

# Poprawa efektywności procesów recyklingu mechanicznego termoplastów o strukturze porowatej

Dariusz Sykutera<sup>1), \*)</sup>, Marek Bieliński<sup>1)</sup>

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2019.11.8](https://dx.doi.org/10.14314/polimery.2019.11.8)

**Streszczenie:** Przedstawiono uwarunkowania techniczne związane z realizacją procesów składowych recyklingu mechanicznego porowatych tworzyw termoplastycznych. Wskazano na istotny wpływ rodzaju i postaci odpadów porowatych na efektywność przebiegu procesów cięcia, rozdrabniania, dozowania, a także wtórnego przetwórstwa wtryskowego. Wykazano, że odpowiedni dobór warunków technicznych umożliwia wytworzenie wyprasek wtórnych z pominięciem fazy docisku i etapu regranulowania recyklatów.

**Słowa kluczowe:** termoplasty porowate, cięcie, rozdrabnianie, recykling mechaniczny, wtórne wtryskiwanie.

## Improving the effectiveness of the mechanical recycling processes of thermoplastics with a porous structure

**Abstract:** The paper presents technical conditions related to the implementation of component processes of mechanical recycling of thermoplastic materials with a porous structure. Significant influence of the type and form of porous waste on the efficiency of the processes of their cutting, grinding, dosing and also of secondary injection molding process was indicated. It has been shown that by appropriate selection of technical conditions, it is possible to produce molding parts, without the use the holding phase in the secondary injection molding and with complete elimination re-extrusion process.

**Keywords:** porous thermoplastics, cutting, grinding, mechanical recycling, secondary injection molding.

Proces recyklingu mechanicznego tworzyw polimerowych pod względem technicznym jest dobrze rozpoznany zarówno w obszarze segregacji i czyszczenia odpadów [1–3], jak i cięcia [4–7], rozdrabniania [7–12] oraz regranulacji i wtórnych procesów przetwórczych [7, 13]. Tworzywa termoplastyczne są materiałem nadającym się do dalszego przetwórstwa z zastosowaniem wszystkich standardowych technologii (wyłaczania, wtryskiwania, itp.), możliwe też jest ponowne wykorzystanie wytworów z tworzyw wtórnych, często w bardzo innowacyjnych produktach kompozytowych, stanowiących połączenie materiałów pierwotnych i wtórnych. Procesy składowe recyklingu mechanicznego są badane i analizowane w literaturze od ponad 40 lat [1, 2, 6, 8, 9]. Rozwój istniejących technologii i poszukiwanie nowych sposobów ponownego wykorzystania polimerowych tworzyw wtórnych jako pełnowartościowego materiału wtórnego, jest konsekwencją ciągłego wzrostu masy produkowanych i przetwarzanych tworzyw polimerowych, a także

coraz bardziej zaawansowanych konstrukcyjnie i złożonych strukturalnie wytworów, w tym również porowatych [13–21]. Konieczne jest więc ciągłe doskonalenie technologii, konstrukcji maszyn i instalacji do odzyskiwania potencjału materiałowego tkwiącego w przeznaczonych do recyklingu tworzywach. Wykazano, że polimerowe materiały porowate, po etapie użytkowania, z powodzeniem można poddawać procesom recyklingu mechanicznego, pozwalającego na ich powtórne wykorzystanie. Stwierdzono, że w wypadku recyklingu tworzyw porowanych chemicznie, proces przetwórstwa wtórnego uaktywnia cząstki poroforów, które nie uległy rozkładowi z wydzieleniem gazu w procesie pierwotnym. Tworzywa porowate ze względu na specyficzne właściwości użytkowe, często dużą elastyczność, wykazują mniejszą podatność na procesy rozdrabniania [7, 13]. Stwierdzono jednak, że odpowiednie ustawienie na wirniku i w obudowie młyna noży tnących o specjalnej geometrii, pozwala na efektywne rozdrobienie materiału porowatego, głównie w wyniku ścinania [7]. Dostosowanie parametrów cięcia i rozdrabniania do specyfiki materiału pozwala na uzyskanie recyklatów wykazujących cechy geometryczne korzystne pod względem zwiększenia efektywności dozowania i mieszania we wtórnych procesach przetwórczych [7]. Dozowanie

<sup>1)</sup> Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Inżynierii Materiałowej i Przetwórstwa Tworzyw, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz.

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji; e-mail: [sykutera@utp.edu.pl](mailto:sykutera@utp.edu.pl)

recyklatów jest związane w sposób funkcjonalny z doprowadzaniem i mieszaniem materiałów polimerowych [22–25]. Metodę badań urządzeń o charakterystyce objętościowej dozowania oraz wytyczne dotyczące doboru cech geometrycznych ślimaków i tulei, wyczerpująco opisano we wcześniejszej publikacji własnej [22]. Dozowanie recyklatów tworzyw porowatych ze względu na ich małą gęstość, podobnie jak w wypadku cięcia i rozdrabniania, wymaga lepszego poznania, przy czym w optymalizacji procesu dąży się do ustalenia warunków umożliwiających wyeliminowanie etapu wytłaczania granulującego. Proces ten wymaga dodatkowego uplastycznienia recyklatów, co zwiększa całkowite koszty wytworzenia tworzywa wtórnego, może także prowadzić do destrukcji termicznej jego struktury. Charakterystyka granulometryczna materiałów polimerowych stosowanych w przetwórstwie, szczególnie tworzyw wtórnych, uwzględnia wyznaczenie wymiarów cząstek, gęstości, masy usypowej i utrzęsionej, a także trwałości granulatów, zwłaszcza wysoko napełnionych. Świadome operowanie tymi czynnikami prowadzi do wzrostu efektywności realizowanego procesu wykorzystania odpadów polimerowych.

## CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

### Materiały

Badania procesów recyklingu tworzyw porowatych zrealizowano z zastosowaniem trzech rodzajów tworzyw termoplastycznych przeznaczonych do wytłaczania: polietylenu małej gęstości Malen FABS 23002 (Basell), polipropylenu Moplen HP 456J (Basell) oraz polistyrenu Krasten 552 9002 (Synthos). W badaniach wytłaczania z jednoczesnym porowaniem użyto środka porotwórczego Expancel 980 MBX 120 (Akzo Nobel), wybranego na podstawie wyników badań wstępnych. Kryterium decydującym o wyborze rodzaju poroforu chemicznego był stopień, w jakim redukował on gęstość uzyskiwanych wytłocznin. W wypadku wszystkich stosowanych materiałów koncentrat poroforu dozowano w ilości 1, 2 i 4% mas.

### Procesy recyklingu

Wybrane materiały wytłaczano przy użyciu wytłaczarki laboratoryjnej W-25 (Metalchem), wyposażonej w trójstrefową głowicę wytłaczarską o przekroju ustnika  $13,5 \times 7,5$  mm, z niezależnym pomiarem temperatury i ciśnienia w dwóch strefach. Proces wytłaczania polistyrenu realizowano w następujących warunkach: temperatura w układzie uplastyczniania wytłaczarki: strefa I – 145 °C, strefa II – 215 °C, strefa III – 215 °C; temperatura w głowicy wytłaczarskiej: strefa I – 140 °C, strefa II – 140 °C; prędkość obrotowa ślimaka  $n_s = 85$  obr./min. Parametry charakterystyczne procesu wytłaczania tworzyw PELD i PP przedstawiono w [7]. W badaniach wykorzystano także

profile wytłaczane wykonane z polistyrenu porowanego fizycznie (XPS) o gęstości  $77,3 \pm 2,0$  kg/m<sup>3</sup>.

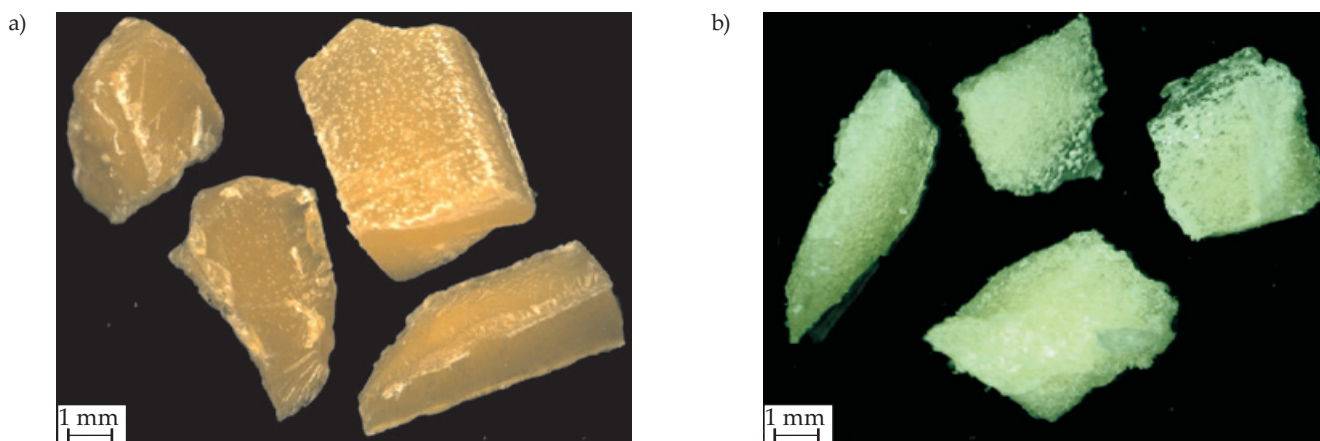
Badania cięcia i rozdrabniania realizowano na oryginalnym stanowisku badawczym [7]. Dezintegracja materiałów porowatych następowała w wyniku ich cięcia między krawędziami tnącymi noży tnących, przy czym kąt ostrza noży ruchomych  $\beta_r$  wynosił 60° i 30°, a kąt noży nieruchomych  $\beta_s = 60^\circ$ . Pochylenie noży tnących względem osi wirnika ( $2\lambda$ ) ustawiono opcjonalnie na poziomie wartości 6° lub 13,5°. Cięcie i rozdrabnianie prowadzono z prędkością obwodową noży 0,3 m/s, w szczelinie międzynożowej o minimalnej szerokości, której wartość oszacowano na 0,06 mm. Do rozdrabniania zastosowano sita z otworami okrągłymi o średnicy 9 mm. Do wyznaczenia podatności na dozowanie materiałów porowatych wytypowano recyklaty polietylenu małej gęstości oraz polistyrenu. Wydajności i dokładności dozowania analizowano z zastosowaniem urządzenia ślimakowego o średnicy ślimaka  $\varnothing 25$  mm. Dozownik ten jest wykorzystywany zarówno do podawania barwników i materiałów polimerowych otrzymywanych w technologiach granulacji na gorąco, jak i recyklatów pochodzących z procesów rozdrabniania. Budowę i zasadę działania dozownika opisano we wcześniejszej pracy własnej [22].

Prowadzone badania obejmowały określenie wpływu gęstości materiałów (PE, PS), a także prędkości obrotowej ślimaka w zakresie od 9 do 36 obr./min na wydajność i dokładność dozowania. Recyklaty tworzyw porowatych dozowano bezpośrednio do lejki zasypowego wtryskarki laboratoryjnej Battenfeld 350 Plus o sile zamknięcia 350 kN. Narzędzie przetwórcze stanowiła modułowa, laboratoryjna forma badawcza wyposażona w dwa gniazda formujące i system przepływowy, gorąco-kanalowy firmy HASCO [7]. Proces wtórnego wtryskiwania polistyrenu prowadzono w następujących warunkach: temperatura w poszczególnych strefach wtryskarki: dysza – 246 °C, strefa III – 245 °C, strefa II – 245 °C, strefa I – 240 °C; ciśnienie wtryskiwania – 75 MPa, ciśnienie docisku – 0 MPa dla tworzyw porowatych i 67 MPa dla tworzyw litych, czas wtrysku – 2,5 s, czas docisku dla tworzyw litych – 35 s, czas chłodzenia – 90 s.

