdowały się w niej tylko składniki rozdzielane. Następnie składniki te powinny być starannie rozdrobnione w taki sposób, aby cząstki miały w przybliżeniu jednakowe rozmiary, nieprzekraczające kilku milimetrów. Rozdrobniona mieszanina nie powinna zawierać cząstek zbyt drobnych i pyłów. Kolejną ważną operacją jest dokładne osuszenie mieszaniny. Te trzy główne operacje wstępne są często znacznie trudniejsze pod względem technologicznym, wymagają dużo droższego oprzyrządowania, a także są bardziej pracochłonne niż separacja.

Proces separacji składa się z 2 odrębnych faz. Pierwszą z nich jest elektryzowanie cząstek rozdzielanej mieszaniny, przy czym dominuje tu tryboelektryzowanie. Rezultaty elektryzowania mają podstawowe znaczenie dla fazy drugiej, którą jest rozdzielanie danej mieszaniny w polu elektrostatycznym. Skuteczność rozdzielania, decydująca o efektach całego procesu separacji, jest najczęściej oceniana na podstawie czystości poszczególnych frakcji rozdzielonych, wydajności odzysku danego tworzywa i udziału frakcji nierozdzielonej.

Czystość ( $C_T$ ) frakcji danego składnika uzyskanego w procesie separacji (*purity*) definiowana jest za pomocą wzoru (2)

$$C_T = \frac{m_T}{m_{FT}} \cdot 100\% \quad (2)$$

w którym  $T$  oznacza symbol danego składnika,  $m_T$  masę składnika  $T$  znajdującego się we frakcji z dominującym udziałem tego składnika, a  $m_{FT}$  masę frakcji z dominującym udziałem składnika  $T$ . Wydajność ( $W_T$ ) odzysku danego składnika w procesie separacji (*yield recovery*) jest definiowana za pomocą wzoru (3)

$$W_T = \frac{m_T}{m_{MT}} \cdot 100\% \quad (3)$$

w którym  $m_{MT}$  oznacza masę składnika  $T$ , znajdującego się w mieszaninie poddawanej separacji, a pozostałe symbole są takie same jak we wzorze (2). Udział ( $F_N$ ) frakcji nierozdzielonej opisuje wzór (4)

$$F_N = \frac{m_N}{N_p} \cdot 100\% \quad (4)$$

w którym  $m_N$  jest masą frakcji nierozdzielonej, a  $M_p$  masą próbki mieszaniny poddawanej separacji.

### Sposoby i efekty tryboelektryzowania

Tryboelektryzowanie w złożu fluidyzacyjnym i tryboelektryzowanie mechaniczne, zachodzące pod wpływem tarcia wymuszonego, są najczęściej przedmiotem badań naukowych i aplikacyjnych. Także separatory wdrożone w przemyśle są wyposażone w elektryzatory fluidyzacyjne lub mechaniczne<sup>22</sup>.

Oryginalny tryboelektryzator fluidyzacyjny z wymiennymi komorami elektryzowania, które wykonane są z różnych polimerów (PMMA, PET, PE, PVC, PP) i z aluminium przedstawiono w publikacji<sup>23</sup>. Urządzenie to umożliwia badania efektów elektrostatycznego rozdzielania mieszanin PVC/PET elektryzowanych w różnych warunkach. Ważnym ustaleniem z tych badań było zaobserwowanie negatywnego wpływu różnoimennego elektryzowania się cząstek tych samych składników na czystość poszczególnych frakcji.

Czystość frakcji i wydajność odzysku PVC z mieszaniny PVC/PE zależy m.in. od sposobu elektryzowania, a w szczególności od prędkości obrotowej komory tryboelektryzatora mechanicznego, mającej ścianki wykonane z PVC<sup>3</sup>. Czystość ta w całym zakresie zmian prędkości obrotowej elektrody walcowej jest w przybliżeniu stała i kształtuje się na poziomie ok. 98% mas. Natomiast wydajność odzysku PVC wzrasta wraz ze wzrostem tej prędkości, osiągając maksimum przy wartości ok. 380  $\text{min}^{-1}$ , a następnie maleje. Wzrost wydajności odzysku PVC, obserwowany wraz ze wzrostem prędkości do ok. 380  $\text{min}^{-1}$ , może być spowodowany zwiększeniem intensywności tarcia między cząstkami mieszaniny, a także między tymi cząstkami i ściankami tryboelektryzatora. Przy większych prędkościach następuje duży wzrost siły odśrodkowej działającej na cząstki mieszaniny, co powoduje ich przyleganie do ścianki komory i zanik tarcia. W ten sposób cząstki te przestają być elektryzowane, co implikuje spadek wydajności odzysku PVC, gdyż duża liczba cząstek tego polimeru nie jest odchyłana w polu elektrostatycznym i tym samym trafia do pojemnika z frakcją nierozdzieloną.

