

Dr inż. Aneta Tor-Świątek

Katedra Procesów Polimerowych
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
e-mail: a.tor@pollub.pl

Ocena efektywności procesu wytłaczania mikroporującego polietylenu małej gęstości

Słowa kluczowe: *Wytłaczanie mikroporujące, efektywność procesu, polietylen małej gęstości, środek porujący, mikrosfery*

Keywords: *Microcellular extrusion process, effectiveness of process, low density polyethylene, blowing agent, microspheres*

Streszczenie: Z przetwórczego punktu widzenia ocena efektywności ma istotne znaczenie dla właściwego prowadzenia każdego procesu przetwórstwa tworzyw polimerowych. Jednak szczególnie ważna jest ona w przypadku przetwórstwa tworzyw modyfikowanych środkami porotwórczymi, których dodanie powoduje zmiany zarówno w przebiegu procesu, jak i we właściwościach fizycznych oraz strukturze otrzymanego wytworu. Przeprowadzenie właściwej analizy efektywności procesu, uwzględniającej odpowiednie kryteria i metody pozwala wydajnie i niezawodnie prowadzić proces wytłaczania. Artykuł prezentuje wyniki badań oceny efektywności procesu wytłaczania mikroporującego polietylenu małej gęstości modyfikowanego środkiem mikroporującym w postaci mikrosfer.

Abstract: From a processing point of view, evaluation of effectiveness is essential for the proper conduct of each polymer processing process. However, it is particularly important in the case of modified plastics processing aids, such as blowing agents, the addition of which causes changes in both the process course and the physical properties and structure of the resulting product. Carrying out a proper analysis of the efficiency of the process, taking into account the criteria and methods can efficiently and reliably carry out an extrusion process. This paper presents the results of assessing the effectiveness of the microcellular extrusion process of LDPE modified with selected microblowing agent in the form of microspheres.

1. Wstęp

Proces wytłaczania mikroporującego stanowi obecnie coraz częściej stosowaną metodę przetwórstwa tworzyw termoplastycznych. Proces ten w zależności od charakterystyki rozkładu środka mikroporującego może być prowadzony w standardowych liniach technologicznych, ale z uwzględnieniem właściwego doboru warunków przetwarzania. Skutkiem wprowadzenia do tworzywa specjalnych środków mikroporujących [4] jest otrzymanie wytworów o określonych właściwościach fizycznych i strukturze.

Z uwagi na obecność środków mikroporujących o charakterystyce rozkładu endo- lub egzotermicznej na tworzywo przetwarzane znajdujące się w układzie uplastyczniającym oddziałują zmienne warunki tj. wysoka temperatura, duże ciśnienie, znaczne naprężenia ścinające. To sprawia, że proces wytłaczania mikroporującego jest trudny do prowadzenia [1, 2].

Rozpatrując efektywność procesu wytłaczania bierze się pod uwagę określone kryteria i metody oceny tej efektywności oraz wpływ cech konstrukcyjnych poszczególnych maszyn i narzędzi przetwórczych [6, 7]. Wśród kryteriów pozwalających przeprowadzić ocenę efektywności procesu wytłaczania należy wyróżnić kryteria ilościowe, jakościowe i eksploatacyjne [13]. Do kryteriów ilościowych zalicza się np. wielkości fizyczne charakteryzujące proces wytłaczania, takie jak stopień uplastycznienia, objętościowe natężenie wypływu tworzywa, masowe natężenie wypływu tworzywa (wydajność wytłaczania) oraz sprawność energetyczna. Wśród kryteriów jakościowych należy wymienić rozkład i fluktuację temperatury przetwarzania, stopień wymieszania wzdłużnego i poprzecznego, stabilność wydajności procesu (pulsacja natężenia wypływu i ciśnienia), zmiany strukturalne oraz właściwości fizyczne wytworów. Kryteria eksploatacyjne obejmują trwałość eksploatacyjną, dyspozycyjność produkcyjną oraz automatyzację i robotyzację procesu.