Ze wszystkich materiałów porowatych i litych przetwarzanych powtórnie metodą wtryskiwania, otrzymano wypraski o grubości  $4 \cdot 10^{-3}$  m i kształcie zgodnym z normą PN-EN ISO 527-2. Parametry wtryskiwania recyklatów PELD i PP przedstawiono w [7], przy czym w wypadku recyklatów porowatych całkowicie wyeliminowano fazę docisku.

### Metody badań

- Gęstość oznaczano zgodnie z normą PN-EN ISO 1183-1 metodą zanurzeniową, z wykorzystaniem wagi laboratoryjnej AD 50 firmy AXIS o dokładności pomiaru 0,0001 g.
- Wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości wzdłużnej wyznaczano zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1 z prędkością odkształcania 50 mm/s, za pomocą maszy-



Rys. 1. Przykładowe obrazy projekcyjne ziaren rozdrobionych: a) polistyrenu porowatego zawierającego 4% mas. poroforu, b) polipropylenu porowatego zawierającego 2% mas. poroforu; powiększenie 8×

Fig. 1. Exemplary of projection images of the grains: a) a porous polystyrene containing 4 wt % of a blowing agent, b) a porous polypropylene containing 2 wt % of a blowing agent (optical zoom 8×

ny wytrzymałościowej Z030 (Zwick/Roell). Wydłużenie próbki mierzono przy użyciu ekstensometru analogowego o bazie pomiarowej 50 mm, mocowanego na części pomiarowej próbki. Odształcenie bezwzględne mierzono za pomocą bezdotykowego ekstensometru videoXtens (Zwick/Roell). Wartości wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości obliczono automatycznie w programie sterującym maszyny TestXpert® II (Zwick/Roell). Dodatkowo zweryfikowano otrzymane wartości modułu ( $E$ ), obliczając jego wartości na podstawie przebiegu krzywej  $\sigma(\epsilon)$ , zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1.

## WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

### Proces pojedynczego przecięcia

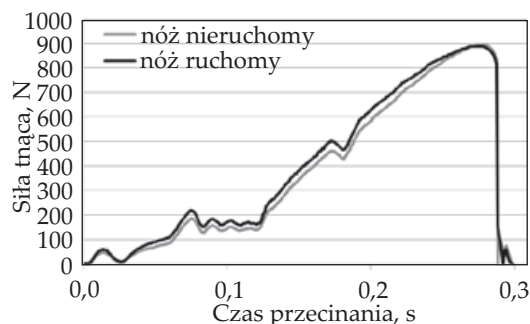
Przy założeniu, że selektywna zbiórka odpadów i ich segregacja jest skuteczna, ważnym ogniwem technologii recyklingu mechanicznego jest wstępna redukcja objętości materiałów odpadowych. Bez właściwie przeprowadzonego rozdrobnienia materiału, kolejne składowe procesy jego wtórnego wykorzystania nie mogą być właściwie zrealizowane. Na podstawie doświadczeń własnych stwierdzono, że rodzaj i postać materiału wsadowego ma istotny wpływ na strategię realizacji procesu pojedynczego przecięcia. W wypadku tworzyw porowatych skutecznym sposobem dezintegracji elementów wsadowych jest cięcie realizowane między dwiema krawędziami noży tnących w minimalnej szczelinie międzyżyłowej (tzw. cięcie skośne albo hiperboloidalne). Obraz zazwyczaj płaskiej płaszczyzny przecięcia wskazuje na dominujący w tym wypadku proces ścinania, co jest korzystne ze względu na energię potrzebną do pojedynczego przecięcia i rozdrobnienia (rys. 1).

Maksymalne wartości siły tnącej na nożach, moment obrotowy oraz wartość energii potrzebnej do pojedynczego przecięcia (rys. 2) w istotny sposób zależą od przyjętych parametrów procesowych. W wypadku cięcia

tworzyw poliolefinowych o strukturze porowatej, szczególnie ważne jest właściwe ustawienie szczeliny międzyżyłowej w młynie nożowym [7].

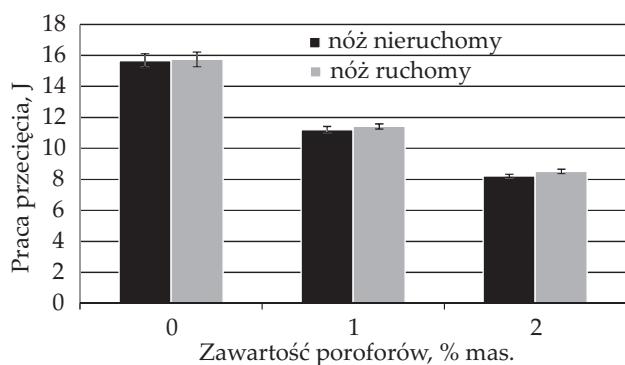
Wykazano, że w odniesieniu do wytłocznin polipropylenu porowatego, największy wpływ na zmniejszenie wartości energii potrzebnej do przecięcia, ma zastosowanie zamocowanego na wirniku noża ruchomego o kącie ostrza  $30^\circ$  [7]. Wartość pracy potrzebnej do przecięcia zmniejsza się także wraz ze zwiększeniem kąta pochylenia krawędzi tnących noży, z  $6^\circ$  do  $13,5^\circ$ . Stwierdzono, że zmniejszenie wartości pracy pojedynczego przecięcia jest znacznie wyraźniejsze niż zmiana maksymalnej siły tnącej (rys. 3). Zależność ta nie zmienia się po uwzględnieniu także przekrojów materiału (rys. 4).