Elektryzowanie za pomocą wyładowań koronowych jest korzystne w separacji odpadów obwodów drukowanych, zawierających składniki tworzywowe i metalowe. Zastosowanie w tym celu separatora dwustopniowego pozwala znacznie zmniejszyć (32–45% mas.) udział frakcji nierozdzielonej oraz znacznie zwiększyć (25–50% mas.) wydajność odzysku obu składników w stosunku do separatora jednostopniowego<sup>24</sup>.

Pomimo wielu badań, nadal nie jest w pełni wyjaśniony wpływ warunków tarcia na efekty separacji. Wciąż nie wiadomo, w jaki sposób asymetria tarcia wpływa na znak i powierzchniową gęstość ładunku elektrostatycznego cząstek, między którymi zachodzi tarcie. Poznanie tej zależności jest ważne ze względów praktycznych, gdyż w większości przypadków tryboelektryzowania taka asymetria występuje (np. gdy tarcie zachodzi między nieruchomą ścianką tryboelektryzatora i poruszającymi się cząstkami polimeru lub między cząstkami o różnych rozmiarach). Badania niektórych aspektów tarcia asymetrycznego wykazały, że ładunki elektrostatyczne są rozłożone nierównomiernie na powierzchniach, między którymi występuje tarcie oraz że poszczególne fragmenty każdej z tych powierzchni zawierają ładunki o różnych znakach. Interpretacja tych zjawisk jest utrudniona przez to, że w sposób eksperymentalny nie można stwierdzić, czy w danym przypadku transfer ładunków polega na przepływie elektronów, czy jonów. Wyniki dotychczasowych badań są podstawą stwierdzenia, że jeżeli następuje transfer ładunku ujemnego (elektronów lub jonów ujemnych), to cząstki o większym polu powierzchni tarcia zyskują ładunek dodatni, a jeśli występuje transfer ładunków dodatnich (jonów dodatnich), to zyskują one ładunek ujemny<sup>25</sup>.

Badania efektów tryboelektryzowania ośmiu polimerów (PA6,6, POM, ABS, PET, PP, PVC, PE, PTFE), obejmujące wszystkie pary mieszanin różnych polimerów z tego zbioru (27 par), nie wykazały istotnych różnic między maksymalnymi wartościami ładunków elektrostatycznych uzyskanych podczas tarcia ślizgowego lub tocznego. Jednak szybkość narastania tych ładunków była większa w przypadku tarcia ślizgowego, co świadczy o ich szybszym przepływie między materiałami trącymi się ślizgowo. Zatem podczas przygotowywania każdej z tych mieszanin do rozdzielania elektrostatycznego w porównywalnych warunkach, czas elektryzowania za pomocą tarcia ślizgowego może być krótszy niż czas elektryzowania za pomocą tarcia tocznego<sup>26</sup>.

Skutecznym narzędziem tryboelektryzowania są wibratory potrząsalne, w których na wartość ładunku elektrostatycznego elektryzowanych cząstek duży wpływ ma przyspieszenie, jakiego doznają one podczas wibracji, natomiast mniejszy wpływ ma częstotliwość tych wibracji. Podczas elektryzowania tym sposobem znacznie większy ładunek elektrostatyczny jest generowany wówczas, gdy tarcie zachodzi między cząstkami różnych materiałów niż między cząstkami tego samego materiału<sup>27</sup>.

Zwiększenie efektywności tryboelektryzowania następuje także pod wpływem odpowiedniego przygotowania powierzchni (warstwy wierzchniej) cząstek mieszaniny. Można to osiągnąć poprzez użycie promieniowania ultrafioletowego lub plazmy niskotemperaturowej. Zmiana struktury molekularnej warstwy wierzchniej danego tworzywa, a w szczególności powstanie w niej grup polarnych pod wpływem tego modyfikowania, sprzyja transferowi ładunków elektrycznych podczas tryboelektryzowania<sup>28, 29</sup>.

## Pomiary i modelowanie efektów elektryzowania

Można stosować różne miary stopnia naelektryzowania danego polimeru lub mieszaniny polimerowej. Do najważniejszych z nich należą: (a) powierzchniowy potencjał elektrostatyczny mieszaniny, (b) gęstość powierzchniowa ładunku elektrostatycznego mieszaniny (inaczej: powierzchniowy ładunek elektrostatyczny lub gęstość masowa ładunku elektrostatycznego) oraz (c) natężenie pola elektrostatycznego generowanego przez mieszaninę<sup>30, 31</sup>. Badania tych 3 wielkości w PA, PC, PE i ABS wykazały, że przebiegi krzywych zaniku ich wartości są podobne pod względem jakościowym, ale różnią się pod względem ilościowym. Szybkość zaniku badanych wielkości jest inna w poszczególnych polimerach, co jest zrozumiałe, gdyż mają one inną budowę chemiczną i tym samym różne właściwości dielektryczne. Zaskakujące jest to, że inna jest także szybkość zaniku tych wielkości w każdym z badanych polimerów. Może to być konsekwencją stosowania innych czujników i odmiennych metod pomiarowych każdej z badanych wielkości. Na uzyskane wyniki ma bowiem wpływ wartość pola powierzchni czujnika sondy pomiarowej, gdyż oddziałuje ona na pojemność sprzężenia między czujnikiem a powierzchnią utworzoną przez cząstki danej mieszaniny. Na wyniki pomiarów wpływają również rozmiary cząstek badanych polimerów, gdyż determinują one falistość powierzchni będącej przedmiotem badań<sup>31</sup>.