W procesach przetwórstwa tworzyw polimerowych z dodatkiem różnego typu środków pomocniczych, w tym mikroporujących, duże znaczenie ma efektywność mieszania. O czym w dużym stopniu decyduje konstrukcja układu uplastyczniającego, w szczególności konstrukcja ślimaka i cylindra [5, 8, 12].

Ocena jakości procesu wytłaczania mikroporującego jest bardzo złożona. Wymaga uwzględnienia dużej liczby wskaźników bezpośrednich oraz pośrednich opisujących jakość i właściwe prowadzenie procesu [9]. Wskaźniki bezpośrednie obejmują wielkości fizyczne, charakteryzujące proces uplastyczniania tworzywa i dodanych środków mikroporujących z uwagi na stabilność procesu [15]. Pomiaru tych wielkości dokonuje się bezpośrednio w trakcie trwania procesu lub po wykonaniu stosownych obliczeń. Do wskaźników bezpośrednich zalicza się przede wszystkim wielkości określające przebieg procesu wytłaczania, strumień dostarczanego i wydzielanego ciepła, rozkład temperatury i ciśnienia, rozkład czasu przebywania tworzywa w wytłaczarce, stopień ujednorodnienia tworzywa, jednostkowe zużycie energii oraz jego właściwości reologiczne [14]. Wskaźniki pośrednie są to wielkości fizyczne opisujące w sposób szczegółowy proces uplastyczniania oraz jego niestabilność. Należą do nich fluktuacja temperatury tworzywa, pulsacja ciśnienia, homogenizacja termiczna i mechaniczna tworzywa. Poszczególne kryteria i metody oceny procesu wytłaczania mają zastosowanie w zależności od prowadzonej odmiany procesu wytłaczania [3].

Efektywność procesu wytłaczania mikroporującego oznacza zdolność układu uplastyczniającego, przetwarzającego tworzywo modyfikowane środkiem mikroporującym, do wytwarzania elementów o dobrej jakości z możliwie dużą wydajnością i sprawnością energetyczną procesu.

Celem niniejszej pracy jest ocena procesu wytłaczania na podstawie wielkości charakteryzujących jego efektywność takich jak: rozkład temperatury i ciśnienia tworzywa przetwarzanego w układzie uplastyczniającym wytłaczarki oraz głowicy wytłaczarskiej, masowe natężenie wypływu tworzywa z głowicy wytłaczarskiej (wydajność procesu), efekt Barusa, sprawność energetyczna wytłaczarki oraz sprawność energetyczna procesu wytłaczania PELD porowatego. Duże znaczenie dla oceny procesu ma także jakość otrzymanej wycieczyny określona przez stopień wymieszania polietylenu i środka porującego.

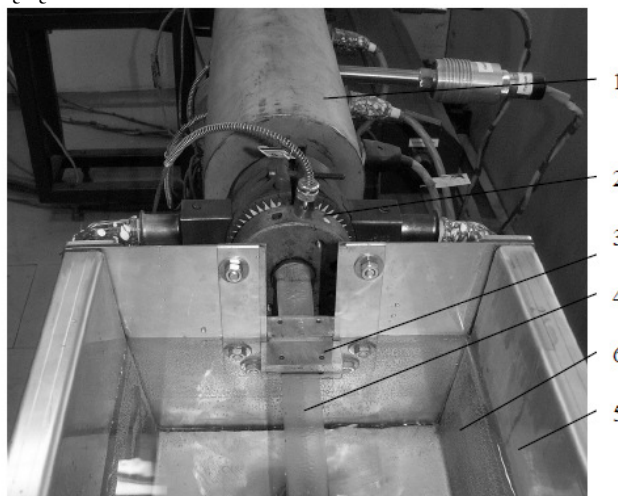
2. Stanowisko badawcze i charakterystyka badań

