

Dariusz SYKUTERA, Marek BIELIŃSKI, Piotr CZYŻEWSKI
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 87-796 Bydgoszcz
e-mail: Dariusz.Sykutera@utp.edu.pl

Recykling mechaniczny porowatego polistyrenu

Streszczenie: Z uwagi na wzrost znaczenia polimerowych materiałów porowatych (np. materiały izolacyjne, opakowaniowe oraz lekkie kompozyty polimerowe), istnieje potrzeba opracowania sposobu ponownego zagospodarowywania tego typu odpadów. Celem pracy było określenie podatności polistyrenu porowatego na cięcie i rozdrabnianie w młynie nożowym. Dążono do uzyskania recyklatów, które można bezpośrednio wykorzystać we wtórnym przetwórstwie. Badania przeprowadzono na oryginalnym stanowisku badawczym, wyposażonym w wirnik, z zamocowanymi skośnie do osi wirnika nożami, o prostoliniowych krawędziach tnących. Uzyskane wyniki wskazują, że w przypadku cięcia i rozdrabniania polistyrenu porowatego należy zastosować specyficzne dla tego materiału parametry procesowe, odmienne od powszechnie stosowanych dla materiałów litych. Dzięki temu proces rozdrabniania jest realizowany z dużą wydajnością, przy małym jednostkowym zużyciu energii. Uzyskane krzywe rozkładu ziarnowego wskazują na możliwość bezpośredniego wykorzystania otrzymanych recyklatów we wtórnym przetwórstwie. Najmniejszą podatność do rozdrabniania wykazuje polistyren porowaty o gęstości poniżej $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Słowa kluczowe: recykling mechaniczny, rozdrabnianie, cięcie, polistyren porowaty, zużycie energii

MECHANICAL RECYCLING OF POROUS POLYSTYRENE

Abstract: Due to the increasing importance of polymeric porous materials (e.g. insulation materials, packaging, and lightweight polymer composites), there is a need to develop ways to recycle these waste. The aim of the paper was to determine the susceptibility of porous polystyrene to cutting and grinding in a cutting mill. The aim was to obtain recyclates, that can be directly used in secondary processing. The tests were carried out on an original test stand, equipped with a special rotor and knives. Knife cutting edges were reclined in relation to the rotor axis. Different process parameters for the cutting and grinding of porous polystyrene should be apply, in comparison to the solid material. Thanks to this, grinding process is realized with high efficiency and with a small energy consumption. The obtained grain size distribution indicate the possibility of direct use of the recyclates in secondary processing. The most difficult to grinding is the porous polystyrene with density less than $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Keywords: mechanical recycling, grinding, cutting, porous polystyrene, energy consumption

1. WPROWADZENIE

Jedną z obserwowanych tendencji w zakresie modyfikowania właściwości fizycznych tworzyw polimerowych jest dążenie do zmniejszenia masy i podwyższenia izolacyjności cieplnej wyrobów, przy zachowaniu ich właściwości mechanicznych [1-3]. Obserwuje się także coraz częstsze wytwarzanie metodą wtryskiwania porującego wyprasek konstrukcyjnych o strukturach złożonych [2-6]. W tych procesach wytwarzania, porowanie chemiczne lub fizyczne jest kluczowe, z punktu widzenia otrzymania

lekkich struktur polimerowo-gazowych [1, 2, 4]. Stwierdzono, że porowate tworzywa poliolefinowe są podatne na procesy recyklingu mechanicznego, a w wyniku ich realizacji można otrzymać recyklat do bezpośredniego wykorzystania we wtórnym przetwórstwie [6-7]. Stwierdzono, że pory gazowe znajdujące się w objętości wyrobu stanowią dodatkową fazę elastyczną, podwyższającą jego uduchność i zdolność do odkształceń dynamicznych [7-9]. Rozdrabnianie takich materiałów jest trudniejsze, a podczas jego realizacji wydziela się znaczna ilość ciepła i wzrasta zużycie energii [6, 10-12]. Jest to wynikiem obni-

żenia sprawności przecinania materiału [12-14]. Z tych powodów dobór odpowiednich warunków realizacji procesów cięcia i rozdrabniania powinien być poprzedzony analizą właściwości fizycznych nadawy i jest zwykle kompromisem pomiędzy efektywnością dezintegracji a jakością recyklatu [7, 12, 15].