Opisując ruch cząstki naładowanej w polu elektrostatycznym, którego natężenie w większości separatorów nie przekracza 5 kV/cm, należy uwzględnić różne rodzaje sił działających na tę cząstkę. Dokładny opis tego ruchu jest bardzo ważny, gdyż umożliwia właściwe zaprojektowanie poszczególnych elementów separatora i poprawny dobór warunków jego eksploatacji. Rozróżnić przy tym należy odmiennie właściwości dielektryczne cząstek materiałów przewodzących i nieprzewodzących oraz wynikające stąd różne trajektorie ruchu tych cząstek w polu elektrostatycznym. W separatorach swobodnych istotny wpływ na trajektorie ruchu cząstek przewodzących mają głównie rozmiary i masa właściwa rozdzielanych cząstek oraz kąt pochylenia, wymiary i wzajemne usytuowanie elektrod wysokiego napięcia, a także wartość napięcia elektrycznego przyłożonego do tych elektrod<sup>32</sup>.

Nowy, udoskonalony model matematyczny umożliwia bardziej dokładne obliczenia trajektorii lotu cząstek metalu (cząstek przewodzących) w separatorze walcowym i uwzględnia wpływ oporów powietrza oraz różnych warunków tryboelektryzowania na postać analityczną tej trajektorii<sup>33</sup>. Doświadczalne badania rozdzielania odpadów obwodów drukowanych, wykonane przez autorów tego modelu, potwierdziły jego przydatność do celów praktycznych. Z kolei przedmiotem pracy<sup>34</sup> jest analiza matematyczna wpływu warunków rozdzielania w polu elektrostatycznym mieszaniny zawierającej cząstki przewodzące i nieprzewodzące na trajektorie lotu cząstek przewodzących. W analizie tej uwzględniono zjawiska dynamiczne zachodzące podczas lotu danej cząstki w polu elektrostatycznym. Stwierdzono, że na kształt tych trajektorii zasadniczy wpływ mają: (a) kształt linii i natężenie pola elektrostatycznego w przestrzeni międzyelektrodowej, co wiąże się z różnicą potencjałów elektrody wysokiego napięcia i elektrody walcowej oraz z odpowiednim usytuowaniem przestrzennym poszczególnych elektrod, (b) prędkość obrotowa elektrody walcowej, (c) masa i rozmiary cząstek oraz (d) wilgotność względna powietrza, w którym zachodzi proces separacji.

Zwiększenie wydajności separatora i szerszy zakres trajektorii lotu cząstek poruszających się w jego polu elektrostatycznym można uzyskać, zwiększając różnicę potencjałów między elektrodami walcową i wysokiego napięcia. Gdy różnica ta przekroczy wartość progową joni-

zacji powietrza, pojawiają się wyładowania elektryczne między elektrodami, które mogą zakłócać proces separacji. Zakłócenia te polegają m.in. na tym, że cząstki nieprzewodzące elektryzują się w zbyt małym stopniu, co powoduje zbyt wczesne ich odpadanie od powierzchni elektrody walcowej. Tym samym zanieczyszczają one frakcję zawierającą cząstki przewodzące. Model matematyczny opisujący to zjawisko oraz eksperymentalną jego weryfikację przedstawiono w pracy<sup>35</sup>.

## Wpływ rodzaju składników mieszaniny i ścianek tryboelektryzatora

Jednym z istotnych uwarunkowań separacji jest rodzaj składników mieszaniny. Najlepsze efekty uzyskuje się wówczas, gdy składniki te połączone są w tryboszeregu elektrycznym w miejscach odległych od siebie. Z tego względu na ogół dobre wyniki uzyskuje się, gdy jednym ze składników mieszaniny jest PVC, będący silnym akceptorem elektronów, położonym w końcowej części tego tryboszeregu i elektryzujący się ujemnie podczas tarcia z większością powszechnie stosowanych tworzyw.