Proces wytłaczania mikroporującego przeprowadzono w linii technologicznej wytłaczania kształtowników (rys. 1), wyposażonej w wytłaczarkę jednoślindakową W-25D, głowicę wytłaczarską z dyszą szczelinową do wytłaczania taśmy, kalibrator, wanna chłodząca

i urządzenie odbierające. Wytłaczarka zbudowana jest z silnika, przekładni redukcyjnej oraz układu uplastyczniającego. Układ uplastyczniający wytłaczarki składa się z cylindra segmentowego zestawionego z trzech segmentów. Na wyposażeniu znajdują się różne segmenty, które złożone ze sobą tworzą trzy długości ślimaka 18D, 23D i 28D. W zestawie pierwszym, użytym do badań efektywności procesu wytłaczania PELD porowatego cylinder ma dwie strefy grzejne i zaopatrzony jest w ślimak o średnicy 25mm i długości 450mm. Napęd ślimaka realizowany jest za pomocą silnika prądu stałego o mocy 3,57 kW z bezstopniowo regulowaną liczbą obrotów, przekładni pasowej, przekładni zębatej oraz sprzęgła przeciążeniowego. Zapewnia to działanie wytłaczarki z prędkością obrotową ślimaka zmieniającą się w granicach od 0 do 5,35 s⁻¹.

Głowica wytłaczarska do wytłaczania taśmy wyposażona jest w jedną strefę grzejną z założonym grzejnikiem elektrycznym pierścieniowym, czujnikiem pomiaru ciśnienia i temperatury tworzywa oraz drugim czujnikiem temperatury - termoparą. Głowica charakteryzuje się wymienną dyszą szczelinową płaską, przy czym szerokość dyszy zastosowanej w prowadzonych badaniach wynosi 22,00 mm, zaś jej wysokość 1,40 mm.

Do badań użyto polietylenu małej gęstości PELD o nazwie handlowej Malen E FABS 23 D022 produkowanego przez Basel Polyolefins. Tworzywo przetwarzane jest przeznaczone do otrzymywania folii. Polietylen ten zawiera przeciwutleniacz, ograniczający degradację tworzywa w warunkach przetwórstwa oraz dodatki poślizgowe i antyblokingowe. Tworzywo to charakteryzuje się (według danych producenta) gęstością 922 kg/m³, nominalnym wskaźnikiem szybkości płynięcia MFR przy 190°C i 2,16kg równym 2 g/10 min, wytrzymałością na rozciąganie 18 MPa, twardością 48 °Sh oraz temperaturą mięknięcia VST (50°C/h, 10N) wynoszącą 91°C.



Rys.1. Fragment linii technologicznej do wytłaczania taśmy: 1 – układ uplastyczniający wytłaczarki, 2 – głowica wytłaczarska, 3 – układ kalibrujący, 4 – wytłaczana taśma z PELD porowatego, 5 – wanna chłodząca, 6 – woda chłodząca

Fig. 1. Fragment of technological line of tape extrusion: 1 – plasticizing system of extruder, 2 – extrusion head, 3 – calibration device, 4 – extruded porous LDPE tape, 5 – cooling device, 6 – cooling water

Polietylen małej gęstości modyfikowano specjalnym środkiem mikroporującym w postaci mikrosfer polimerowych o nazwie Expancel 950 MB 120 produkowanym przez Akzo Nobel. Stosowane mikrosfery zbudowane są z termoplastycznej kapsułki polimerowej zawierającej gaz w postaci ciekłego węgłowodoru, który pod wpływem podwyższonej temperatury zwiększa objętość mikrosfery. Polimerowa powłoka mikrosfer powstaje podczas ich wytwarzania w wyniku polimeryzacji mieszaniny akrylonitrylu i metakrylonitrylu. Do

najważniejszych cech charakteryzujących ten środek mikroporujący należą przede wszystkim gęstość $6,5 \text{ kg/m}^3$, rozmiar przed przetwórstwem od 28 do 38 μm oraz temperatura przetwórstwa $180 \div 200^\circ\text{C}$.