Na podstawie wyników wcześniej zrealizowanych badań stwierdzono, że zmniejszenie kąta ostrza noża ruchomego  $\beta$ , do wartości  $30^\circ$  wpływa na bardzo wyraźne zmniejszenie wartości siły tnącej i momentu obrotowego [7].



Rys. 2. Przykładowy przebieg zmian wartości siły tnącej podczas pojedynczego przecinania porowatej wytłoczyny z polipropylenu, zawierającej 1% mas. środka porującego, prędkość obwodowa noży 0,3 m/s

Fig. 2. Exemplary of changes of the cutting force during a single cutting the polypropylene porous extrudate containing 1 wt % of a blowing agent, velocity of knives 0.3 m/s



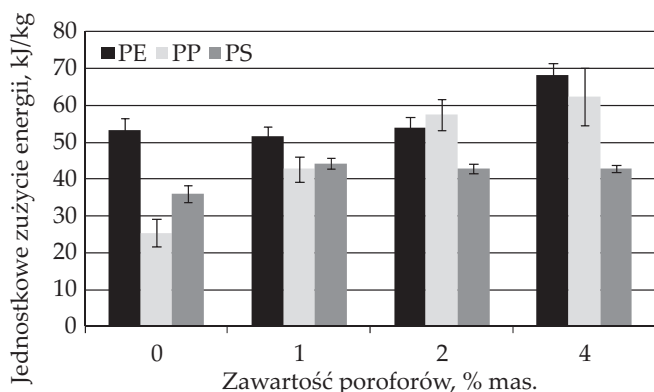
Rys. 3. Wpływ zawartości poroforów w próbkach polipropyle-  
nu na wartości pracy potrzebnej na ich przecięcie; parametry  
procesu: kąty ostrzy  $\beta_r$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , prędkość obwodowa 0,3 m/s,  
szczelina międzyżoźowa 0,06 mm, kąt pochylenia krawędzi tną-  
cych  $2\lambda = 6^\circ$

Fig. 3. The influence of blowing agents content on the work  
needed to cut of polypropylene samples; process parameters:  
the angles of a knife blades  $\beta_r$  and  $\beta_s = 60^\circ$ , velocity 0.3 m/s,  
gap between knives 0.06 mm, angle of cutting edges  $2\lambda = 6^\circ$

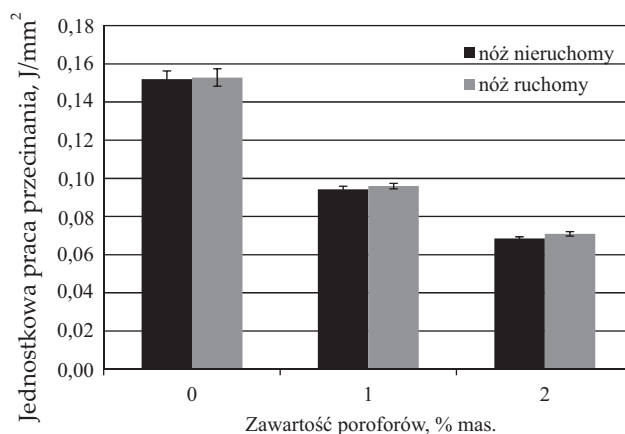
### Proces rozdrabniania

W procesie rozdrabniania, podobnie jak w wypadku  
cięcia, stwierdzono istotną zależność od struktury po-  
rowatej tworzyw termoplastycznych, zarówno tworzyw  
poliolefinowych, jak i polistyrenu. Obserwowana jest  
tendencja do wzrostu wartości energii potrzebnej do roz-  
drobnienia wytłocznin z tworzyw poliolefinowych wraz  
ze zwiększającą się zawartością poroforów w strukturze  
materiału (rys. 5).

W odniesieniu do polistyrenu porowatego zmiany te,  
choć zauważalne, są najmniejsze. Bezpośrednią przy-  
czyną obserwowanej tendencji jest zwiększenie udarow-  
ej odporności materiałów porowatych, utrudniające pod-  
ział ziaren w szczelinie międzyżoźowej. Faza gazowa



Rys. 5. Jednostkowe zużycie energii procesu rozdrabniania wy-  
tłocznin litych i porowatych wykonanych z różnych tworzyw;  
prędkość obwodowa noży 3 m/s, sita o średnicy otworów  $\varnothing 9$  mm  
Fig. 5. The specific energy consumption of grinding process of  
solid and porous products made of various materials; the tests  
were carried out at the velocity of knives 3 m/s and using sieves  
with a hole diameter of  $\varnothing 9$  mm



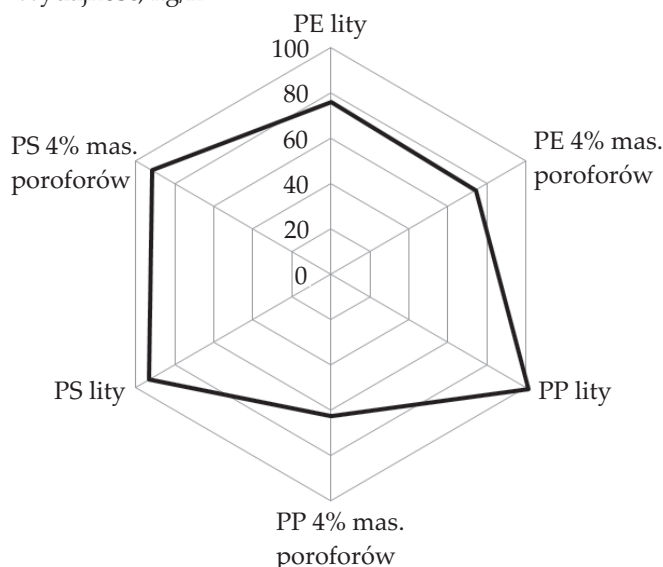
Rys. 4. Wpływ zawartości poroforów na wartości pracy potrzeb-  
nej do pojedynczego przecięcia próbek z polipropyle-  
nu; kąty ostrzy  $\beta_r$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , prędkość obwodowa 0,3 m/s,  
szczelina międzyżoźowa 0,06 mm, kąt pochylenia krawędzi tną-  
cych  $2\lambda = 6^\circ$