Szczególnie duże zainteresowanie wzbudza rozdzielanie mieszanin cząstek PVC i PET<sup>23, 36-38</sup>. W zależności od warunków procesu separacji uzyskiwano różne wyniki, przy czym czystości frakcji PVC i PET otrzymanych z mieszanin zawierających po 50% mas. każdego z tych składników wynosiły odpowiednio 99,6 i 99,2% mas.<sup>23</sup>, 90,0 i 98,9% mas.<sup>36</sup> oraz 99,1 i 97,9% mas.<sup>37</sup>. Wskazuje to jednoznacznie na duże możliwości skutecznego rozdzielania elektrostatycznego mieszanin PVC i PET, które ze względu na podobną gęstość nie mogą być rozdzielane metodami klasycznymi. Zainteresowanie tymi mieszaninami jest spowodowane głównie względami utylitarnymi, gdyż oba polimery są powszechnie stosowane do wytwarzania butelek i foliowych opakowań produktów spożywczych, co powoduje, że ich udział masowy w odpadach tworzywowych jest duży.

Dobre rezultaty uzyskano także w procesach separacji mieszanin dwuskładnikowych w postaci granulatów, elektryzowanych fluidyzacyjne lub mechanicznie, w których jednym ze składników był PVC, a drugim PE, PP lub PS<sup>3, 36, 39</sup>, a także mieszanin PVC i PE w postaci proszków o rozmiarach ziaren odpowiednio 150 i 170  $\mu\text{m}$ <sup>40</sup>. Wszystkie frakcje pochodzące z rozdzielania mieszanin PVC/PE i PVC/PP miały czystość i wydajność odzysku większe niż 96% mas. W mieszaninach PVC/PS wielkości te kształtowały się na poziomie powyżej 99% mas. Na lepszą separację mieszanin PVC/PS może wpływać to, że w tryboszeregu elektrycznym PS i PVC są od siebie bardziej oddalone niż PE i PP. Przedstawione wyniki potwierdzają duże możliwości stosowania separacji elektrostatycznej mieszanin zawierających PVC w warunkach przemysłowych.

Rezultaty rozdzielania mieszanin proszków PVC i PE są znacznie gorsze, zwłaszcza w przypadku frakcji PVC, dla której wydajność odzysku przy czystości powyżej 40% mas. kształtuje się niekiedy na poziomie nieznacznie przekraczającym 30% mas. W przypadku frakcji PE wyniki są znacznie lepsze, gdyż wynoszą odpowiednio ponad 90 i ponad 60% mas., ale nadal nie są one satysfakcjonujące. Autorzy pracy<sup>40</sup> nie zinterpretowali w pełni tych wyników, na które mógł mieć także wpływ sposób elektryzowania mieszaniny proszków PVC i PE w cyklonie aluminiowym, którego ścianki wewnętrzne wyłożone były miedzią.

Duży wpływ na gęstość masową ładunku elektrostatycznego i na jego znak ma rodzaj materiału, z jakiego wykonane są ścianki tryboelektryzatora. W pracy<sup>41</sup> przedstawiono wyniki badań mechanicznego elektryzowania 13 polimerów, przeprowadzonego w komorach tryboelektryzatora zbudowanych z 8 różnych materiałów, w tym z 7 polimerów powszechnego użytku i z miedzi. Z badań tych wynika, że znak i gęstość masowa ładunku elektrostatycznego zmieniają się w sposób znaczący w zależności od rodzaju ścianek komory tryboelektryzatora, stanowiących w tym przypadku jeden z elementów pary dwóch trących się materiałów. Charakterystyczne jest, że wszystkie materiały elektryzowane w komorze z PTFE mają duży ładunek dodatni, a elektryzowane w komorze z PMMA duży ładunek ujemny (z wyjątkiem PMMA). Informacje te mają istotne znaczenie utylitarnie i mogą być wykorzystane zarówno podczas konstruowania separatorów mieszanin tworzywowych, jaki i w trakcie opracowywania technologii procesu separacji.

Doświadczalnie potwierdzono istotny wpływ rodzaju ścianek tryboelektryzatora (cyklonu) na elektryzowanie mieszaniny PET/PE zawie-

rające po 50% mas. każdego ze składników. Jako efekt elektryzowania przyjmowano wartość potencjału powierzchniowego każdego składnika i porównywano go z efektem uzyskanym dla dwóch różnych wykładzin (żywicy akrylowej lub PS) wewnętrznej powierzchni ścianki cyklotonu<sup>42</sup>). Analizując wyniki tych badań, można zauważyć, jak duży jest wpływ rodzaju wykładziny ścianek tryboelektryzatora na elektryzowanie. W przypadku wykładziny z żywicy akrylowej cząstki PET elektryzują się w niewielkim zakresie, a ponadto w różnych momentach pomiaru znaki ładunków są różne. Może to być spowodowane niewielką różnicą pracy wyjścia PET (4,25 eV) i żywicy akrylowej (4,30 eV). Ładunek elektrostatyczny PE ma znak ujemny, co jest zrozumiałe, gdyż praca wyjścia dla PE (5,24 eV) jest znacznie większa niż dla PET i żywicy akrylowej. Wskutek elektryzowania mieszaniny PET/PE w tryboelektryzatorze z wykładziną z PS cząstki PET uzyskują ładunek dodatni, a cząstki PE ujemny. Potwierdza to przedstawioną wyżej interpretację wyników, gdyż praca wyjścia PS (4,77 eV) znacznie różni się od pracy wyjścia PET i PE. Rezultaty tych badań wskazują na to, że w przypadku rozdzielania mieszaniny PET/PE ścianki tryboelektryzatora i innych elementów konstrukcyjnych separatora doprowadzających naelektryzowaną mieszaninę w obszar pola elektrostatycznego mogą być wykonywane z PS.