3. Program badań

W celu poznania wpływu mikrosfer na proces wytłaczania PELD opracowano program badań uwzględniający ilość dozowanych mikrosfer, temperaturę w układzie uplastyczniającym wytłaczarki i głowicy wytłaczarskiej, szybkość obrotową ślimaka, szybkość obrotową urządzenia odbierającego.

Proces przeprowadzono w ustalonych warunkach przetwórstwa, uwzględniających rodzaj tworzywa badanego oraz charakterystykę rozkładu środka mikroporującego. Nastawioną temperaturę o wartościach 130, 150, 180°C w poszczególnych strefach układu uplastyczniającego wytłaczarki oraz głowicy wytłaczarskiej odczytywano po ustabilizowaniu się procesu dla poszczególnych szybkości obrotowych ślimaka oraz zawartości środka mikroporującego w tworzywie przetwarzanym.

Ustalono, że ilość dozowanych mikrosfer będzie wynosić 0%, 0,1%, 0,3% i 0,5% masowego w stosunku do masy PELD. Wartości te wyznaczono na podstawie danych od producenta środka Expancel oraz własnych badań wstępnych.

W trakcie wytłaczania mikroporującego PELD zmieniano szybkość obrotową ślimaka wytłaczarki, która wynosiła 50, 100 i 150 obr/min. Szybkość obrotowa wałków odciągających urządzenia odbierającego wynosiła odpowiednio 4, 8 i 15 obr/min.

W ramach założonego programu badań efektywności procesu wytłaczania mikroporującego wykonano pomiary temperatury rzeczywistej tworzywa w układzie uplastyczniającym wytłaczarki i głowicy wytłaczarskiej, ciśnienia tworzywa w układzie uplastyczniającym i w głowicy wytłaczarskiej, masy oraz wymiarów wytłoczonych odcinków pomiarowych, czasu wytłaczania odcinka pomiarowego oraz czasu poboru energii elektrycznej pobieranej przez wytłaczarkę.

Po przeprowadzeniu szeregu obliczeń wyznaczono masowe natężenie wpływu wycieczyny z głowicy wytłaczarskiej, będące miarą wydajności procesu wytłaczania mikroporującego, przyrost entalpii właściwej tworzywa, strumień energii doprowadzonej do wytłaczarki i głowicy wytłaczarskiej, strumień ciepła przenoszonego przez tworzywo, sprawność energetyczną wytłaczarki i procesu wytłaczania mikroporującego. Wyznaczenie powyższych wielkości jest istotne z punktu widzenia zachodzących zmian właściwości fizycznych oraz struktury otrzymanej wycieczyny mikroporowatej.

Badania efektu Barusa, wykonane w celu określenia rozszerzanie się strumienia wycieczyny wypływającej z dyszy głowicy wytłaczarskiej w wyniku różnic naprężeń normalnych powstających przy przepływie tworzywa. Pomiary efektu Barusa wykonano po ochłodzeniu wycieczyny w temperaturze normalnej. Wartość tego efektu wyznaczano z zależności, będącej stosunkiem pola przekroju poprzecznego wycieczyny do pola przekroju poprzecznego dyszy, wyrażonej w procentach.

Aby właściwie określić jakość procesu wytłaczania mikroporującego oraz stopień wymieszania polietylenu i mikrosfer ocenie poddano również strukturę otrzymanej wycieczyny mikroporowatej poprzez wykonanie zdjęć mikroskopowych.

4. Wyniki badań

Badania rozkładu temperatury tworzywa (tab. 1) w układzie uplastyczniającym wytłaczarki i głowicy wytłaczarskiej wykazały, że w wyniku dodania mikrosfer do PELD nastąpiły różnice temperatury. Największy wzrost temperatury o ok. 40% zaobserwowano

przy dozowaniu 0,1% mikrosfer bez względu na zmianę szybkości obrotowej ślimaka wylączarki. Przy dalszym zwiększaniu zawartości mikrosfer w tworzywie w ilości 0,3% i 0,5% mas. również następuje zmiana temperatury tworzywa w stosunku do temperatury nastawionej, jednak wzrost ten nie jest już tak intensywny i wynosi ok. 9%.

