

Badania procesu separacji elektrostatycznej mieszanin polimerowych o różnych zawartościach ABS i PMMA

Marian Żenkiewicz^{1,*}, Tomasz Żuk², Mariusz Błaszowski²

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2014.495

Streszczenie: Zbadano proces separacji elektrostatycznej dwuskładnikowych mieszanin tworzywowych o różnych zawartościach (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 i 90 % mas.) terpolimeru akrylonitryl-butadien-styren (ABS) i poli(metakrylanu metylu) (PMMA). Separację prowadzono za pomocą skonstruowanego przez nas elektrostatycznego separatora walcowego. Stwierdzono, że efekty elektryzowania fluidyzacyjnego zależą od czasu trwania tego procesu, a maksymalna wartość powierzchniowego potencjału elektrostatycznego, mieszaniny zawierającej po 50 % mas. ABS i PMMA — wynosząca ponad 22 kV — występuje po ok. 20 s elektryzowania. Natomiast podczas elektryzowania mechanicznego powierzchniowy potencjał elektrostatyczny rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej mieszadła i osiąga wartość ok. 18 kV. Rozdzielanie mieszanin prowadzono w polu elektrostatycznym, występującym między eliptyczną elektrodą wysokiego napięcia i walcową elektrodą uziemioną, wirującą z prędkością 30 min⁻¹. Napięcie stałe między elektrodami wynosiło 20 kV, a natężenie pola elektrostatycznego nie przekraczało 4 kV/cm. Stwierdzono, że efekty procesu separacji, tzn. czystość poszczególnych frakcji oraz wydajność odzysku ABS i PMMA, zależą od wyników elektryzowania oraz od zawartości poszczególnych składników w mieszaninie, przy czym rozdział jest tym lepszy im bardziej zrównoważony jest udział składników. Z badań wynika również, że rozdzielając mieszaniny o zawartości od 20 do 70 % mas. ABS (30–80 % mas. PMMA) można uzyskać poszczególne frakcje o czystości większej niż 95 % mas. z wydajnością odzysku przekraczającą 97 % mas. Zwiększenie otrzymanej czystości i wydajności jest możliwe w warunkach separacji wielostopniowej.

Słowa kluczowe: separacja elektrostatyczna, mieszaniny polimerowe, ABS, PMMA, recykling.

Study on electrostatic separation of polymeric blends with different ABS and PMMA contents

Abstract: The results of an investigation of the process of electrostatic separation of binary polymeric blends with different content (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, and 90 wt %) of acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer (ABS) and poly(methyl methacrylate) (PMMA) are presented. The separation was carried out by using a home-made prototype of electrostatic cylindrical separator. It was found that the effects of the tribocharging in fluidized bed depended on the process duration. A maximum value of the electric potential (over 22 kV) of the blend containing 50/50 wt % of ABS and PMMA was attained after ca. 20 s of the electrization. Instead, during the mechanical tribocharging, an electric potential increased with the rise of the rotational speed of a stirrer and reached a value of ca. 18 kV. The blend separation was performed in an electrostatic field arising between a high-voltage elliptic electrode and cylindrical ground electrode rotating at a rate of 30 rpm. The dc voltage between the electrodes was 20 kV and the electrostatic field intensity did not exceed 4 kV/cm. It was found that the effects of the separation process, i.e., purity of the particular fractions and yield of the ABS and PMMA recovery, depended on both the tribocharging effects and contents of the individual blend components. A better separation was achieved for the more balanced compositions. The investigations also indicated that the separation of blends containing 20–70 wt % ABS (30–80 wt % PMMA) may result in a purity of the particular fractions above 95 wt % and recovery yield above 97 wt %. Further increase in the purity and yield is possible by application of a multi-step separation.

Keywords: electrostatic separation, polymer blends, ABS, PMMA, recycling.

¹) Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Instytut Techniki, Katedra Inżynierii Materiałowej, ul. Chodkiewicza 30, 85-064 Bydgoszcz.

²) Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników w Toruniu, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55, 87-100 Toruń.

* Autor do korespondencji; e-mail: marzenk@ukw.edu.pl

Efektywne zagospodarowanie odpadów tworzywowych jest zadaniem trudnym pod względami organizacyjnymi i technicznymi. Stanowi ono jeden z głównych priorytetów współczesnej cywilizacji i implikuje konieczność rozwoju różnych technologii stosowanych w procesach recyklingu odpadów z tworzyw polimerowych. Podstawową koncepcją tego zagospodarowania, propagowaną głównie w państwach Unii Europejskiej, jest wielokrotne wykorzystanie materiałów polimerowych odzyskiwanych w procesach recyklingu materiałowego lub surowcowego [1–3]. Uzyskanie nowego materiału (recyklatu) w procesie recyklingu materiałowego poprzedzają takie operacje jednostkowe, jak: zbiórka i magazynowanie odpadów, segregacja i oczyszczanie wstępne, rozdrabnianie, sortowanie, mycie i suszenie. Realizacja takich operacji w poszczególnych państwach Unii odbywa się różnymi sposobami, przy czym największe trudności organizacyjne i techniczne występują podczas zbiórki i sortowania odpadów [2–5].

Sortowanie mieszaniny odpadów tworzywowych polega na wyodrębnianiu poszczególnych rodzajów tworzyw, po uprzednim usunięciu z nich innych zanieczyszczeń. Większość tworzyw polimerowych jest niemieszalna na poziomie cząsteczkowym, co ogranicza w istotny sposób możliwości bezpośredniego przetwarzania wieloskładnikowych mieszanin polimerowych metodami klasycznymi, takimi jak: wyłaczanie, wtryskiwanie lub termoformowanie, gdyż uzyskane produkty charakteryzują się zbyt małą wytrzymałością mechaniczną [6]. Z tego względu sortowanie stanowi jedną z podstawowych operacji w procesach recyklingu materiałowego odpadów tworzywowych (zawierających z reguły różne rodzaje tworzyw), a odpowiednio dokładne jej wykonanie jest warunkiem koniecznym do dalszego wykorzystania odpadów [7].

Odmianą sortowania mieszanin polimerów, w tym też wieloskładnikowych odpadów tworzywowych, jest sortowanie elektrostatyczne, zwane dalej separacją elektrostatyczną lub, w skrócie, separacją. Prowadzona jest za pomocą separatorów elektrostatycznych, zwanych separatorami. W procesach separacji, niezależnie od sposobu ich prowadzenia, oraz w separatorach — niezależnie od różnic w ich konstrukcjach — jest wykorzystywane jedno z podstawowych praw elektrostatyki — prawo Coulomba. Stanowi ono podstawę sformułowanych fundamentalnych pojęć używanych w analizie zjawisk związanych z separacją [8–10].

Oprócz operacji odpowiedniego przygotowania danej mieszaniny do procesu separacji, innymi najważniejszymi operacjami występującymi w tym procesie są elektryzowanie i rozdzielanie mieszaniny naelektryzowanej w polu elektrostatycznym. Do podstawowych metod elektryzowania zalicza się: (a) tryboelektryzowanie mechaniczne powodowane wzajemnym tarcieniem cząstek danej mieszaniny podczas jej mechanicznego mieszania, a także tarcieniem o ścianki urządzenia, w którym przebiega

proces [11, 12]; (b) tryboelektryzowanie fluidyzacyjne, będące odmianą tryboelektryzowania mechanicznego, w którym tarcie zachodzi w ruchomym złożu fluidalnym [13, 14]; (c) elektryzowanie w strumieniu elektronów i jonów powstających wskutek wyładowań koronowych; (d) elektryzowanie w wyniku indukcji, zachodzące w polu elektrostatycznym. Procesy elektryzowania mieszanin polimerowych, zależne w bardzo dużym stopniu od warunków otoczenia, ich rozdział oraz konstrukcje separatorów lub ich fragmentów, są przedmiotem wielu publikacji i patentów [15–19], co omówiono także w naszej publikacji [20], gdzie przedstawiono również wyniki sortowania różnych mieszanin tworzywowych. Niewiele jest także tego typu urządzeń do separacji mieszanin odpadów tworzywowych, eksploatowanych w przemyśle, a najbardziej znanym w Europie ich producentem jest niemiecka firma Hamos [21].