### Udział masowy składników mieszaniny

Z badań wpływu udziału masowego PVC (20–80% mas. PVC w dwuskładnikowej mieszaninie PVC/PE) na czystość frakcji i wydajność odzysku PVC wynika, że ma on duży wpływ na te efekty procesu separacji. Wpływ ten jest znacznie większy na wydajność odzysku tego polimeru niż na czystość jego frakcji. Wraz ze wzrostem udziału masowego PVC stopniowo wzrasta (ok. 85–ok. 97% mas.) czystość frakcji PVC, natomiast wydajność odzysku maleje. Szczególnie duży spadek wydajności zaobserwowano wówczas, gdy udział masowy PVC w badanych mieszaninach przekraczał 40% mas. Uwzględniając wyniki badań obu tych wielkości, można przyjąć, że najlepsze wyniki rozdzielania uzyskuje się wówczas, gdy udział PVC wynosi ok. 40% mas.

Badania frakcji PA i PC uzyskanych przez separację mieszanin PA/PC o różnych udziałach masowych tych polimerów wykazały, że największą czystość obu frakcji uzyskuje się przy najmniejszych różnicach udziałów masowych PA i PC. Natomiast gdy udział jednego ze składników nie przekracza 30% mas., to czystość frakcji dominującej przekracza 99% mas., a czystość frakcji mniejszościowej jest mniejsza niż 70% mas. W badaniach tych zastosowano technikę planowania doświadczeń, a uzyskane modele zostały w pełni potwierdzone wynikami przeprowadzonych doświadczeń<sup>43</sup>).

### Wilgotność względna powietrza

Warunki termodynamiczne oraz wilgotność względna powietrza mają istotny wpływ na przebieg i efektywność procesu tryboelektryzowania. Przy zachowaniu stałej temperatury, wraz ze wzrostem względnej wilgotności powietrza, w którym zachodzi ten proces, maleje wartość powstającego ładunku elektrycznego. Podobne zmiany zachodzą także podczas wzrostu temperatury powietrza<sup>44–46</sup>).

Wraz ze wzrostem wilgotności względnej powietrza, w którym zachodzi tryboelektryzacja, w podobny sposób maleją wartości bezwzględne ładunków elektrostatycznych PMMA i PVC<sup>41</sup>). Wartości te przy 70-proc. wilgotności względnej powietrza są 3–4 razy mniejsze niż przy wilgotności równej 20%. Zjawisko to można wyjaśnić tym, że wraz ze wzrostem względnej wilgotności powietrza na powierzchni elektryzowanych polimerów osadza się cienka warstwa wody, w której następuje dysocjacja cząsteczek różnych zanieczyszczeń i składników dodatkowych, co stymuluje powstawanie jonów neutralizujących ładunki elektrostatyczne powstające podczas tarcia.

Wilgotność względna powietrza wpływa także na przebieg zmian w czasie wartości ładunków elektrostatycznych PMMA szczepionego na folii PP. W przedziale wilgotności do 20% wartości tych ładunków są stabilne, gdy wilgotność powietrza jest większa od 40% obserwuje się zanik tych ładunków, a także ich przepływ powierzchniowy. Symulacje

komputerowe tych procesów wskazują na istnienie dwóch rodzajów ładunków pułapkowanych w różnych miejscach, przy czym wartości tych ładunków są podobne. Ładunki jednego rodzaju znajdują się na powierzchni folii i mają zdolność do przepływu powierzchniowego, nie zanikają i nie dyfundują w głąb materiału. Ładunki drugiego rodzaju znajdują się w warstwie wierzchniej PMMA, wykazują niewielką zdolność do przepływu powierzchniowego, migrują w głąb materiału i zanikają. Ten zróżnicowany sposób zachowania się poszczególnych rodzajów ładunków może mieć wpływ na skuteczność separacji elektrostatycznej<sup>47</sup>).