Tabela 1. Wyniki pomiaru temperatury i ciśnienia tworzywa w układzie uplastyczniającym wylączarki (I, II) i w głowicy wylączarskiej(III)

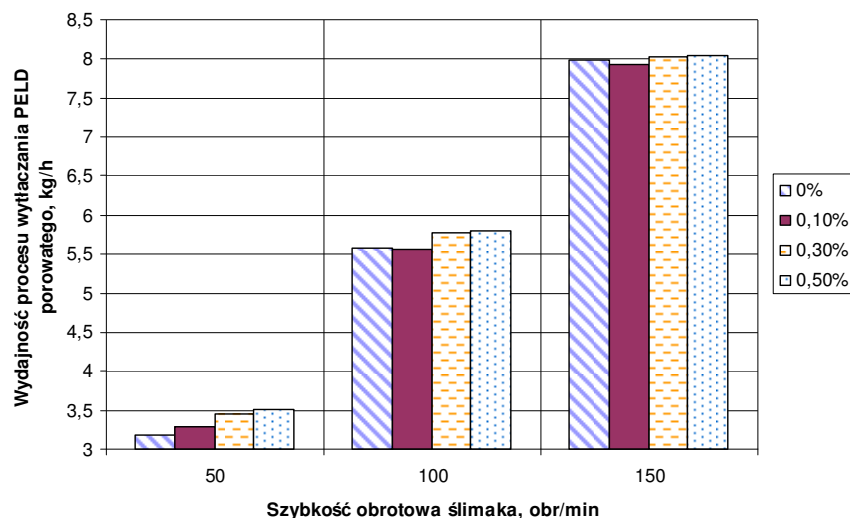
Table 1. Research results of plastic temperature and pressure in extruder plasticizing system (I, II) and extrusion head (III)

Lp.	Dozowanie mikrosfer, %	Szybkość obrotowa ślimaka, obr/min	Temperatura w układzie uplastyczniającym i głowicy wylączarskiej, °C			Ciśnienie w układzie uplastyczniającym i głowicy wylączarskiej, MPa	
			I	II	III	I	III
1.	0	50	128,8	154,4	175,1	17,1	2,0
		100	129,5	154,6	175,6	10,3	2,6
		150	131,6	159,6	179,6	9,9	3,4
2.	0,1	50	142,6	186,2	181,7	16,9	2,0
		100	143,6	186,8	178,0	12,9	2,4
		150	143,8	179,4	177,9	10,9	2,8
3.	0,3	50	140,5	175,5	200,0	18,8	1,2
		100	139,8	163,1	190,0	11,5	2,4
		150	142,4	165,3	198,6	9,9	2,3
4.	0,5	50	132,1	162,5	187,0	12,4	1,1
		100	140,0	169,4	197,9	10,9	1,7
		150	141,0	169,0	199,0	7,0	2,0

Gwałtowny wzrost temperatury tworzywa w pierwszej strefie układu uplastyczniającego, występujący po dodaniu mikrosfer może wynikać z zastosowania w badaniach wylączarki o innowacyjnej konstrukcji, zapewniającej bardzo intensywne procesy mieszania tworzywa. W trakcie procesu, nagrzewanie tworzywa odbywało się za pomocą grzejników elektrycznych umieszczonych na cylindrze wylączarki. Jednak po ustabilizowaniu procesu, osiągnięciu pewnej wartości temperatury i szybkości obrotowej ślimaka 100obr/min proces wylączania w drugiej strefie układu uplastyczniającego zaczynał być autotermiczny [11], tj. generowanie ciepła niezbędnego do uplastyczniania tworzywa zachodziło na skutek tarcia zewnętrznego granulek tworzywa o siebie i powierzchnie robocze cylindra i ślimaka oraz tarcia wewnętrznego makrocząsteczek tworzywa i dodanego środka porotwórczego. Powoduje to znaczący wzrost temperatury tworzywa wraz ze wzrostem szybkości obrotowej ślimaka wylączarki.