Celem niniejszej pracy jest ocena możliwości separacji elektrostatycznej dwuskładnikowych mieszanin polimerowych o różnych zawartościach terpolimeru akrylonitryl-butadien-styren (ABS) i poli(metakrylanu metylu) (PMMA). Taki wybór mieszanin w charakterze przedmiotu naszych badań, był podyktowany głównie względami utylitarnymi. Polimery ABS i PMMA mają zbliżoną gęstość, co uniemożliwia rozdzielanie ich metodami klasycznymi. Występują ponadto w dość dużych ilościach, jako odpady podczas produkcji osłon świateł samochodowych. Badania wykonano przy użyciu prototypu elektrostatycznego separatora walcowego mieszanin polimerowych, zbudowanego w Instytucie Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników. Określano charakterystyki eksploatacyjne separatora oraz oszacowano zdolności elektryzowania i rozdziału badanych mieszanin, elektryzowanych fluidyzacyjnie lub mechanicznie.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

Kopolimer akrylonitryl-butadien-styren (ABS) w postaci granulek o średniej masie ok. 27,3 mg, typ Terluran GP-35 (BASF, Niemcy), o gęstości 1,2 g/cm³.

Poli(metakrylan metylu) (PMMA) w postaci granulek o średniej masie ok. 15,3 mg, typ Altuglas HT 121 (ARKE-MA, Włochy), o gęstości 1,19 g/cm³.

Przygotowanie próbek

Przedmiotem badań były próbki dwuskładnikowych mieszanin granulatów ABS i PMMA, o różnej zawartości poszczególnych składników. Skład i symbole badanych mieszanin przedstawiono w tabeli 1. Właściwości tych mieszanin, nie w pełni odpowiadają właściwościom przemysłowych odpadów tworzywowych, złożonych z ABS i PMMA, pozwalają jednak na realizację podstawowego celu, jakim jest określenie możliwości separacji tego typu mieszanin.

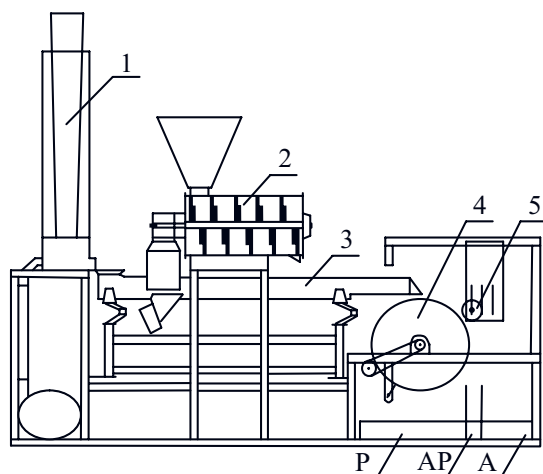
T a b e l a 1. Skład i symbole badanych mieszanin ABS/PMMA
T a b l e 1. Composition and symbols of ABS/PMMA blends

Rodzaj tworzywa	Symbol mieszaniny								
	Zawartość poszczególnych składników mieszaniny, %								
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
ABS	90	80	70	60	50	40	30	20	10
PMMA	10	20	30	40	50	60	70	80	90

Metodyka badań

Separację składników poszczególnych mieszanin prowadzono na prototypowym stanowisku badawczym, wyposażonym w elektrostatyczny separator walcowy (rys. 1), szczegółowo opisany w [16].

Urządzenie to jest wyposażone w dwa tryboelektryzatory (fluidyzacyjny i mechaniczny), z możliwością zamiennej ich stosowania. Porcje mieszanin elektryzowanych fluidyzacyjnie, każda o masie 0,4 kg, wprowadzano do komory tryboelektryzatora fluidyzacyjnego i elektryzowano w ściśle określonym czasie. Następnie wysypywano je do podajnika wibracyjnego, transportującego mieszaniny na powierzchnię uziemionej elektrody walcowej. Porcje mieszanin elektryzowanych mechanicznie, każda o masie 1 kg, wprowadzano natomiast do komory elektryzatora mechanicznego, elektryzowano przy różnych prędkościach obrotowych mieszadła, aż do wyczerpania danej porcji, i w sposób ciągły przekazywano na



Rys. 1. Schemat elektrostatycznego separatora walcowego: 1 – tryboelektryzator fluidyzacyjny, 2 – tryboelektryzator mechaniczny, 3 – podajnik wibracyjny, 4 – uziemiona elektroda walcowa, 5 – eliptyczna elektroda wysokiego napięcia, A – pojemnik frakcji ABS, P – pojemnik frakcji PMMA, AP – pojemnik frakcji nierozdzielonej

Fig. 1. Schematic of cylindrical electrostatic separator: 1 – fluidization tribocharging chamber, 2 – mechanical tribocharging chamber, 3 – vibrating feeder, 4 – grounded cylindrical electrode, 5 – elliptical high voltage electrode, A – container of ABS fraction, P – container of PMMA fraction, AP – container of non-separated fraction

podajnik wibracyjny. Czas elektryzowania tych mieszanin zależał od prędkości obrotowej mieszadła.

Separacja składników poszczególnych mieszanin przebiegała w polu elektrostatycznym przestrzeni międzyelektrodowej, tzn. pomiędzy uziemioną elektrodą walcową a eliptyczną elektrodą wysokiego napięcia. Produkty separacji kierowano do trzech pojemników A, P lub AP, odpowiadających frakcjom: z dominującym udziałem ABS, z dominującym udziałem PMMA oraz nierozdzieloną (tzn. zawierającą nienaektryzowane lub słabo naelektryzowane ABS i PMMA, przy czym udział procentowy obu tych składników we frakcji nierozdzielonej był inny niż w badanej mieszaninie). Podstawą różnicowania ABS i PMMA w badanych frakcjach był różny kolor granulek tych polimerów.

Na podstawie badań wstępnych ustalono trzy stałe wielkości procesu separacji, o wartościach niezmiennych podczas wszystkich pomiarów. Były to: prędkość obrotowa uziemionej elektrody walcowej, wynosząca 30 min^{-1} ; częstotliwość drgań podajnika wibracyjnego o wartości 50 Hz; napięcie stałe eliptycznej elektrody wysokiego napięcia, równe 20 kV.

W badaniach określano:

– Powierzchniowy potencjał elektrostatyczny (U_E) danej mieszaniny bezpośrednio po jej elektryzowaniu, będący pośrednią miarą gęstości elektrostatycznego ładunku powierzchniowego cząstek tej mieszaniny. Pomiar wykonywano za pomocą lokalizatora elektryczności statycznej typu 983v2 (MEECH, Anglia), z odległości 30 mm od powierzchni badanej mieszaniny.

– Czystość frakcji (C_T) danego składnika, uzyskanej w procesie separacji (*purity*):

$$C_T = \frac{m_T}{m_{FT}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

gdzie: T – symbol danego składnika (dalej przyjęto literą A oznaczać ABS, a literą P – PMMA), m_T – masa składnika T znajdującego się we frakcji z dominującym udziałem tego składnika, m_{FT} – masa frakcji z dominującym udziałem składnika T .

– Wydajność odzysku (W_T) danego składnika w procesie separacji (*yield*):

$$W_T = \frac{m_T}{m_{MT}} \cdot 100 \% \quad (2)$$

gdzie: m_{MT} – masa składnika T znajdującego się w mieszaninie poddawanej separacji.