### Czas elektryzowania

Można badać efekty bezpośrednie i pośrednie czasu elektryzowania mieszanin polimerowych. Do efektów bezpośrednich zalicza się zmiany powierzchniowego potencjału ( $U_E$ ) elektrostatycznego oraz zmiany gęstości masowej ładunku elektrostatycznego. W początkowym okresie elektryzowania fluidyzacyjnego mieszaniny ABS/PMMA, w elektryzatorze o ściankach komory fluidyzacyjnej wykonanych ze szkła borokrzemowego, o jednakowej zawartości każdego z tych składników, wartość powierzchniowego potencjału elektrostatycznego ( $U_E$ ), a tym samym i gęstości powierzchniowa ładunku elektrostatycznego elektryzowanej mieszaniny szybko wzrastają<sup>48</sup>) i osiągają maksimum po ok. 30 s elektryzowania, przy czym maksymalna wartość  $U_E$  wynosi wówczas 22,3 kV. Po przekroczeniu tego czasu następuje szybkie zmniejszanie się wartości  $U_E$ , która po 3 min elektryzowania maleje do 2,1 kV, a po 5 min wynosi już tylko 0,9 kV. Można przypuszczać, że zbyt długi czas elektryzowania powoduje w niektórych cząstkach nadmierny wzrost ładunków elektrostatycznych o znakach przeciwnych. Cząstki te, zgodnie z prawem Coulomba, przyciągają się i tworzą aglomeraty, w których następuje kompensacja ładunków, co powoduje zmniejszenie wartości  $U_E$ . Podobne zjawisko obserwuje się podczas elektryzowania mieszaniny PVC/PE w tryboelektryzatorze mechanicznym, mającym ścianki wykonane z PVC<sup>3</sup>). W tym przypadku czas elektryzowania w nieznacznym stopniu wpływa na czystość frakcji PVC, gdyż przez cały okres elektryzowania utrzymuje się ona na poziomie ponad 95% mas., co jest wynikiem dobrym. Wydajność odzysku PVC przez pierwsze 30 s szybko wzrasta, następnie (do ok. 100 s) wzrost ten jest już znacznie wolniejszy, a dalsze przedłużanie czasu elektryzowania powoduje zmniejszenie wydajności. Zjawisko to spowodowane jest neutralizacją ładunków naelektryzowanych cząstek wskutek zbyt długiego przebywania ich w tryboelektryzatorze. Ponieważ czystość frakcji PVC jest w przybliżeniu stała przez cały czas elektryzowania, najlepsze wyniki separacji uzyskuje się, gdy czas elektryzowania wynosi ok. 100 s<sup>3</sup>).

Różne są przebiegi zmian wartości ładunków elektrostatycznych w czasie mechanicznego elektryzowania cząstek PMMA, ABS, PP i PVC w tryboelektryzatorze mającym ścianki komory wykonane z PE-HD<sup>41</sup>). Polimery te były elektryzowane przez ok. 20 min. W tym czasie zwiększała się gęstość masowa ładunku elektrostatycznego każdego z polimerów, przy czym po przekroczeniu czasu elektryzowania 5 min wzrost ten był już nieznaczny. Zatem nie zaobserwowano tu zmniejszania się ładunku elektrostatycznego w przedłużonym czasie elektryzowania.

Ogólnie można stwierdzić, że badane wielkości zmieniają się w różny sposób wraz ze wzrostem czasu elektryzowania. Jednak niezależnie od przebiegu tych zmian, wpływ czasu elektryzowania na efekty tego procesu jest wyraźny. Ze względu na różne warunki procesów separacji optymalny czas elektryzowania mieszanin tworzywowych w każdym procesie przemysłowym powinien być wyznaczany indywidualnie w sposób doświadczalny.

### Prędkość obrotowa elektrody walcowej

Naelektryzowane cząstki mieszaniny padając na powierzchnię wirującej elektrody walcowej, powinny tworzyć na niej warstwę pojedynczą. W związku z tym zwiększając prędkość obrotową elektrody można zwiększyć wydajność separatora, co jest działaniem pożądanym w warunkach przemysłowych. Zatem w separatorach walcowych konieczne jest znalezienie korzystnego kompromisu między sku-

tecznością rozdzielania składników danej mieszaniny i wydajnością procesu separacji a prędkością obrotową elektrody walcowej.

Prędkość obrotowa tej elektrody ma duże znaczenie podczas rozdzielania elementów metalowych i niemetalowych znajdujących się w odpadach drukowanych obwodów elektronicznych. Zagospodarowanie tych odpadów jest dużym wyzwaniem dla współczesnej techniki i dlatego wiele publikacji naukowych oraz technicznych jest poświęconych temu zagadnieniu. W pracy<sup>49)</sup> przedstawiono matematyczny model służący do wyznaczania odpowiedniej prędkości obrotowej elektrody walcowej separatora przeznaczonego do rozdzielania odpadów obwodów drukowanych oraz stanowisko badawcze wyposażone w separator walcowy. Na stanowisku tym przeprowadzono eksperymentalną weryfikację modelu matematycznego. W modelu założono, że ze względu na warunki elektryzowania i rozdzielania danej mieszaniny musi być zachowany pewien minimalny czas spoczywania cząstek mieszaniny na powierzchni wirującej elektrody walcowej. To założenie, w powiązaniu z wyznaczoną niezbędną gęstością powierzchniową ładunku elektrostatycznego cząstek (wymaganą podczas rozdzielania danej mieszaniny) i wartością promienia elektrody walcowej, jest podstawą do określenia tzw. krytycznej prędkości obrotowej elektrody walcowej, po przekroczeniu której rozdzielanie mieszaniny staje się zbyt mało skuteczne.