W przypadku pomiarów ciśnienia (tab. 1) tworzywa w układzie uplastyczniającym wylączarki i głowicy wylączarskiej ciśnienie to wzrasta a następnie gwałtownie spada w głowicy wylączarskiej, co jest zgodnie z danymi dostępnymi w literaturze [14]. W wyniku zwiększania szybkości obrotowej ślimaka wylączarki ciśnienie tworzywa w układzie uplastyczniającym maleje o średnio o 30% wraz ze wzrostem szybkości obrotowej ślimaka z 50 do 100 obr/min oraz o 17% podczas kolejnego zwiększenia szybkości obrotowej ślimaka do 150 obr/min. Ciśnienie tworzywa w głowicy wylączarskiej wzrasta z małą intensywnością wraz ze wzrostem szybkości obrotowej ślimaka. Na zmiany ciśnienia tworzywa w układzie uplastyczniającym wylączarki i głowicy wylączarskiej nie ma wpływu zawartość mikrosfer lub wpływ ten jest bardzo mały.

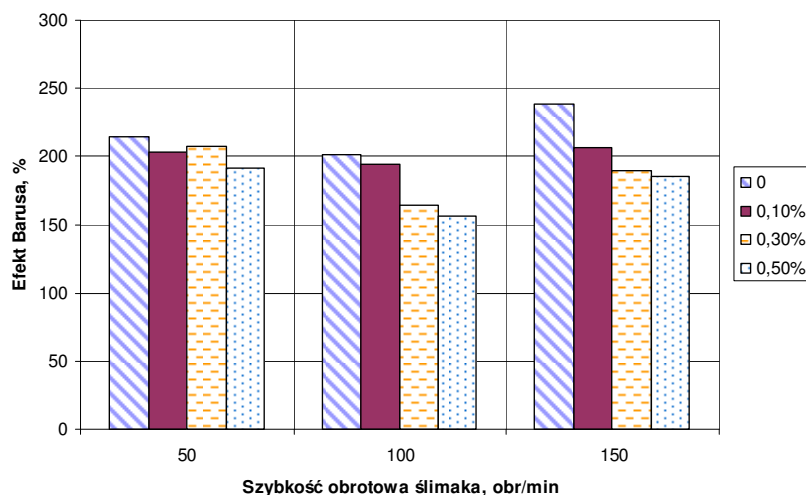
Badania przebiegu wytłaczania mikroporującego pozwoliły na wyznaczenie wydajności tego procesu oraz określenie występującego efektu Barusa. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów sporządzono zależności badanych wielkości, opisanych w programie badań, w funkcji szybkości obrotowej ślimaka wyciarkarki, które zostały przedstawione na rys. 2 ÷ 5.



Rys. 2. Zależność wydajności procesu wytłaczania mikroporującego PELD od szybkości obrotowej procesu i zawartości mikrosfer w tworzywie

Fig. 2. Dependence of efficiency of LDPE microcellular extrusion on screw rotational speed and content of microspheres

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów można stwierdzić, że w miarę zwiększania szybkości obrotowej ślimaka wydajność procesu wytłaczania mikroporującego wzrasta średnio o około 30 %. Dodatkowo wraz ze zwiększaniem zawartości mikrosfer w PELD następuje stopniowy nieznaczny wzrost wydajności prowadzonego procesu. Dla szybkości obrotowej ślimaka 50 obr/min wydajność procesu wzrasta o 3,4% dla dozowania 0,1%, 4,7% dla dozowania 0,3% oraz 1,5% dla dozowania 0,5%. Przy większych szybkościach obrotowych ślimaka wydajność procesu zmienia się nieznacznie wraz ze zwiększaniem dozowania mikrosfer w PELD.