– Udział (F_N) frakcji nierozdzielonej:

$$F_N = \frac{m_N}{M_p} \cdot 100 \% \quad (3)$$

gdzie: m_N – masa frakcji nierozdzielonej, M_p – masa próbki mieszaniny poddawanej separacji (w opisanych badaniach: próbka $M_p = 0,4 \text{ kg}$ – tryboelektryzowana fluidyzacyjnie, a próbka $M_p = 1 \text{ kg}$ – tryboelektryzowana mechanicznie).

Opisane charakterystyki wyznaczano w trzech etapach. Na pierwszym etapie określano wpływ czasu elektryzowania fluidyzacyjnego próbek mieszaniny M5 (tzn. o jednakowej zawartości ABS i PMMA) na wartości U_E ,

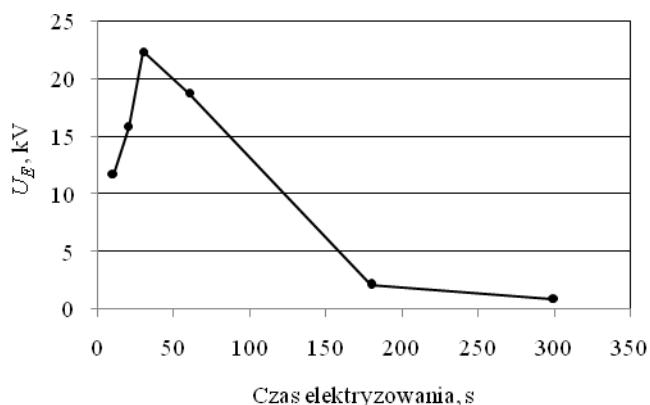
C_A , C_P , W_A , W_P i F_N . Czas elektryzowania próbek wynosił: 10, 20, 30, 60, 180 lub 300 s. Na drugim etapie określano wpływ składu ilościowego mieszanin elektryzowanych fluidyzacyjnie przez 20 s (próbki mieszanin M1–M9) na wartości C_A , C_P , W_A , W_P i F_N , a na etapie trzecim określano wpływ prędkości obrotowej mieszadła tryboelektryzatora mechanicznego na wymienione wielkości. Na podstawie badań wstępnych ustalono zakres zmian prędkości obrotowej mieszadła, wynoszący 50–200 min^{-1} . Maksymalna wartość tej prędkości wynika z ograniczeń konstrukcyjnych układu napędowego mieszadła tryboelektryzatora.

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Wpływ czasu elektryzowania fluidyzacyjnego na wybrane charakterystyki procesu separacji mieszaniny M5, zawierającej jednakowe udziały ABS i PMMA

Zmiany wartości U_E mieszaniny M5 w funkcji czasu elektryzowania fluidyzacyjnego przedstawiono na rys. 2.

W początkowym okresie elektryzowania wartość powierzchniowego potencjału elektrostatycznego, a tym samym i gęstość powierzchniowa ładunku elektrostatycznego elektryzowanej mieszaniny M5, szybko rosną,



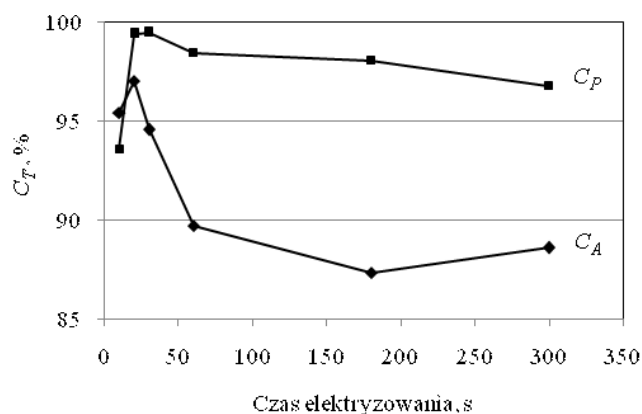
Rys. 2. Wpływ czasu elektryzowania fluidyzacyjnego mieszaniny M5 na wartość powierzchniowego potencjału elektrostatycznego (U_E)

Fig. 2. Effect of tribocharging time using fluidization on the surface potential (U_E) of blend M5

osiągając maksimum $U_E = 22,3$ kV po upływie ok. 30 s elektryzowania. W następnych minutach wartość U_E szybko maleje, po trzech minutach elektryzowania do poziomu 2,1 kV, a po pięciu minutach elektryzowania — do 0,9 kV. Podobne zjawisko zaobserwowano podczas separacji elektrostatycznej mieszaniny polietylenu (PE) i poli(chloroku winylu) (PVC) [11], a także w trakcie fluidyzacyjnego elektryzowania próbek zawierających polimery jednorodne, takie jak: PVC, poliamid (PA) i poli(tere-

ftalan etylenu) (PET) [15]. Zbyt długi czas elektryzowania powoduje, w niektórych cząstkach, nadmierny wzrost ładunków elektrostatycznych o znakach przeciwnych. Cząstki takie, zgodnie z prawem Coulomba, przyciągają się i tworzą aglomeraty, w których następuje kompensacja ładunków elektrostatycznych, co pociąga za sobą zmniejszenie wartości U_E . Inną grupę stanowią cząstki, w których następuje utrata ładunku elektrostatycznego wskutek neutralizacji spowodowanej zbyt długim czasem ich przebywania w elektryzatorze, co także wpływa na zmniejszenie wartości U_E . Jak podkreślają autorzy publikacji [15], zjawisko to może być jednak związane także z bliżej nieznanymi właściwościami powierzchni elektryzowanych polimerów.

Zmiany wartości C_A i C_P mieszaniny M5 w funkcji czasu elektryzowania fluidyzacyjnego przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Wpływ czasu elektryzowania fluidyzacyjnego mieszaniny M5 na czystość frakcji ABS (C_A) i czystość frakcji PMMA (C_P)

Fig. 3. Effect of tribocharging time using fluidization on the purity of ABS and PMMA fractions (C_A and C_P , respectively)

Podczas rozdzielania badanych mieszanin stwierdzono, że cząstki ABS są odchylane przez eliptyczną elektrodę wysokiego napięcia z dużym przyspieszeniem (a_x) i wpadają do pojemnika A. Świadczy to o ich ujemnym naelektryzowaniu. Źródłem przyspieszenia jest pole elektrostatyczne o natężeniu $E \leq 4$ kV/cm, przy czym:

$$a_x = \frac{qE}{m} \quad (4)$$

gdzie: q — ładunek elektrostatyczny cząstki, m — masa cząstki.

Cząstki PMMA przywierają do powierzchni uziemionej elektrody walcowej i są z niej zgarniane za pomocą rakla lub szczotki, następnie wpadają do pojemnika P. Do tego pojemnika wpadają także cząstki PMMA, swobodnie leżące na powierzchni elektrody walcowej (tzn. nie-naelektryzowane) lub przyciągane przez nią z siłą mniejszą niż suma sił odśrodkowej i grawitacyjnej. PMMA w szeregu tryboelektrycznym znajduje się powyżej ABS (tzn. jest usytuowane bliżej dodatniego końca tego szeregu) [22]. Cząstki PMMA podczas tarcia z cząstkami ABS

powinny zatem zyskiwać ładunek dodatni, co zaobserwowaliśmy podczas naszych badań.