Celem pracy było określenie podatności polistyrenu porowatego na cięcie i rozdrabnianie w młynie nożowym. Dążono do otrzymania recyklatu, który można wykorzystać bezpośrednio we wtórnym przetwórstwie. Celem dodatkowym było określenie wpływu wybranych cech geometrycznych noży na przebieg cięcia polistyrenu porowatego.

2. METODYKA BADAŃ

Do badań wykorzystano wytłoczyny uzyskane w laboratoryjnej wytłaczarce jednoślিমakowej z zamontowaną głowicą badawczą o przekroju ustnika 13,5x8 mm. Materiał do badań wytwarzano z polistyrenu KRASTEN 552 9002 firmy Synthos S.A. (Czechy), z jednoczesnym dozowaniem poroforu Expancel 980 MBX 120 firmy Akzo Nobel (Szwecja). Koncentrat poroforu dodano do tworzywa w ilości 2 i 4% mas. Proces wytłaczania realizowano przy następujących parametrach: a) temperatura w układzie uplastyczniania: strefa I - 145 °C, strefa II - 215 °C, strefa III - 215 °C, b) temperatura w głowicy wytłaczarskiej: strefa I - 140 °C, strefa II - 140 °C; c) prędkość obrotowa ślimaka $n_s=85$ obr \times min $^{-1}$. Gęstość badanych materiałów wynosiła: dla PS+2% mas. poroforów - 606,4 \pm 8,2 kg \times m $^{-3}$, dla PS+4% mas. poroforów - 446,3 \pm 12,6 kg \times m $^{-3}$, natomiast dla PSlitego gęstość oznaczono na poziomie 986,5 \pm 21,4 kg \times m $^{-3}$. W próbach cięcia i rozdrabniania wykorzystano także profile wykonane przez wytłaczanie z użyciem gazu obojętnego o gęstości 77,3 \pm 2,0 kg \times m $^{-3}$ (oznaczenie XPS). Wstępnie pocięty materiał wsadowy poddano dezintegracji na stanowisku do badania procesu cięcia i rozdrabniania, którego opis zawarto w pracach [6-8]. Noże o specjalnej konstrukcji wyposażono w tensometry firmy VISAY (Niemcy). Przebiegi

zmian siły i momentu obrotowego rejestrowano za pomocą przetwornika ESAM Traveller 1 (Niemcy), przy założonym czasie próbkowania 10 $^{-2}$ s. Zastosowano noże tnące, których prostoliniowe krawędzie tnące pochyłono w stosunku do osi wirnika o kąt $2l = 6^\circ$ lub 13,5°. Kąt ostrza ruchomych noży tnących wynosił 30° oraz 60°. Próby rozdrabniania realizowano z prędkością obwodową noży ruchomych wynoszącą 3m \times s $^{-1}$ i przy zastosowaniu sit o średnicy otworów \AA 9mm. Obliczenie jednostkowego zużycia energii zrealizowano w oparciu o wykresy zmiany momentu obrotowego, zgodnie z metodyką zaproponowaną w pracach [7, 11, 15]. Rozkład uziarnienia uzyskanych recyklatów oszacowano na podstawie analiz sitowych, przeprowadzonych w przesiewaczu mimośrodowym [7].

3. DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ

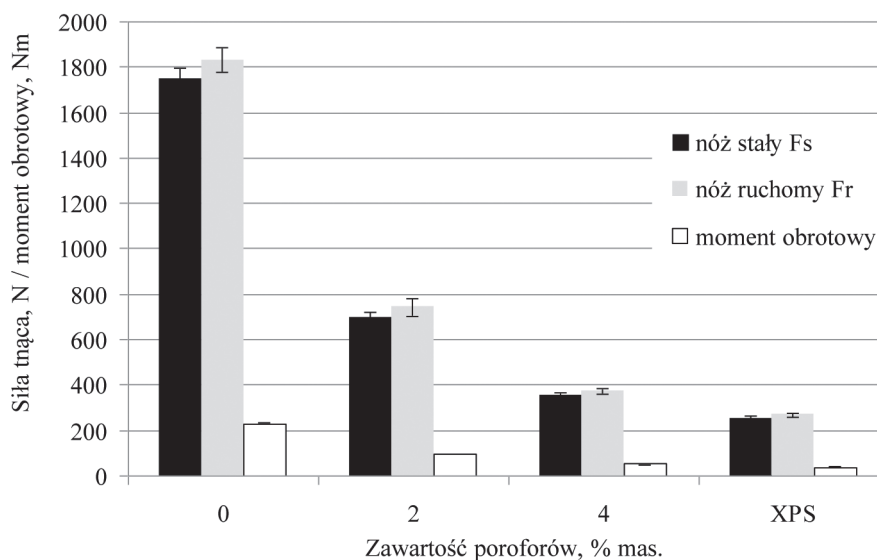
3.1. BADANIA PROCESU POJEDYNCZEGO PRZECIĘCIA

Zrealizowane badania cięcia wskazują na podobny w przebiegu charakter zmian siły tnącej, w porównaniu do wyników uzyskanych dla porowatych tworzyw poliolefinowych (por. rys. 1 i poz. [7]). Wystąpienie w objętości polistyrenu porów gazowych w sposób znaczący obniżyło, proporcjonalnie do zawartości poroforów, wartość siły potrzebnej do przecięcia próbek. Jest to zależność charakterystyczna dla wytłoczyn PS modyfikowanych poroforami chemicznymi. W przypadku próbek o strukturze modyfikowanej gazem obojętnym (porowanie fizyczne), wartość rozpatrywanego czynnika wyjściowego jest na stosunkowo małym poziomie, ale zbliżonym do wytłoczyn porowatych z udziałem 4% mas. poroforów. Realizacja pojedynczego przecięcia dla próbek z XPS wymaga zastosowania większej siły tnącej niż wynikałoby to z relacji do gęstości nadawy. Można także zauważyć, że zarejestrowana siła na nożu ruchomym jest nieznacznie wyższa w stosunku do odczytywanej z noża zamocowanego w obudowie młyna, co świadczy o aktywnym udziale ruchomej kra-

wędzi tnącej w podziale materiału porowatego. Maksymalne wartości siły potrzebnej do przecięcia odniesione do przekroju ciętego materiału zachowują podobną relację jak na rysunku 1.

Geometria ustawienia krawędzi tnących noży względem siebie ma kluczowe znaczenie w cięciu materiałów o zredukowanej gęstości.

Świadczą o tym różnice w przebiegu cięcia zarejestrowane dla noży tnących o zmiennym kącie ostrza i różnym pochyleniu ich krawędzi tnących względem osi wirnika (tab. 1). Maksymalna, jednostkowa siła tnąca ulega bardzo istotnemu obniżeniu w przypadku użycia noża o najmniejszym z badanych kącie ostrza $\beta_r=30^\circ$.