Inne podejście do rozwiązania tego problemu zaprezentowano w pracy<sup>50)</sup>. Przyjęto w niej podstawowe założenie, że siła ( $F_i$ ) (przyciągania elektrostatycznego działająca na cząstkę o masie ( $m$ ) spoczywającą na powierzchni elektrody walcowej o promieniu ( $R$ ), wirującej z prędkością kątową ( $\omega$ ), powinna być większa od sumy siły ( $F_c$ ) odśrodkowej i rzutu siły ( $F_g$ ) grawitacji tej cząstki na prostą łączącą oś podłużną elektrody walcowej i tę cząstkę. Rzut ten, oznaczony symbolem  $F_{gv}$ , jest obliczany jako  $F_{gv} = F_g \cdot \cos\beta$ . Efektem tych badań są wykresy odpowiadające wartościom siły  $F_i$  przy różnej wilgotności badanych próbek oraz sumy sił ( $F_c + F_{gv}$ ) w zależności od położenia kąowego analizowanej cząstki. Są one podstawą ważnego wniosku o charakterze praktycznym, że zmniejszając prędkość obrotową elektrody walcowej, można rozdzielać elektrostatycznie materiał o większym zawilgoceniu, ale powoduje to zmniejszenie wydajności separatora.

## Wnioski

Z przytoczonej literatury, w tym także opisów patentowych, wynika, że istnieje duża liczba opatentowanych konstrukcji i sposobów działania separatorów elektrostatycznych. Ozwierciedlają one szerokie możliwości zastosowań tych urządzeń. Jednak zdecydowana większość tych patentów nie znalazła jeszcze zastosowań w separatorach wytwarzanych na potrzeby przemysłu.

W procesie separacji elektrostatycznej dominujące znaczenia mają elektryzowanie (stosowane są głównie tryboelektryzowanie i elektryzowanie koronowe) oraz rozdzielanie składników naelektryzowanej mieszaniny polimerowej w polu elektrostatycznym, którego natężenie zawiera się na ogół w zakresie 2–5 kV/cm.

Na efekty tryboelektryzowania ma wpływ wiele różnych czynników, z których najważniejsze są: (a) sposób wstępnego przygotowania mieszaniny (jednolite rozmiary cząstek, skuteczne wyeliminowanie zanieczyszczeń, usunięcie wilgoci), (b) rodzaj składników mieszaniny (najlepsze efekty uzyskuje się wówczas, gdy elektryzowane składniki mieszaniny położone są w miejscach odległych od siebie w szeregu tryboelektrycznym), (c) struktura geometryczna powierzchni cząstek (korzystne jest, gdy powierzchnia ta jest możliwie gładka, co zwiększa pole powierzchni kontaktu wzajemnego cząstek), (d) zawartość wilgoci w mieszaninie i wilgotność względna oraz temperatura powietrza (wzrost tych wielkości powoduje najczęściej zmniejszenie efektywności tryboelektryzowania), (e) rodzaj i udział masowy poszczególnych składników mieszaniny (najlepsze warunki tryboelektryzowania występują wówczas, gdy różnice w udziałach masowych składników elektryzowanych są niewielkie), (f) rodzaj materiału ścianek tryboelektryzatora, (g) rodzaj i warunki tarcia (ślizgowe, toczne, udarowe) oraz (h) czas tryboelektryzowania.

Efekty tryboelektryzowania można zwiększyć poprzez odpowiednie przygotowanie powierzchni (warstwy wierzchniej) cząstek mieszaniny.

Można to osiągnąć poprzez zastosowanie promieniowania ultrafioletowego lub plazmy niskotemperaturowej. Zmiana struktury molekularnej warstwy wierzchniej danego tworzywa, a w szczególności powstanie w niej grup polarnych pod wpływem takiego modyfikowania, sprzyja transferowi ładunków elektrycznych zachodzącemu podczas tryboelektryzowania. Zmniejszenie chropowatości powierzchni materiałów, między którymi występuje tarcie, ułatwia transfer tych ładunków, gdyż zwiększa pole powierzchni kontaktu rzeczywistego między tymi materiałami.

Szereg tryboelektryczny jest bardzo przydatnym narzędziem oceny zdolności tryboelektryzowania różnych materiałów, a w literaturze występuje dość duża zgodność klasyfikacji polimerów pod względem ich właściwości tryboelektrycznych.

Duża liczba zmiennych procesowych zależnych od sposobu przygotowania danej mieszaniny, rodzaju i właściwości składników tej mieszaniny, sposobu prowadzenia procesu separacji oraz konstrukcji separatora powoduje, że możliwości analitycznego opisu tego procesu są ograniczone. Z tego powodu ustalenie odpowiednich warunków prowadzenia procesu separacji powinno być dokonywane każdorazowo na podstawie wyników badań doświadczalnych. W badaniach tych należy korzystać z teorii planowania doświadczeń.