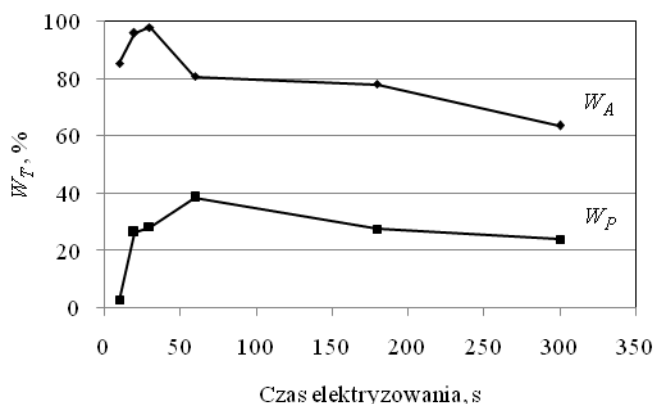
Przebiegi zmian wartości C_A i C_P w zależności od czasu elektryzowania mieszaniny M5 są różne. W obu przypadkach jednak ich wartości maksymalne ($C_A = 97\%$, $C_P = 99,4\%$) występują po ok. 20 s elektryzowania, a więc w czasie zbliżonym do czasu elektryzowania, w którym zaobserwowano maksimum wartości U_E (por. rys. 2). Wraz z wydłużaniem się czasu elektryzowania, zmniejsza się czystość frakcji ABS i po pięciu minutach elektryzowania wynosi ona ok. 88 % mas., czystość frakcji PMMA natomiast maleje w stopniu znacznie mniejszym i po pięciu minutach osiąga wartość ok. 97 % mas.

Zmniejszanie się wartości C_A i C_P w miarę upływu czasu elektryzowania mieszaniny M5 jest związane ze spadkiem wartości U_E tej mieszaniny. Przyczyną odmiennych przebiegów zmian czystości frakcji ABS i PMMA mogą być natomiast różnice w zmianach gęstości powierzchniowej ładunków elektrostatycznych, znajdujących się na powierzchniach cząstek tych tworzyw. Wynikają one z różnic w budowie tych polimerów, a tym samym, różnych podatności na gromadzenie ładunków elektrostatycznych powstających pod wpływem tarcia.

Wpływ czasu elektryzowania fluidyzacyjnego mieszaniny M5 na wartości W_A i W_P obrazuje rys. 4.

Początkowo, przez pierwsze 30 s — ABS i 60 s — PMMA, wydajność odzysku każdego z tych tworzyw rosła do poziomu wynoszącego, odpowiednio, 97,9 i 38,3 % mas., po czym następował spadek wartości W_T do, odpowiednio, 63,5 i 24 % mas. po pięciu minutach elektryzowania. W ciągu całego zastosowanego czasu elektryzowania, wydajność odzysku ABS była ponad dwukrotnie większa niż wydajność odzysku PMMA.

Cechą charakterystyczną krzywych przedstawionych na rys. 4, zwłaszcza w zakresie wzrostu, jest ich ogólne podobieństwo do krzywej przedstawionej na rys. 2. Wiąże się to z tym, że zmiany gęstości powierzchniowej

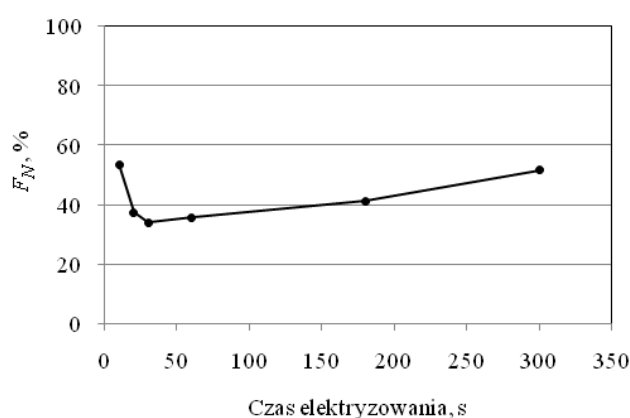


Rys. 4. Wpływ czasu elektryzowania fluidyzacyjnego mieszaniny M5 na wydajność odzysku ABS (W_A) i na wydajność odzysku PMMA (W_P)

Fig. 4. Effect of tribocharging time using fluidization of blend M5 on the yield recovery of the ABS and PMMA (W_A and W_P , respectively)

ładunku elektrostatycznego cząstek mieszaniny M5 w istotnym stopniu wpływają na wydajność odzysku ABS i PMMA. Zmiany te są także zależne od różnego stopnia naelektryzowania (różne wartości bezwzględne ładunków elektrostatycznych) cząstek każdego z tych polimerów. Przyczyną znacznych różnic w wartościach odzysku ABS i PMMA może być natomiast większy stopień naelektryzowania cząstek ABS, o czym świadczy duże ich przyspieszenie pod wpływem pola elektrostatycznego i mały udział we frakcji nierozdzielonej (tzn. w pojemniku AP).

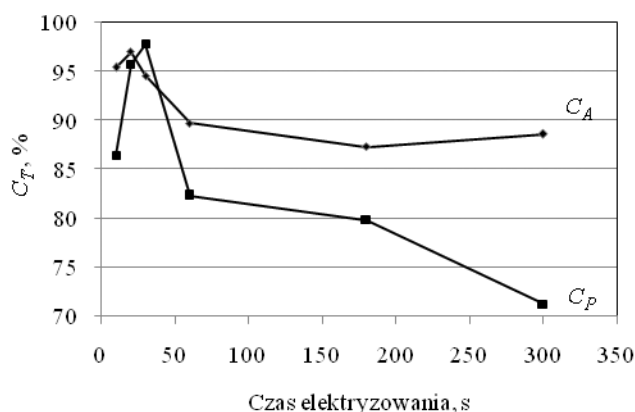
Wpływ czasu elektryzowania fluidyzacyjnego mieszaniny M5 na udział frakcji nierozdzielonej ilustruje krzywa na rys. 5.



Rys. 5. Wpływ czasu elektryzowania fluidyzacyjnego mieszaniny M5 na udział frakcji nierozdzielonej (F_N)

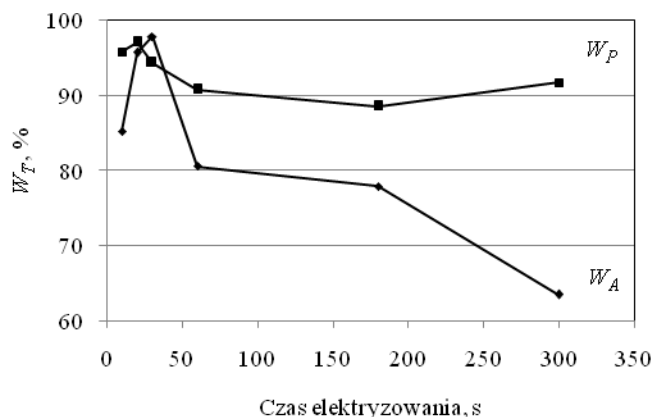
Fig. 5. Effect of tribocharging time using fluidization of blend M5 on the content of non-separated fraction (F_N)

Przebieg zmian wartości F_N w czasie elektryzowania ma inny charakter niż przebiegi przedstawione na rys. 2–4. W pierwszej fazie elektryzowania (tzn. przez ok. 30 s) wartość F_N szybko maleje (od 53,5 do 33,9 % mas.), po czym rośnie, w przybliżeniu wprost proporcjonalnie do długości czasu elektryzowania, osiągając po pięciu minutach wartość 51,6 % mas. Analizując ten przebieg, należy także uwzględnić skład frakcji nierozdzielonej, w której dominują cząstki PMMA, stanowiące od 66,2 do 97,1 % mas. Tak duży udział PMMA w pojemniku AP (rys. 1) wynika ze zbyt małej siły przywierania cząstek tego polimeru do powierzchni uziemionej elektrody walcowej, zależnej od działającej na te cząstki siły odśrodkowej, której źródłem jest ruch obrotowy wspomnianej elektrody. Zmniejszenie siły odśrodkowej wymagałoby ograniczenia prędkości wirowania elektrody walcowej, co z kolei powodowałoby spadek wydajności procesu separacji. Z tego względu interesujące jest kształtowanie się omawianych wyżej wielkości w przypadku połączenia frakcji nierozdzielonej i frakcji PMMA, eliminującego z rozważań frakcję nierozdzieloną. Wyniki tej analizy przedstawiono na rys. 6 i 7.