Rys. 1. Wartości siły i momentu obrotowego podczas przecinania polistyrenu porowatego, w zależności od zawartości poroforów i sposobu wytwarzania próbek z polistyrenu

Fig. 1. Force and torque values while cutting porous polystyrene, depending on the content of blowing agent and the method of making polystyrene samples

Tab. 1. Zmiany siły tnącej na nożu ruchomym podczas przecinania polistyrenu o różnym stopniu porowatości (prędkość obrotowa wirnika $n = 30 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$)

Tab. 1. Cutting force changes for the moving knife during cutting of polystyrene with different degrees of porosity (rotational velocity of the rotor $n = 30 \text{ rpm}$)

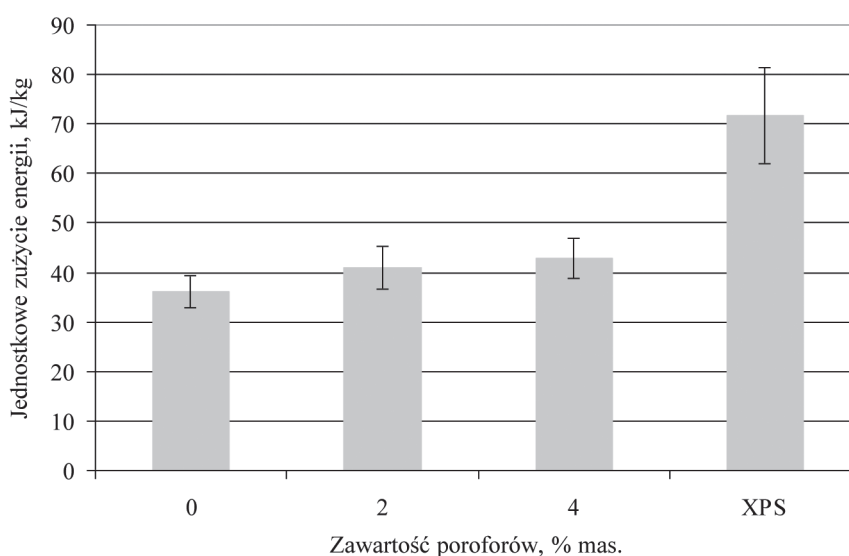
Rodzaj materiału	Jednostkowa siła tnąca odniesiona do przekroju próbki, $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$			
	Kąty ostrzy noży β_r i $\beta_s = 60^\circ$, Pochylenie krawędzi tnących noży, 2λ		Pochylenie krawędzi noży $2\lambda=6^\circ$ Kąt ostrza ruchomego β_r	
	6°	$13,5^\circ$	60°	30°
PS lity	$16, 6\pm 0,5$	$21,9\pm 0,6$	$16, 6\pm 0,5$	$5,3\pm 0,5$
PS 2% poroforów	$6,7\pm 0,2$	$5,3\pm 0,3$	$6,7\pm 0,2$	$1,5\pm 0,1$
PS 4% poroforów	$3,4\pm 0,1$	$2,6\pm 0,1$	$3,4\pm 0,1$	$0,9\pm 0,03$
XPS	$2,4\pm 0,1$	$2,4\pm 0,1$	$2,4\pm 0,1$	$0,8\pm 0,02$

Stwierdzono, że w przypadku użycia tego noża największe zmiany są obserwowane dla próbek zawierających 2 i 4% mas. poroforów, w przypadku których redukcja maksymalnej siły tnącej wynosi nawet ponad 4 razy. Pojedyncze przecięcie próbek z litego oraz porowanego fizycznie polistyrenu, wymaga użycia siły o wartości trzykrotnie mniejszej, w stosunku do prób realizowanych z użyciem noża o kącie $\beta_r=60^\circ$. Pozytywny wpływ pochylenia krawędzi tnących na obserwowane zmiany warunków cięcia jest znacznie mniejszy i dotyczy materiałów porowanych chemicznie. Zarówno dla PS litego jak i dla XPS większe pochylenie krawędzi tnących jest niekorzystne. Podsumowując ten wątek pracy można stwierdzić, że przebieg cięcia zależy od geometrii ustawienia noży tnących.