Fig. 4. The influence of blowing agent content on the work  
needed to cut of polypropylene samples; process parameters: the an-  
gles of the knife blades  $\beta_r$  and  $\beta_s = 60^\circ$ , velocity 0.3 m/s, gap be-  
tween knives 0.06 mm, angle of cutting edges  $2\lambda = 6^\circ$

w strukturze materiału porowatego stanowi dodatkową  
fazę elastyczną [7]. Mimo to, wyraźny spadek wydajno-  
ści, o prawie 40% w stosunku do materiału litego (rys. 6),  
zanotowano jedynie w wypadku porowatego polipropy-  
lenu.

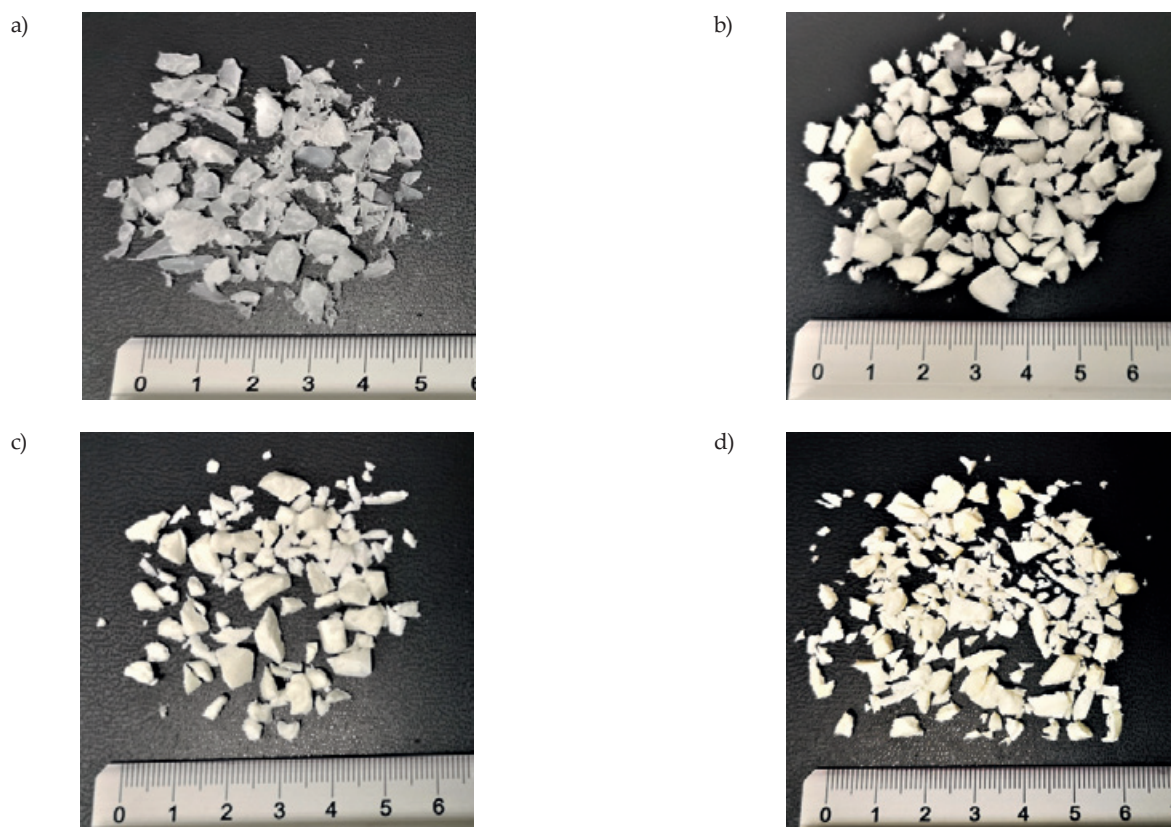
Wartości średnicy medialnej rozkładu ziarnowego  $d_{p50}$   
świadczą o podobnym mechanizmie podziału wsadu  
w komorze roboczej młyna; w wypadku recyklatów z PP  
zawierają się one w przedziale 4,88–5,56 mm, recykla-

Wydajność, kg/h



Rys. 6. Wydajność procesu rozdrabniania wytłocznin litych i po-  
rowatych wykonanych z różnych tworzyw; prędkość obwodowa  
noży 3 m/s, sita o średnicy otworów  $\varnothing 9$  mm

Fig. 6. The efficiency of grinding process of solid and porous  
products made of various materials; the tests were carried out  
at the velocity of knives 3 m/s and using sieves with a hole di-  
ameter of  $\varnothing 9$  mm



Rys. 7. Postać geometryczna zbioru ziaren recyklatów: a) PELD niezawierającego poroforów, b) PELD o zawartości 4% mas. poroforów, c) PS niezawierającego poroforów, d) PS o zawartości 4% mas. poroforów

Fig. 7. Geometrical form of a set of recycled grains: a) PELD without blowing agents, b) PELD with a content of 4 wt % of a blowing agents, c) PS without blowing agents, d) PS with content of 4 wt % of a blowing agents

tów PS 5,09–5,27 mm, a rozdrobnionych odpadów PELD 5,38–5,56 mm [7]. We wszystkich wypadkach obserwuje się przewagę płaskich powierzchni przecięcia ziaren recyklatów, co świadczy o dominującym udziale naprężeń ścinających w podziale wytłocznym materiału na mniejsze części. Stwierdzono, że zastosowanie sit o średnicy otworów sitowych  $\varnothing 9$  mm jest korzystne dla bezpośredniego dozowania materiału (z pominięciem procesu regranulowania) we wtórnym procesie przetwórczym.