Rys. 6. Wpływ czasu elektryzowania fluidyzacyjnego mieszaniny M5 na czystość frakcji ABS (C_A) oraz na czystość frakcji PMMA (C_P), złożonej z zawartości pojemników P i AP

Fig. 6. Effect of tribocharging time using fluidization of blend M5 on the purity of ABS fraction (C_A) and PMMA fraction (C_P) composed of the contents of P and AP containers



Rys. 7. Wpływ czasu elektryzowania fluidyzacyjnego mieszaniny M5 na wydajność odzysku ABS (W_A) oraz na wydajność odzysku PMMA (W_P), zawartego w pojemnikach P i AP

Fig. 7. Effect of tribocharging time using fluidization of blend M5 on the yield recovery of ABS (W_A) and PMMA (W_P) enclosed in P and AP containers

Można zauważyć wyraźną zależność badanych wielkości od czasu elektryzowania. W zastosowanych warunkach procesu separacji mieszaniny M5 można uzyskać frakcję ABS o dużej czystości (97 % mas.) i frakcję PMMA o bardzo dużej czystości (99,4 % mas.). Wydajność (95,7 % mas.) odzysku frakcji ABS jest zadowalająca, podczas gdy wydajność (28,2 % mas.) odzysku frakcji PMMA jest niewystarczająca. Także udział frakcji nierozdzielonej (37 % mas.) jest znaczny, głównie wskutek zbyt dużej zawartości PMMA. Frakcję nierozdzieloną należy zatem poddać procesowi kolejnej separacji. Jeżeli jednak ze względu na dalsze zastosowania, frakcja PMMA może mieć mniejszą czystość (ok. 95,7 % mas.), to wówczas połączenie frakcji nierozdzielonej z frakcją PMMA pozwala zachować czystość ABS na niezmiennym poziomie (97 % mas.), a wydajności odzysku ABS i PMMA —

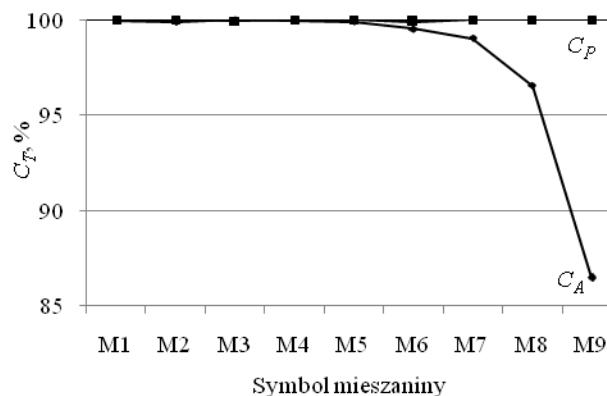
na poziomie, odpowiednio, 95,7 i 97 % mas., co jest wynikiem bardzo dobrym.

Z przyjęcia maksymalnych wartości C_A i C_P jako nadrzędnego kryterium doboru czasu elektryzowania fluidyzacyjnego, wynika że czas ten powinien wynosić 20 s.

Wpływ składu mieszanin ABS/PMMA na wybrane charakterystyki procesu separacji

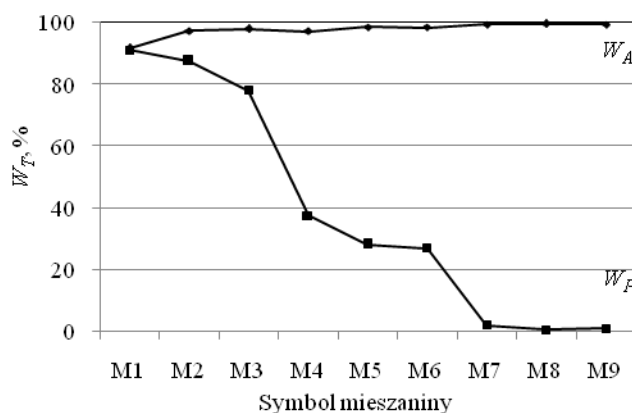
Wpływ składu mieszanin M1–M9 elektryzowanych fluidyzacyjnie na wartości C_A i C_P przedstawiają krzywe na rys. 8.

Czystość frakcji ABS i frakcji PMMA nie zależy od udziału poszczególnych polimerów w mieszaninach M1–M5. Obserwowane wartości C_A i C_P zawierające się w przedziale 99,9–100 % mas., są bardzo duże. Nato-



Rys. 8. Wpływ składu mieszanin M1–M9 elektryzowanych fluidyzacyjnie na czystość frakcji ABS (C_A) i czystość frakcji PMMA (C_P)

Fig. 8. Effect of composition of blends M1–M9 tribocharged using fluidization on the purity of ABS (C_A) and PMMA (C_P) fractions



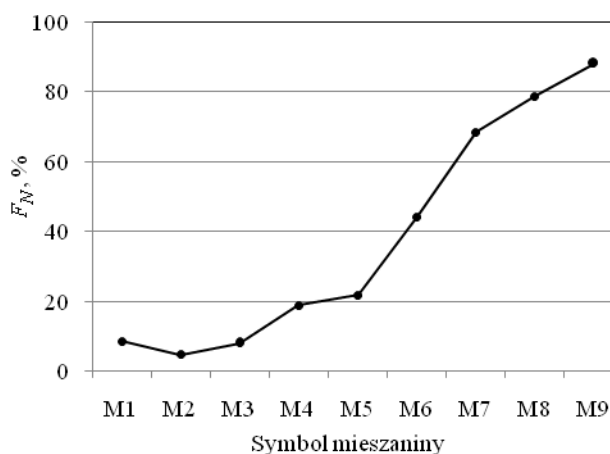
Rys. 9. Wpływ składu mieszanin M1–M9 elektryzowanych fluidyzacyjnie na wydajność odzysku ABS (W_A) i na wydajność odzysku PMMA (W_P)

Fig. 9. Effect of composition of blends M1–M9 tribocharged using fluidization on the yield recovery of ABS (W_A) and PMMA (W_P)

miast czystość frakcji ABS, wydzielonych z mieszanin M6–M9, maleje wraz ze zmniejszaniem udziału ABS w tych mieszaninach i wynosi, odpowiednio, 99,5; 99,0; 96,5 i 86,5 % mas., podczas gdy czystość PMMA nie ulega zmianie i nadal wynosi 99,9–100 % mas.

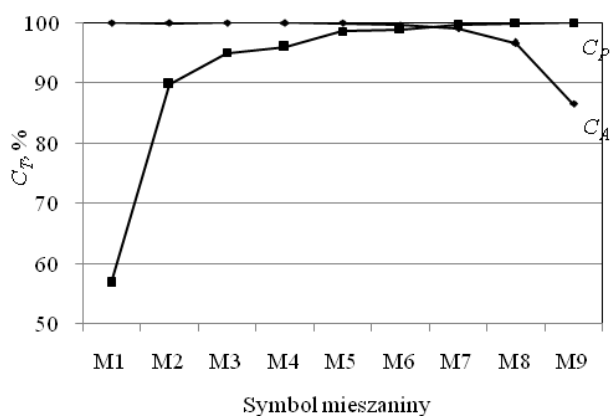
Wyniki badań wpływu składu mieszanin M1–M9 elektryzowanych fluidyzacyjnie na wartości W_A i W_P przedstawiono na rys. 9.