Otrzymano: 03-12-2013

## LITERATURA

1. M. Żenkiewicz, T. Żuk, M. Błaszowski, Z. Szumski, *Przem. Chem.* 2013, **92**, nr 2, 279.
2. E. Németh, V. Albrecht, G. Schubert, F. Simon, *J. Electrostat.* 2003, **58**, 3.
3. A. Tilmatine, S. Bendimerad, *Front. Electr. Electron. Eng. China* 2009, **4**, 446.
4. *Pat. europ.* 1777013.
5. *Pat. USA* 2009/0194461.
6. *Pat. europ.* 1127623.
7. *Pat. USA* 6365857.
8. *Pat. europ.* 1052022.
9. *Pat. niem.* 10140241.
10. *Pat. USA* 2002/0189977.
11. *Pat. USA* 6903294.
12. *Pat. meksyk.* PA01009205.
13. *Pat. USA* 6415929.
14. *Pat. USA* 6271492.
15. *Pat. europ.* 1055460.
16. *Pat. USA* 6452126.
17. *Pat. USA* 6426474.
18. *Pat. europ.* 1106256.
19. *Pat. niem.* 102010001509.
20. *Pat. świat.* 2004/009242.
21. *Pat. niem.* 102004024754.
22. [www.hamos.com](http://www.hamos.com), dostęp czerwiec 2013 r.
23. A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalciou, L. Dascalescu, *J. Electrostat.* 2005, **63**, 937.
24. J. Wu, J. Li, Z. Xu, *J. Hazard. Mater.* 2009, **161**, 257.
25. R. Pham, R.C. Virmelson, R.M. Sankaran, D.J. Lacks, *J. Electrostat.* 2011, **69**, 456.
26. K. Hiratsuka, K. Hosotani, *Tribol. Intern.* 2012, **55**, 87.
27. C.-C. Liao, S.-S. Hsiao, T.-Y. Huang, *Powder Technol.* 2011, **208**, 1.
28. Y. Uyama, Y. Ikada, *J. App. Polym. Sci.* 1990, **41**, 619.
29. J. Kodama, R. Foerch, N.S. McIntyre, G.S.P. Castle, *J. App. Polym. Sci.* 1993, **74**, 4026.
30. J. Cross, *Electrostatics. Principles, problems and applications*, Adam Hilger, Bristol 1987 r.
31. M. Kachi, M. Nemamcha, B. Tabti, L. Dascalescu, *J. Electrostat.* 2011, **69**, 394.
32. S. Vlad, A. Iuga, L. Dascalescu, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2000, **33**, 127.
33. J. Wu, J. Li, Z. Xu, *J. Hazard. Mater.* 2009, **167**, 489.
34. Z.-M. Xu, J. Li, H.-Z. Lu, J. Wu, *Sci. China Ser. E-Tech. Sci.* 2009, **52**, 2359.
35. A. Younes, M. Younes, H. Sayah, M. Bilici, A. Samuila, L. Dascalescu, *J. Electrostat.* 2013, **71**, 84.
36. J.-K. Lee, J.-H. Shin, *Korean J. Chem. Eng.* 2002, **19**, 267.
37. J.-K. Lee, J.-H. Shin, *Korean J. Chem. Eng.* 2003, **20**, 572.
38. G. Bedecović, B. Salopek, I. Sobota, *Inż. Mineral.* 2011, lipiec-grudzień, 63.
39. J.-K. Lee, J.-H. Shin, Y.-J. Hwang, *KSME Intern. J.* 2002, **16**, 1336.
40. D.K. Yanar, B.A. Kewtkus, *J. Electrostat.* 1995, **35**, 257.
41. C.H.Park, J.K. Park, H.S. Jeon, B.C. Chun, *J. Electrostat.* 2008, **66**, 578.
42. G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Miyazaki, T. Fujita, *Magn. Electrical Separ.* 2002, **11**, 63.
43. M. Bilici, L. Dascalescu, T. György, V. Barna, F. Rahou, A. Samuila, *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics* 2011, 1.
44. W.D. Greason, *J. Electrostat.* 2000, **49**, 245.
45. T. Nomura, T. Satoh, H. Masuda, *Powder Technol.* 2003, **135/136**, 43.
46. S. Matsusaka, H. Maruyama, T. Matsuyama, M. Ghadiri, *Chem. Eng. Sci.* 2010, **65**, 5781.
47. Y. Hori, *J. Electrostat.* 2000, **48**, 127.
48. M. Żenkiewicz, T. Żuk, *Polimery* 2014, **59**, w druku.
49. J. Li, H. Lu, Z. Xu, Y. Zhou, *J. Hazard. Mater.* 2008, **154**, 331.
50. S. Das, A. Samuila, C. Dragan, L. Dascalescu, *J. Electrostat.* 2009, **67**, 189.