### Dozowanie wolumetryczne recyklatów porowatych

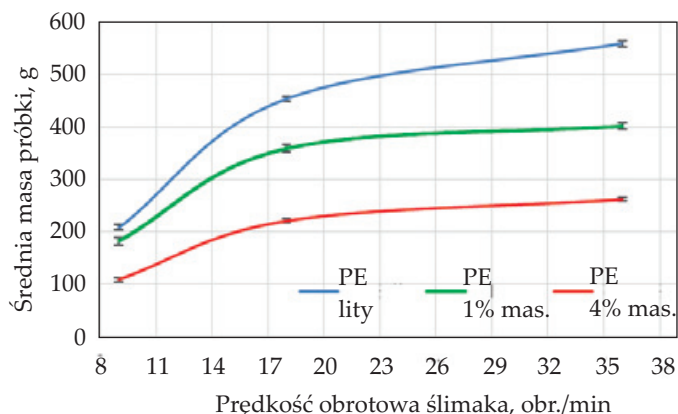
W badaniach procesu dozowania użyto recyklatów litych i porowatych otrzymanych w opisanym we wcześniejszym tekście procesie rozdrabniania. Recyklaty stanowiły stosunkowo regularne, nieseparowane na frakcje ziarna z wyraźnie zaznaczonymi płaskimi płaszczyznami przecięcia (rys. 7). Zamierzeniem było wierne odtworzenie procesu rzeczywistego, w którym założono bezpośrednio dozowanie recyklatów do układu uplastyczniającego wtryskarki we wtórnym procesie przetwórczym.

Analiza wyników badań procesu dozowania wskazuje na ścisłą zależność wydajności dozowania od rodzaju materiału i prędkości obrotowej ślimaka (rys. 8 i 9). Na podstawie wydajności, a także dokładności dozowania, mierzonych średnim odchyleniem standardowym poszczególnych pomiarów, stwierdzono pośredni, ale istot-

ny wpływ zarówno gęstości, jak i kształtu ziaren recyklatów porowatych na przebieg dozowania, co jest związane z tarcieniem ziaren recyklatów o siebie i o elementy urządzenia dozującego. W badaniach potwierdzono, na podstawie analizy odchylenia standardowego, że największą dokładność dozowania uzyskano przy prędkości obrotowej ślimaka równej ok. 18 obr./min (środkowy zakres prędkości obrotowej urządzenia), co wynika z charakterystyki układu napędowego ślimaka, a także z relacji występujących między wymiarami ślimaka (średnica, skok) tulei, szybkością obrotową ślimaka a cechami granulometrycznymi dozowanego granulatu.

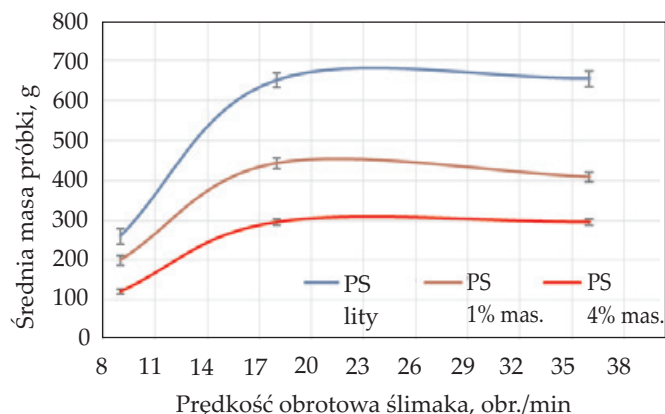
W razie niewłaściwego doboru typu ślimaka w procesie dozowania mogą nastąpić zakłócenia w przemieszczaniu się tworzywa w kierunku wylotu dozownika. Zaobserwowano, że zjawisko to, zobrazowane na rys. 10, występuje znacznie częściej w toku dozowania lekkich recyklatów porowatych. Potwierdza to analiza wydajności dozowania rozdrobnionych tworzyw porowatych, a zwłaszcza bardzo lekkiego recyklatu polistyrenu porowatego XPS. Dlatego zasadna jest konieczność każdorazowego doboru ślimaka, szczególnie w wypadku dozowania materiałów o zróżnicowanych właściwościach granulometrycznych i gęstości zmniejszonej w stosunku do gęstości tworzyw litych.

Największą dokładność dozowania, rosnącą wraz z prędkością obrotową ślimaka, stwierdzono w odnie-



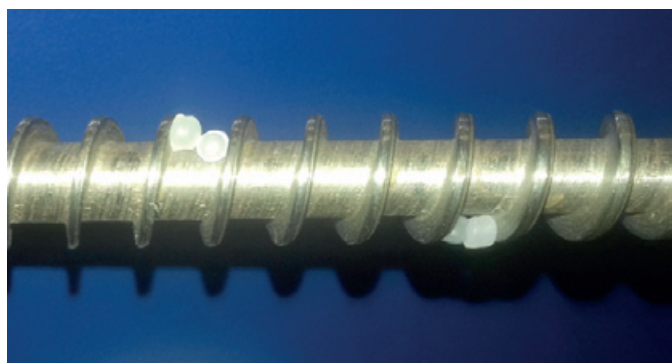
Rys. 8. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka o średnicy  $\varnothing$  25 mm na średnią wydajność masową dozowania ziaren recyklatu porowatego polietylenu

Fig. 8. The influence of the rotational speed of a screw with diameter  $\varnothing$  25 mm on the average mass efficiency of metering samples of porous polyethylene