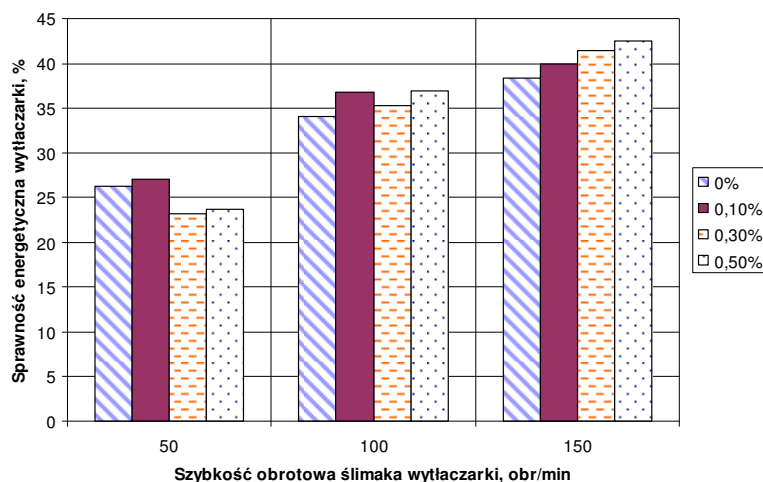


Rys. 3. Zależność efektu Barusa od szybkości obrotowej ślimaka wyciarkarki i zawartości mikrosfer w PELD

Fig. 3. Dependence of Barus effect on screw rotational speed and content of microspheres in LDPE

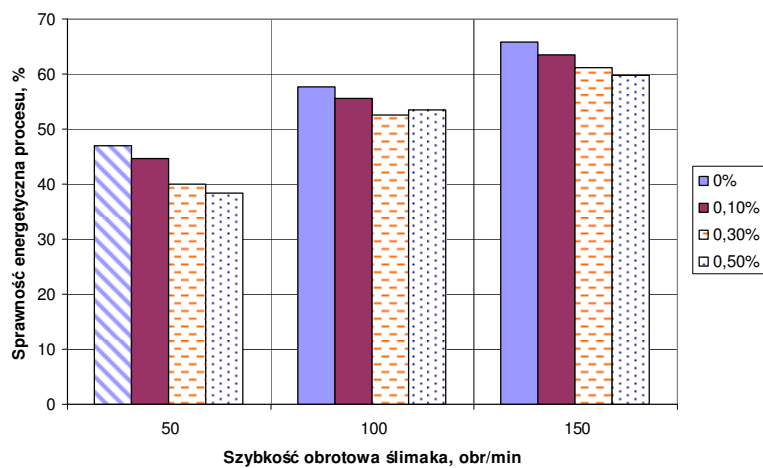
Badania efektu Barusa wykazały nieznaczne rozszerzenie się strumienia wytłoczonego z głowicy wylączarskiej jedynie przy szybkości obrotowej ślimaka wylączarki wynoszącej 150 obr/min. W wyniku zwiększania dozowania mikrosfer w PELD obserwuje się stopniowy spadek tego efektu, który może być związany ze zmniejszeniem ilości wytłoczonego tworzywa, które towarzyszy procesom porowania. Przy szybkości obrotowej ślimaka 50 obr/min efekt Barusa zmienia się o 5,3% dla dozowania 0,1% dla dozowania 0,3% i 8% dla dozowania 0,5%. Przy szybkości obrotowej ślimaka 100 obr/min wartość efektu spada o 3,1% dla dozowania 0,1%, 12,4% dla dozowania 0,3% i 5% dla dozowania 0,5%. Największe zmiany efektu Barusa występują przy szybkości obrotowej ślimaka 150 obr/min i wynoszą 13,4% dla dozowania 0,1%, 8,6% dla dozowania 0,3% oraz 2% dla dozowania 0,5%.

Pomiary strumienia ciepła przeniesionego przez PELD zawierającego mikrosfery oraz strumienia energii dostarczonej do maszyny pozwoliły na wyznaczenie sprawności energetycznej wylączarki (rys. 4) oraz procesu wytłoczenia (rys. 5).