Z rys. 9 wynika, że wraz ze zmniejszaniem zawartości ABS w mieszaninach M1–M9 wzrasta (od 91,6 do 99,5 % mas.) wydajność odzysku (W_T) tego polimeru. Natomiast wraz ze zwiększaniem udziału PMMA wydajność odzysku tego polimeru drastycznie maleje – w mieszaninie M4 wynosi mniej niż 38 % mas., a w mieszaninach M7–M9 – mniej niż 2 % mas.



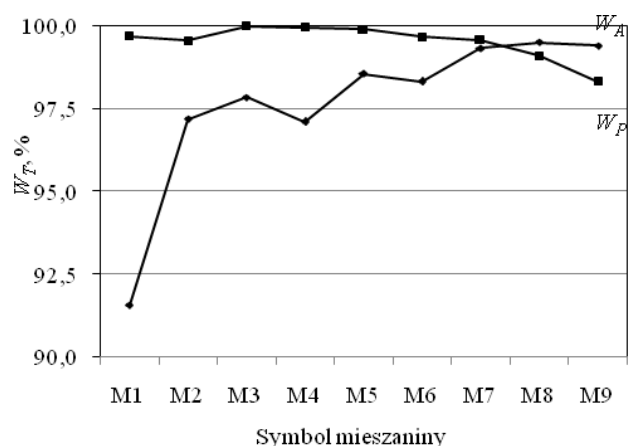
Rys. 10. Wpływ składu mieszanin M1–M9 elektryzowanych fluidyzacyjnie na udział frakcji nierozdzielonej (F_N)

Fig. 10. Effect of composition of blends M1–M9 tribocharged using fluidization on the content of non-separated fraction (F_N)



Rys. 11. Wpływ składu mieszanin M1–M9 elektryzowanych fluidyzacyjnie na czystość frakcji ABS (C_A) oraz na czystość frakcji PMMA (C_P) złożonej z zawartości pojemników P i AP

Fig. 11. Effect of composition of blends M1–M9 tribocharged using fluidization on the purity of ABS fraction (C_A) and PMMA fraction (C_P) composed of P and AP contents



Rys. 12. Wpływ składu mieszanin M1–M9 elektryzowanych fluidyzacyjnie na wydajność odzysku ABS (W_A) oraz na wydajność odzysku PMMA (W_P) zawartego w pojemnikach P i AP

Fig. 12. Effect of composition of blends M1–M9 tribocharged using fluidization on the yield recovery of ABS (W_A) and PMMA (W_P) enclosed in P and AP containers

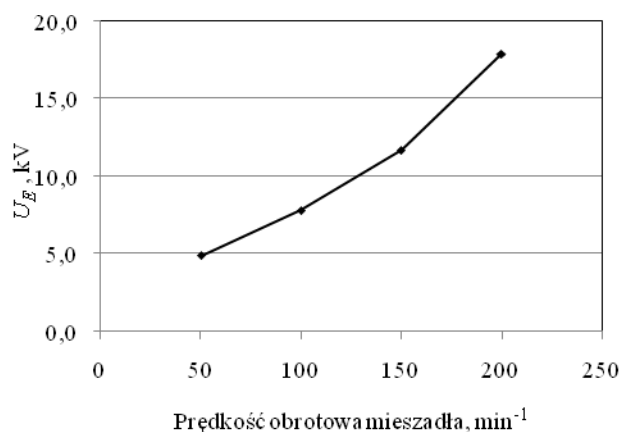
Zwiększanie zawartości PMMA w mieszaninach M1–M9 wpływa na szybki wzrost udziału frakcji nierozdzielonej (F_N , rys. 10). Podczas rozdzielania mieszaniny M5 wartość F_N wynosi ponad 20 % mas., podczas gdy w przypadku mieszaniny M9 przekracza już 88 % mas. Tak duży udział frakcji nierozdzielonej jest niekorzystny, ponieważ zmniejsza efektywność procesu separacji. Podobnie jak poprzednio, we frakcji nierozdzielonej dominują cząstki PMMA, przedstawiono zatem wyniki analizy połączenia frakcji nierozdzielonej i frakcji PMMA (rys. 11 i 12).

Przyjmując dolną granicę czystości frakcji ABS i PMMA na poziomie 95 % mas., co jest spełnione w przypadku mieszanin M3–M8, można stwierdzić, że wydajności odzysku ABS i PMMA są większe niż 97 % mas. Aby uzyskać podobne rezultaty podczas rozdzielania mieszanin M1, M2 i M9, należy je poddać ponownej separacji.

Wpływ prędkości obrotowej mieszadła elektryzatora mechanicznego na wybrane charakterystyki procesu separacji

Wpływ prędkości obrotowej mieszadła tryboelektryzatora mechanicznego na wartość U_E mieszaniny M5 przedstawia krzywa na rys. 13.

Zwiększanie prędkości obrotowej mieszadła powoduje wzrost monotoniczny wartości U_E mieszaniny M5, a przebieg krzywej jest podobny do przebiegu wzrostu gęstości powierzchniowej ładunku elektrostatycznego cząstek tej mieszaniny. Obserwowany przebieg można, w badanym przedziale zmian prędkości obrotowej mieszadła, aproksymować z bardzo dużą dokładnością za pomocą równania drugiego stopnia. Zwiększanie intensywności mieszania sprzyja zatem przepływowi elektronów i/lub jonów między cząstkami mieszaniny M5, a tak-



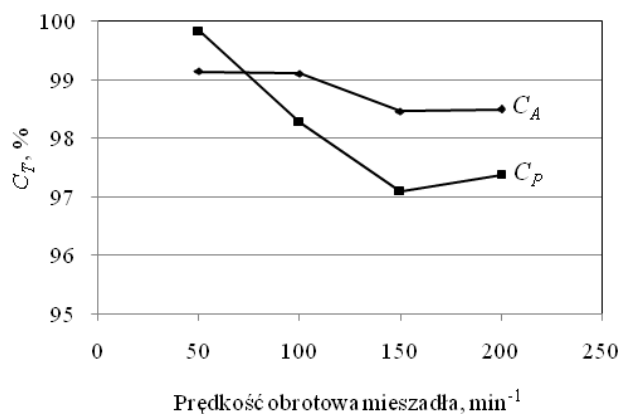
Rys. 13. Wpływ prędkości obrotowej mieszadła tryboelektryzatora mechanicznego na wartość powierzchniowego potencjału elektrostatycznego (U_E) mieszaniny M5

Fig. 13. Effect of the stirrer rotating speed of the mechanical tribocharging chamber on the surface potential (U_E) of blend M5

że między tymi cząstkami i mieszadłem oraz ścianką elektryzatora.

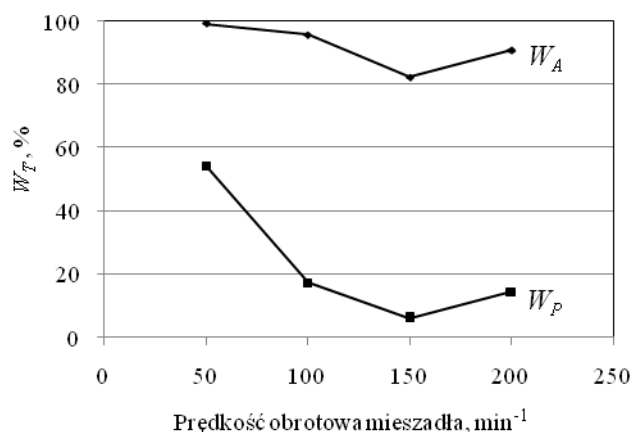
Porównując przebiegi wartości U_E mieszaniny M5, uzyskane w obu elektryzatorach (rys. 2 i 13), można zauważyć, że mają one odmienny charakter. W elektryzatorze fluidyzacyjnym wartość maksymalną U_E , wynoszącą ok. 22,4 kV, uzyskuje się już po 30 s elektryzowania. Jest ona większa o ponad 24 % od wartości maksymalnej U_E uzyskanej w elektryzatorze mechanicznym, a wynoszącej ok. 18 kV. Ponadto, w tryboelektryzatorze mechanicznym wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej mieszadła wartość U_E monotonicznie rośnie, pomimo odpowiednio krótszego czasu elektryzowania.