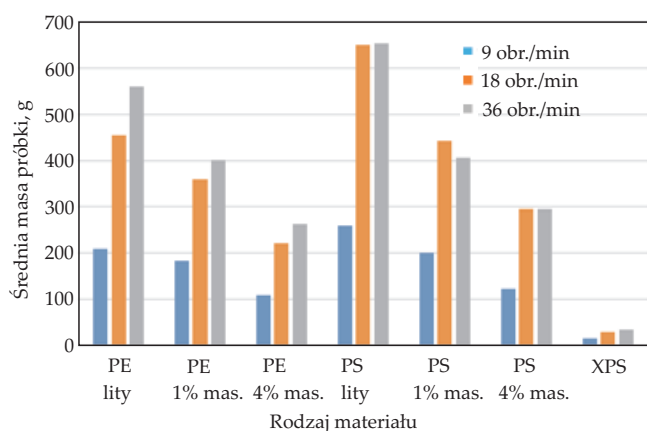
Rys. 9. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka o średnicy  $\varnothing$  25 mm na średnią wydajność masową dozowania ziaren recyklatu porowatego polistyrenu

Fig. 9. The influence of rotational speed of the screw with diameter of  $\varnothing$  25 mm on the average mass efficiency of metering samples of porous polystyrene



Rys. 10. Zakleszczanie się ziaren granulatu tworzywa między zwojami ślimaka w dozowniku wolumetrycznym

Fig. 10. Effect of the plastic granulate jamming between the screw turns in the volumetric feeder



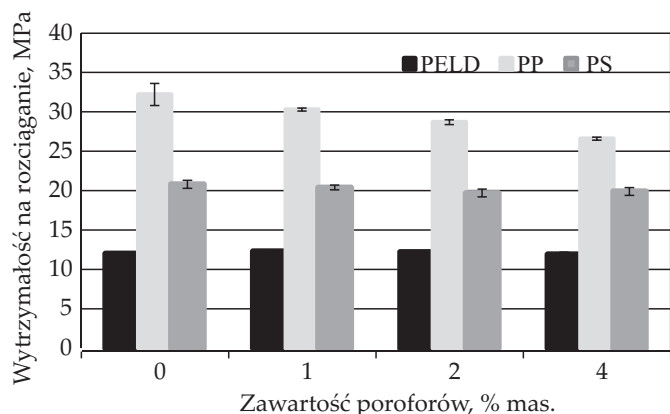
Rys. 11. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na wartość masowej wydajności dozowania ziaren recyklatów PE i PS o różnym stopniu porowatości

Fig. 11. The influence of rotational speed of the screw on the value of mass dosing efficiency of PE and PS with different degree of porosity

sieniu do materiałów litych. Największą dokładność dozowania uzyskano przy wartości prędkości obrotowej z środkowego zakresu, co wykazano już we wcześniejszej publikacji własnej [22]. Zdecydowanie najmniejszą wydajność dozowania stwierdzono w wypadku rozdrobnionego XPS, charakteryzującego się znacznie mniejszą gęstością nasypową. Zaobserwowano też znaczne utrudnienia w wypełnieniu przestrzeni roboczej dozownika (rys. 11).

### Właściwości materiałów wtórnych otrzymanych z recyklatów

W wyniku wtórnego procesu wtryskiwania otrzymano wypraski o zadowalających cechach geometrycznych, pozbawione typowych wad powierzchniowych, takich jak zapadnięcia, mimo że we wszystkich wypadkach wtryskiwania wtórnego nie stosowano fazy docisku, a grubość próbek wynosiła 4 mm. Zweryfikowany wcześniej sposób dozowania materiałów porowatych pozwolił na osiągnięcie równomiernego i objętościowo wystarczającego podawania recyklatów porowatych, a w efekcie uzyskanie próbek wtryskowych o powtarzalnych właściwościach: wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga (rys. 12 i rys. 13). Zaznacza się wyraźne ograniczenie fazy porowatej w wypraskach, ale nie można wykluczyć, że niewielkie jej ilości występują w części rdzeniowej próbek. Stwierdzono istotną zmianę gęstości wytworów wykonanych z recyklatów porowatych w stosunku do gęstości wytworów z materiałów pierwotnych. Trzeba zauważyć, że badane materiały w postaci granulatu pierwotnych były przeznaczone do wytłaczania, uzyskanie wyprasek wtryskowych z recyklatów wytworzonych z nich tworzyw porowatych stanowi więc nowe doświadczenie. Było to możliwe dzięki zwiększeniu wartości wskaźnika szybkości płynięcia w wyniku wprowadzenia poroforu



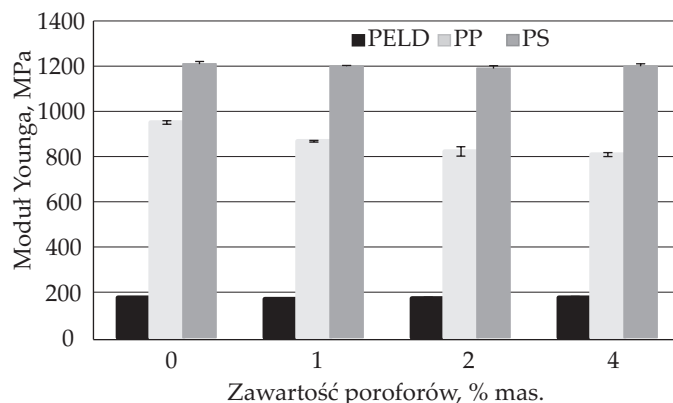
Rys. 12. Wytrzymałość na rozciąganie wyprasek otrzymanych z recyklatów litych i porowatych wytłocznin o różnej zawartości poroforów

Fig. 12. Tensile strength of molded parts obtained from recycles of solid and porous extruded product with different content of blowing agents

do tworzywa, o czym wspomniano we wcześniejszej publikacji [13]. Zawartość fazy porowatej wpłynęła na zdolność materiału wtórnego do płynięcia, co pozwoliło na zastosowanie stosunkowo małych wartości podstawowych parametrów procesowych fazy wtrysku.