3.2. BADANIA ROZDRABNIANIA

Jednostkowe zużycie energii potrzebnej do rozdrobnienia istotnie zależy od rodzaju dezintegrowanego materiału. Porowate wyłoczyny z polistyrenu wymagają większych nakładów energetycznych na realizację tego procesu w stosunku do PS litego (rys. 2).

Można zauważyć, że ze względu na sztywność i małą udarność, polistyren lity jest podatny na kruche pękanie, o czym świadczy niewielka w stosunku do innych materiałów wartość jednostkowego zużycia energii i dobra wydajność rozdrabniania na poziomie $93\pm 7,3 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Dodanie poroforów chemicznych do PS w ilości 2 i 4 % mas. spowodowało niewielkie podwyższenie potrzebnej energii do rozdrobnienia oraz obniżenie wydajności do poziomu $89,6\pm 4,5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ dla PS+2% mas. poroforów i $91,8\pm 5,6 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ dla materiału zawierającego 4% mas. poroforów. Zaobserwowano także, że podatność na procesy dezintegracji w młynie nożowym polistyrenu porowanego fizycznie jest najniższa. W przypadku tego materiału zanotowano prawie dwukrotnie wyższe zapotrzebowanie energii na rozdrobnienie i niewielką wydajność $24,6\pm 1,5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Lekki materiał wsadowy dłużej przebywał w komorze roboczej młyna, gdyż prawdopodobieństwo znalezienia się jego fragmentów pomiędzy nożami tnącymi było mniejsze niż w przypadku materiału litego, a jego ewakuacja z komory tnącej młyna przez otwory sitowe utrudniona. Rozdrabnianie przebiegało nierównomiernie, co jest charakterystyczne dla



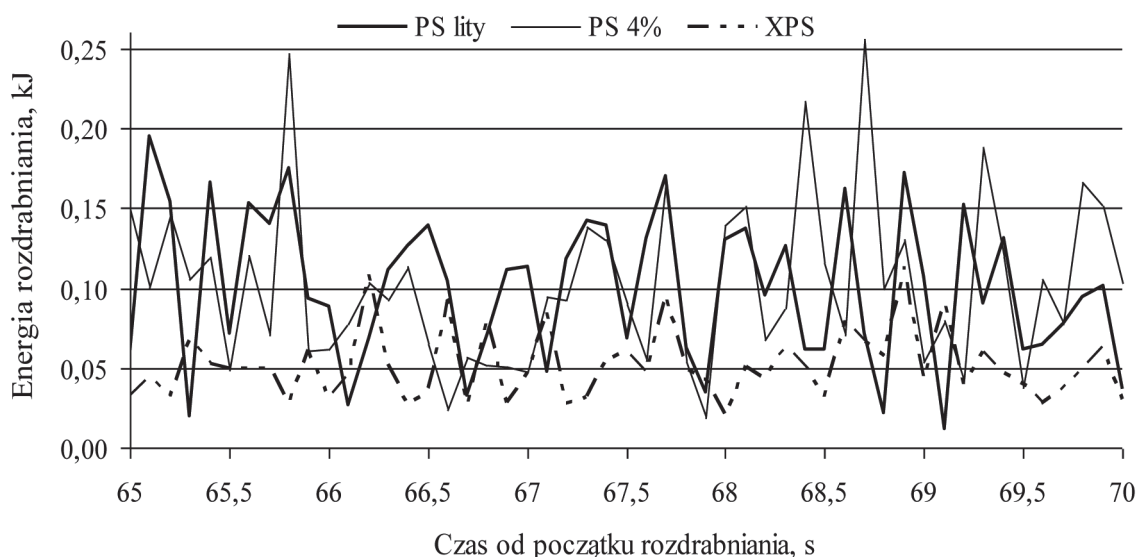
Rys. 2. Jednostkowe zużycie energii podczas rozdrabniania polistyrenu o różnym stopniu porowatości

Fig. 2. Specific energy consumption during grinding of polystyrene with variable degrees of porosity