Zmiany wartości C_A i C_P mieszaniny M5 w funkcji prędkości obrotowej mieszadła tryboelektryzatora mechanicznego przedstawia rys. 14.



Rys. 14. Wpływ prędkości obrotowej mieszadła tryboelektryzatora mechanicznego na czystość frakcji ABS (C_A) i czystość frakcji PMMA (C_P), wydzielonych z mieszaniny M5

Fig. 14. Effect of the stirrer rotating speed of the mechanical tribocharging chamber on the purity of ABS and PMMA fractions (C_A and C_P , respectively) separated from blend M5



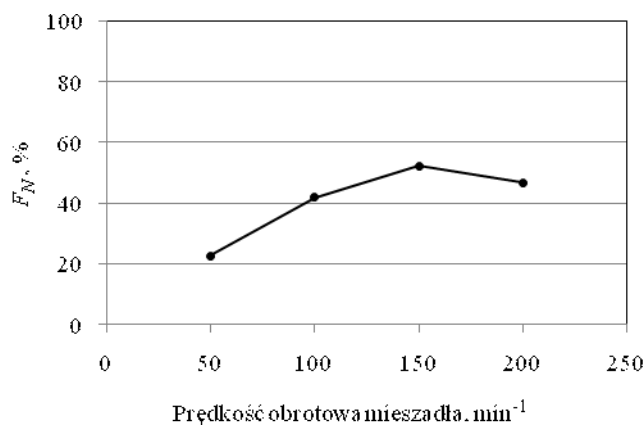
Rys. 15. Wpływ prędkości obrotowej mieszadła tryboelektryzatora mechanicznego na wydajność odzysku ABS (W_A) i na wydajność odzysku PMMA (W_P), wydzielonych z mieszaniny M5

Fig. 15. Effect of the stirrer rotating speed of the mechanical tribocharging chamber on the yield recovery of ABS and PMMA (W_A and W_P , respectively) separated from blend M5

Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej mieszadła, czystość obu frakcji maleje, w całym zakresie zmian tej prędkości utrzymuje się ona jednak na poziomie wyższym niż 97 % mas., co jest wartością wystarczającą dla wielu zastosowań przemysłowych.

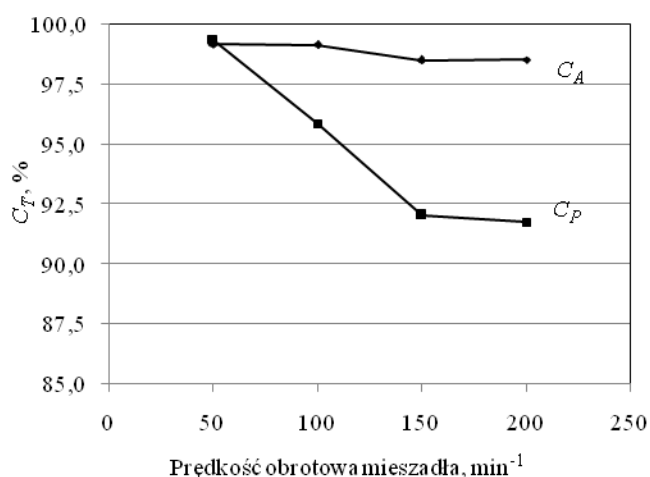
Wpływ prędkości obrotowej mieszadła tryboelektryzatora mechanicznego na wartości W_A i W_P mieszaniny M5 przedstawia rys. 15, a wpływ na udział (F_N) frakcji nierozdzielonej — rys. 16.

Uzyskane wyniki nie są satysfakcjonujące, wydajność odzysku frakcji PMMA jest zbyt mała, a pozostałość frakcji nierozdzielonej zbyt duża, w skrajnym przypadku stanowi ponad 52 % mas. mieszaniny M5. Podobnie, jak w wyżej analizowanych przypadkach, dominującą część tej



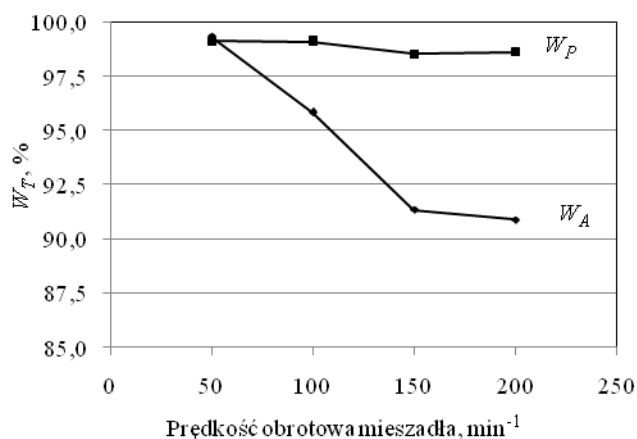
Rys. 16. Wpływ prędkości obrotowej mieszadła tryboelektryzatora mechanicznego na udział frakcji nierozdzielonej (F_N), wydzielonej z mieszaniny M5

Fig. 16. Effect of the stirrer rotating speed of the mechanical tribocharging chamber on the content of non-separated fraction (F_N) obtained from blend M5



Rys. 17. Wpływ prędkości obrotowej mieszadła tryboelektryzatora mechanicznego na czystość frakcji ABS (C_A) oraz na czystość frakcji PMMA (C_P) złożonej z zawartości pojemników P i AP, wydzielonych z mieszaniny M5

Fig. 17. Effect of the stirrer rotating speed of the mechanical tribocharging chamber on the purity of ABS fraction (C_A) and PMMA fraction (C_P) composed of P and AP contents, separated from blend M5



Rys. 18. Wpływ prędkości obrotowej mieszadła tryboelektryzatora mechanicznego na wydajność odzysku ABS (W_A) oraz na wydajność odzysku PMMA (W_P) zawartego w pojemnikach P i AP, wydzielonych z mieszaniny M5

Fig. 18. Effect of the stirrer rotating speed of the mechanical tribocharging chamber on the yield recovery of ABS (W_A) and PMMA (W_P) enclosed in P and AP containers, separated from blend M5

frakcji stanowi PMMA. Implikuje to konieczność przeprowadzenia analizy efektów procesu separacji w przypadku połączenia frakcji nierozdzielonej i frakcji PMMA. Wyniki tej analizy przedstawiają rys. 17 i 18.

Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej mieszadła tryboelektryzatora mechanicznego maleją czystość frakcji ABS i PMMA oraz wydajność odzysku każdego z tych polimerów, przy czym zmiany wartości C_A i W_P maleją w mniejszym stopniu (odpowiednio: z 99,1 do 98,5 % mas. i z 99,1 do 98,6 % mas.) niż wartości C_P i W_A (odpowiednio: z 99,3 do 91,7 % mas. i z 99,3 do 90,9 % mas.). Przy pręd-

kości obrotowej mieszadła równej 50 min⁻¹, wszystkie badane wielkości przybierają wartości powyżej 99 % mas., natomiast po zwiększeniu tej prędkości do 100 min⁻¹, wartości C_P i W_A zmniejszają się do poziomu 95,8 % mas. Najlepsze efekty separacji elektrostatycznej uzyskuje się przy najmniejszej ze stosowanych prędkości obrotowej mieszadła tryboelektryzatora mechanicznego. Charakterystyczne jest to, że są one osiągane przy znacznie mniejszych wartościach U_E niż podczas stosowania tryboelektryzatora fluidyzacyjnego.