#### PODSUMOWANIE

Recykling mechaniczny termoplastów porowatych jest efektywny pod warunkiem odpowiedniego doboru parametrów procesów składowych. Wykazano, że w wyniku bezpośredniego dozowania recyklatów tworzyw porowatych, z pominięciem etapu granulowania, można uzyskać materiał wtórny w postaci wyprasek wolnych od wad powierzchniowych. Wpływa to na znaczną poprawę rachunku ekonomicznego związaną z ponownym wprowadzeniem do obiegu materiału wtórnego, a także ogranicza obciążenie termiczne, wynikające z krotności przechodzenia tworzywa w stan lepkopłynny. Postać granulometryczna recyklatów porowatych jest efektem zastosowanej technologii rozdrabniania i przyjętych nastaw procesowych, umożliwiających bezpośrednie wykorzystanie produktów rozdrabniania, bez pogorszenia dokładności i wydajności ich dozowania we wtórnym procesie przetwórczym. Stwierdzono, że procesy składowe recyklingu materiałowego prowadzą do praktycznie całkowitej eliminacji porów w strukturze materiału wtórnego. Stwierdzono też, że w toku ponownego wtryskiwania recyklatów uaktywniają się pozostałości poroforów, które nie uległy rozłożeniu w pierwotnym procesie przetwórczym. Pozwala to na realizację procesu bez fazy docisku lub przy znacznym jej ograniczeniu. Można uznać, że ponowne wykorzystanie termoplastów porowatych jest uzasadnione korzystnymi cechami uzyskanych wytworów wtórnych oraz stosunkowo niewielkimi nakładami energetycznymi na realizację procesów składowych recyklingu mechanicznego.



Rys. 13. Moduł Younga wyprasek otrzymanych z recyklatów litych i porowatych wytłocznin o różnej zawartości poroforów  
Fig. 13. Young's modulus of molded parts obtained from recycles of solid and porous extruded products with different content of blowing agents

#### LITERATURA

- [1] Bieliński M.: „Podstawy i badanie podatności termoplastycznych tworzyw wtórnych na wybrane procesy przetwórstwa”, Rozprawy 48, Wyd. Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1992.
- [2] Konieczka R.: „Podstawy mechanicznych procesów recyrkulacji folii z polietylenu małej gęstości”. Rozprawy 74, Wyd. Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1996.
- [3] “Advanced Grinding – 25th anniversary of the commination in Bydgoszcz” (red. Mroziński A., Macko M.), Wyd. Fundacji Rozwoju Mechatroniki, Bydgoszcz 2011.
- [4] Dudziński D., Molinari A.: *International Journal of Mechanical Sciences* **1997**, 39, 369.  
[https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(96\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(96)00043-4)
- [5] Flizikowski J., Macko M.: *Polimery* **2001**, 66, 53.
- [6] Konieczka R.: *Polimery* **1988**, 38, 233.
- [7] Sykuter D.: „Badania procesów cięcia i podatności na rozdrabnianie poliolefin porowatych w aspekcie ich wtórnego przetwórstwa”, Rozprawy nr 169, Wyd. Uczelniane UTP, Bydgoszcz 2013.
- [8] Flizikowski J.: „Badania i podstawy konstrukcyjne rozdrabniaczy wielotarczowych”, Rozprawy 42, Wyd. Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1990.
- [9] Flizikowski J.: „Rozdrabnianie tworzyw sztucznych”, Wyd. Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1998.
- [10] Macko M.: „Metoda doboru rozdrabniaczy wielokrawędziowych do przeróbki materiałów polimerowych”. Wyd. Uczelniane UKW, Bydgoszcz 2011.
- [11] Konieczka R., Kałużny W., Sykuter D.: *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe* **1997**, 50 (9), 641.
- [12] Rydzkowski T.: „Teoretyczne i doświadczalne podstawy efektywnego wytłaczania ślimakowo-tarczowego w recyklingu materiałów i kompozytów polimerowych”, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012.

- [13] Sykutera D., Bieliński M.: *Polimery* **2014**, 59, 602.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2014.602>
- [14] Tröltzsch J., Helbig F., Kroll L.: *Journal of Thermoplastic Composite Materials* **2016**, 29, 1033.  
<http://dx.doi.org/10.1177/0892705714554493>
- [15] Szostak M., Krzywdzińska P., Barczewski M.: *Polimery* **2018**, 63, 145.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.2.8>
- [16] Palutkiewicz P., Garbacz T.: *Polimery* **2017**, 62, 447.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2017.447>
- [17] Palutkiewicz P.: *Polimery* **2015**, 60, 132.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.132>
- [18] Gomez-Monterde J., Sanchez-Soto M., MasPOCH M.L.: *Composites: Part A – Applied Science and Manufacturing* **2018**, 104, 1.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.10.014>
- [19] Suhartono E., Chen S.C., Lee K.H., Wang K.J.: *International Journal of Plastics Technology* **2017**, 21, 351.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s12588-017-9190-7>
- [20] Palutkiewicz P., Garbacz T.: *Cellular Polymers* **2015**, 35, 159.  
<http://dx.doi.org/10.1177/026248931603500401>
- [21] Sykutera D., Szewczykowski P., Roch M. i in.: *Polimery* **2018**, 63, 743.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.11.1>
- [22] Bieliński M., Burzyński P.: *Polimery* **2004**, 49, 275.
- [23] Koch R., Noworyta A.: „Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej”, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- [24] “Nano The Measure of all Things” (red. Zillgitt M.), Eurocolour c/o VdMi, Frankfurt 2012.
- [25] Kremer J., Hahn W.: “Einfarben von Kunststoffen mit Masterbach”, Vogel Buchverlag, Würzburg 2001.

Otrzymano 22 V 2019 r.