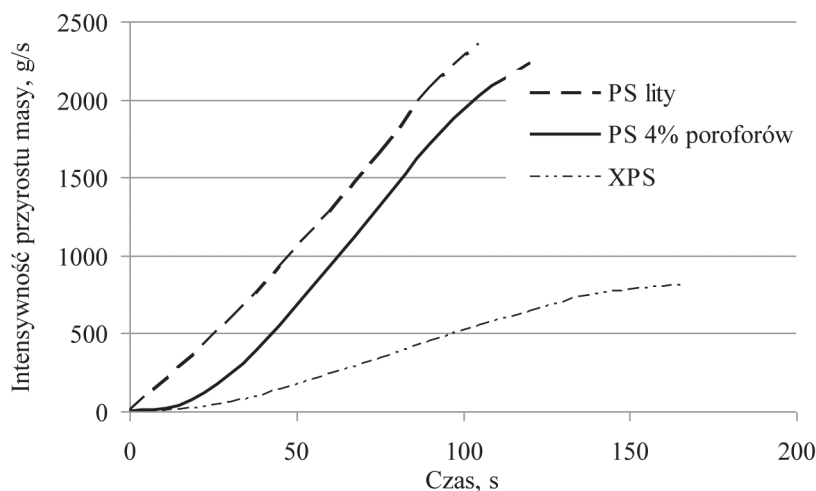
tego procesu i związany z losowym trafianiem cząstek nadawy pomiędzy krawędzie tnące noży, jednak poziom zmienności i wartości chwilowej energii i momentu obrotowego jest największy w przypadku PS 4% poroforów (rys. 3).

O innym przebiegu realizacji procesu rozdrabniania świadczy także intensywność przyrostu masy w czasie realizacji prób (rys. 4). Podobne w swoim kształcie krzywe dla PS litego oraz dla PS+4% mas. poroforów, znacząco różnią się od przyrostu masy rozdrobnionych ziaren XPS. W wyniku realizacji procesu z użyciem

sit $\varnothing 9$ mm uzyskano recyklat, o dominujących dwóch frakcjach ziarnowych: a) 5,0 – 7,0 mm – udział ziaren stanowi 70% mas. zbioru cząstek recyklatów, b) w zakresie od 3,5 do 5 mm udział ziaren recyklatów stanowi ponad 15 % mas. Uzyskane rozkłady ziaren są do siebie zbliżone dla wszystkich badanych materiałów. Świadczy to o podobnym mechanizmie podziału materiału w komorze roboczej, głównie przez cięcie. Można zatem uznać, że pomijając frakcję pylistą (około 1% mas.) recyklat można wykorzystać bezpośrednio we wtórnym przetwórstwie.



Rys. 3. Chwilowe zużycie energii podczas rozdrabniania polistyrenu o różnym stopniu porowatości
Fig. 3. Momentary energy consumption during grinding polystyrene of different porosity degree



Rys. 4. Intensywność przyrostu masy recyklatu polistyrenu podczas jego rozdrabniania w młynie nożowym
Fig. 4. Intensity of weight increase of recycled polystyrene during its grinding in the knife mill using $\varnothing 9$ mm sieves

4. PODSUMOWANIE

W wyniku podjętych prac badawczych stwierdzono istotny wpływ geometrii noży tnących i ich ustawienia względem osi wirnika na skuteczność cięcia polistyrenu porowatego.

W prezentowanej pracy wykazano także, że struktura porowata wytworzona w polistyrenie istotnie wpływa na podatność tego materiału na rozdrabnianie. Wraz ze wzrostem zawartości porów w objętości wytłocznym PS, podział materiału w komorze roboczej młyna nożowego odbywa się z mniejszym udziałem udarowego pęknięcia, głównie przez cięcie.