PODSUMOWANIE

W procesie separacji elektrostatycznej mieszanin granulatu ABS i PMMA, podstawowe operacje obejmują elektryzowanie oraz rozdzielanie tych mieszanin w polu elektrostatycznym na poszczególne frakcje. Efekty elektryzowania fluidyzacyjnego w ustalonych warunkach termodynamicznych (są to przede wszystkim: stała temperatura i wilgotność powietrza fluidyzacyjnego oraz powietrza, w którym jest prowadzony proces separacji, stała temperatura i wilgotność granulatu oraz stałe natężenie przepływu strumienia powietrza fluidyzacyjnego) zależą od czasu elektryzowania, natomiast efekty elektryzowania mechanicznego zależą od prędkości obrotowej mieszadła.

W początkowej fazie elektryzowania fluidyzacyjnego wartość powierzchniowego potencjału elektrostatycznego, a tym samym gęstość powierzchniowa ładunku elektrostatycznego, mieszaniny zawierającej takie same udziały masowe ABS i PMMA, szybko rosną. Maksimum tego potencjału — 22,3 kV — uzyskuje się po ok. 20 s elektryzowania, po czym jego wartość szybko maleje. Natomiast w całym badanym zakresie zmian prędkości obrotowej mieszadła elektryzatora mechanicznego, powierzchniowy potencjał elektrostatyczny mieszaniny elektryzowanej rośnie, osiągając wartość około 18 kV.

Czystość i wydajność odzysku poszczególnych frakcji polimerowych, wydzielonych z mieszanin elektryzowanych fluidyzacyjnie w ciągu 20 s, zależą od udziału masowego każdego ze składników w mieszaninie. Zmiany tego udziału powodują zmiany warunków elektryzowania, co z kolei implikuje zmiany gęstości powierzchniowego ładunku elektrostatycznego, mającego podstawowy wpływ na przebieg elektrostatycznego rozdzielania. Rezygnując z wyodrębniania frakcji nierozdzielonej (ponieważ zawiera ona głównie PMMA), w procesie separacji jednostopniowej mieszanin zawierających od 20 do 80 % mas. ABS (lub PMMA), można uzyskać czystość frakcji każdego ze składników na poziomie powyżej 95 % mas., przy wydajności odzysku powyżej 97 % mas. Osiągnięcie większej czystości i wydajności odzysku wymaga przeprowadzenia procesu separacji wielostopniowej. Możliwe przy tym jest uzyskanie czystości frakcji każdego z tych polimerów większej niż 99 % mas., co świadczy o dużej sprawności separacji elektrostatycznej. Natomiast stosując tryboelektryzator mechaniczny moż-

na uzyskać poszczególne frakcje o czystości 89 % mas. z wydajnością odzysku ABS i PMMA przekraczającą 99 % mas.

Przedstawione wyniki badań świadczą o ogólnej poprawności rozwiązań konstrukcyjnych prototypowego separatora. Potwierdzają także, wstępnie, duże możliwości procesu elektrostatycznej separacji mieszanin polimerowych. Bliższe poznanie tego procesu wymaga jednak jeszcze wielu badań o charakterze podstawowym i aplikacyjnym, a także doskonalenia konstrukcji separatora.

Nasze kolejne prace będą obejmować przystosowanie konstrukcji separatora do eksploatacji w warunkach przemysłowych oraz opracowanie i wdrożenie odpowiednich technologii rozdziału odpadów tworzywowych, występujących w postaci mieszanin różnych materiałów polimerowych. Są to zadania trudne, gdyż czystość i wydajność procesów separacji zależą w bardzo dużym stopniu od sposobów i warunków przygotowania odpadów oraz od wielu zmiennych procesowych.

LITERATURA

- [1] Żakowska H.: *Polimery* **2012**, 57, 613, DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2012.613
- [2] Błędzki A.K., Gorący K., Urbaniak M.: *Polimery* **2012**, 57, 620, DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2012.620
- [3] „Recykling tworzyw sztucznych w Europie” (red. Kozłowski M.), Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.
- [4] Al-Salem S.M., Lettieri P., Baeyens J.: *Waste Manag.* **2009**, 29, 2625, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004
- [5] Kijeński J., Błędzki A.K., Jeziórska R.: „Odzysk i recykling materiałów polimerowych”, PWN, Warszawa 2011.
- [6] Coleman M.M., Graf R.F., Painter P.C.: „Specific Interaction and the Miscibility of Polymer Blends”, Technomic Publ., Lancaster 1991.
- [7] „Handbook of Plastics Recycling” (red. La Mantia F.), Rapra Technology Ltd., Shawbury 2002.
- [8] Harper W.R.: „Contact and Frictional Electrification”, Laplacian Press, Morgan Hill 1998.
- [9] Cross J.: „Electrostatics: Principles, Problems and Applications”, Adam Hilger, Bristol 1987.
- [10] Sadiku M.N.O.: „Elements of Electromagnetics 3E”, Oxford University Press, Oxford 2001.
- [11] Tilmatine A., Bendimerad S.: *Front. Electr. Electron. Eng. China* **2009**, 4, 446, DOI: dx.doi.org/10.1007/s11460-009-0062-6
- [12] Higashiyama Y., Ujiiie Y., Asano K.: *J. Electrostat.* **1997**, 42, 63, DOI: dx.doi.org/10.1016/S0304-3886(97)00131-9
- [13] Lee J.-K., Shin J.-H., Hwang Y.-J.: *KSME Internat. J.* **2002**, 16, 1336.
- [14] Iuga A., Calin L., Neamtu V., Mihalcioiu A., Dascalescu L.: *J. Electrostat.* **2005**, 63, 937, DOI: dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2005.03.064
- [15] Németh E., Albrecht V., Schubert G., Simon F.: *J. Electrostat.* **2003**, 58, 3, DOI: dx.doi.org/10.1016/S0304-3886(02)00137-7
- [16] Żenkiewicz M., Żuk T., Błaszowski M., Szumski Z.: *Przem. Chem.* **2013**, 92, 279.
- [17] *Pat. EP* 1 777 013 (2007).
- [18] *Pat. US* 2009/0 194 461.
- [19] *Pat. DE* 10 140 241 (2002).
- [20] Żenkiewicz M., Żuk T.: *Polimery* **2014**, 59, 314, DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2014.314
- [21] www.hamos.com
- [22] Brück R.: *Kunststoffe* **1981**, 71, 234.

Otrzymano 12 III 2013 r.

Instytut Chemii Przemysłowej im. prof. I. Mościckiego w Warszawie

opracował ogólnokrajową

BAZĘ APARATURY DO OKREŚLANIA CHARAKTERYSTYKI I PRZETWÓRSTWA POLIMERÓW

będącej w posiadaniu uczelni, instytutów PAN i instytutów badawczych.

Baza jest wyposażona w funkcje umożliwiające wyszukiwanie wg zadanych parametrów: nazwy, typu lub modelu aparatu, roku produkcji, producenta, charakterystyki parametrów technicznych, zastosowania do badań, lokalizacji, słów kluczowych, sposobu wykonywania badań, numerów norm, wg których prowadzi się badania, oraz adresu i kontaktu z osobą odpowiedzialną za dany aparat. Baza jest ciągle uaktualniana.

Dostęp do danych i wyszukiwanie informacji w bazie jest bezpłatne.

Instytucje i firmy zainteresowane zamieszczeniem w bazie informacji o posiadanej aparaturze prosimy o przesłanie danych na adres polimery@ichp.pl

aparaturapolimery.ichp.pl