Rozdrabnianie polistyrenu otrzymanego metodą porowania fizycznego jest z punktu widzenia wydajności i jednostkowego zużycia energii znacząco mniej efektywne, ale nadal skuteczne, o czym świadczy uzyskany stopień rozdrobnienia i rozkład wielkości ziaren. We wszystkich przypadkach otrzymano materiał w postaci zbioru ziaren, w którym dominują dwie frakcje o wymiarach znacznie mniejszych niż średnica zastosowanych sit. Z tego powodu recyklaty te mogą być bezpośrednio wykorzystane w procesach wtórnego przetwórstwa.

BIBLIOGRAFIA

1. Bieliński M.: *Techniki porowania tworzyw termoplastycznych*. Wyd. Uczelni. ATR, Bydgoszcz 2004, s. 89-124.
2. Bociąga E., Palutkiewicz P.: *The influence of injection moulding parameters and blowing agent addition on selected properties, surface state and structure of HDPE parts*. Polymer Engineering and Science 2013, vol. 53, nr 4, p. 679-704.
3. Bociąga E., Palutkiewicz P.: *The Impact of Mould Temperature and Blowing Agent Content on Structure and Properties of Injection Moulded Parts*. Cellular Polymers 2013, vol. 32, nr 5, p. 257-277.
4. Palutkiewicz P., Garbacz T.: *Ocena efektywności wybranych środków porujących w procesie wtryskiwania wyprasek z tworzyw termoplastycznych*. Polimery 2017, vol. 62, nr 6, s. 447-456.
5. Garbacz T., Palutkiewicz P.: *Effectiveness of blowing agents in the cellular injection molding process*. Cellular Polymers 2015, vol. 34, nr 4, p. 189-214.
6. Sykutera D.: *Badania procesów cięcia i podatności na rozdrabnianie poliolefin porowatych w aspekcie ich wtórnego przetwórstwa*. Rozprawy nr 169, Wyd. Uczeln. UTP, Bydgoszcz 2013, s. 27-38, 60-80, 84-131.
7. Sykutera D., Bieliński M.: *Selected properties of recycled polypropylene obtained from porous injection molded parts*. Polimery 2014, vol. 59, nr 7-8, p. 602-605.
8. Sykutera D.: *Stanowisko badawcze i wstępne wyniki badań cięcia termoplastycznych tworzyw porowatych*, Przetwórstwo Tworzyw 2010, vol. 16, nr 4, s. 214-217.
9. Sykutera D.: *Badanie procesu cięcia wybranych termoplastycznych tworzyw porowatych*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna 2016, vol. 55, nr 3, s. 108-109.
10. Sykutera D.: *Badanie procesu cięcia polistyrenu porowatego*. Przetwórstwo Tworzyw 2011, vol. 17, nr 5, s. 409-412.
11. Bauer W.: *Untersuchung des Einzelnerkleinerungsvorganges in Schneidmühlen am Beispiel von Polypropylen*. VDI Verlag, Reihe 3, Nr. 694, Düsseldorf 2001, p. 19-42.
12. Sykutera D.: *Badanie procesu rozdrabniania odpadów gumy cięciem hiperboloidalnym w aspekcie wykorzystania otrzymanego proszku gumowego do napętniania poliamidu 6*, Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1998, s. 60-85.
13. Flizikowski J., Macko M.: *Metodyka oceny sprawności quasi-ścianania recyklatów rur optotelekomunikacyjnych*. Polimery 2001, vol. 46, nr 1, s.53-59.
14. Sykutera D., Hejnowski M.: *Cięcie nożowe tworzyw transmisyjnych o wysokiej udarności*, Zeszyty Naukowe nr 246 Chemia i Technologia Chemiczna, Wydawnictwo ATR, Bydgoszcz 2006, s.155-158.
15. Macko M.: *Metoda doboru rozdrabniaczy wielokrawędziowych do przeróbki materiałów polimerowych*. Wyd. UKW, Bydgoszcz 2011, s. 36-52.

Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 09-06-2017

Data akceptacji publikacji do druku: 27-09-2017