Rys. 4. Zależność sprawności energetycznej wylączarki od szybkości obrotowej ślimaka i zawartości mikrosfer w PELD

Fig. 4. Dependence of extruder machine energy efficiency on screw rotational speed and content of microspheres in LDPE



Rys. 5. Zależność sprawności energetycznej procesu wytłoczenia PELD porowatego od szybkości obrotowej ślimaka i zawartości mikrosfer

Fig. 5. Dependence of extrusion process of porous LDPE energy efficiency on screw rotational speed and content of microspheres

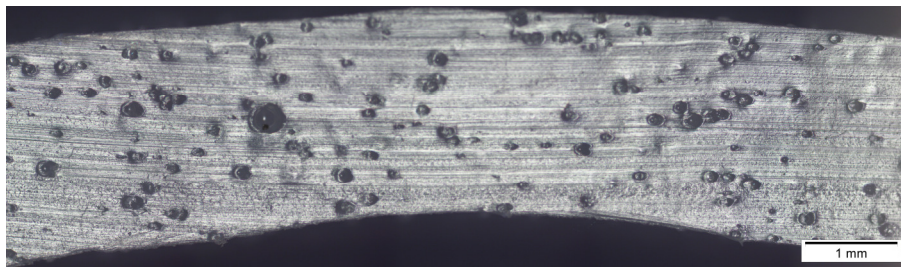
Badania eksperymentalne wykazały stopniowy wpływ obu czynników zmiennych tj. dozowania mikrosfer oraz szybkości obrotowej ślimaka na wartość sprawności energetycznej wylączarki i procesu. Wraz ze wzrostem szybkości obrotowej ślimaka wzrasta sprawność energetyczna zarówno wylączarki, jak i procesu wylączania PELD porowatego, co potwierdzają informacje z literatury [10]. Sprawność energetyczna procesu wylączania wzrasta o około 20% przy zwiększeniu szybkości obrotowej ślimaka do 100 obr/min oraz o około 15% przy szybkości 150 obr/min. W przypadku sprawności energetycznej wylączarki wzrost ten wynosi 20% przy szybkości 100 obr/min oraz 11% przy szybkości 150 obr/min.

Jednocześnie dodanie mikrosfer do polietylenu spowodowało stopniowy spadek sprawności energetycznej procesu wylączania w całym zakresie zmienianej szybkości obrotowej ślimaka wylączarki. Może być to wynikiem charakterystyki mikrosfer, które w celu zwiększenia swoich wymiarów pobierają ciepło od uplastycznionego tworzywa.

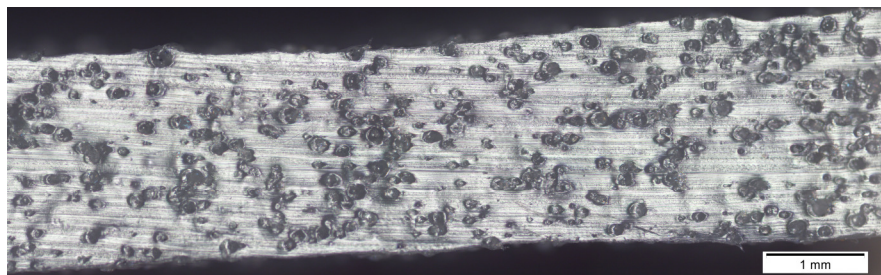
Na skutek dodania do polietylenu środka mikroporującego w postaci mikrosfer otrzymano wytłoczinę w postaci taśmy o strukturze mikroporowatej. Wygląd przykładowych próbek w przekroju poprzecznym przedstawiono na rysunku 6. Na wykonanych obrazach mikroskopowych widoczne są mikropory o różnej średnicy i rozkładzie. Największe zróżnicowanie wymiarów mikroporów występuje przy najmniejszym dozowaniu 0,1%, co może być spowodowane większą możliwością rozrostu mikrosfer w tworzywie litym. Zwiększanie ilości dozowanych mikrosfer powodowało ograniczenie rozrostu ze względu na ich liczbę w wytłoczynie.

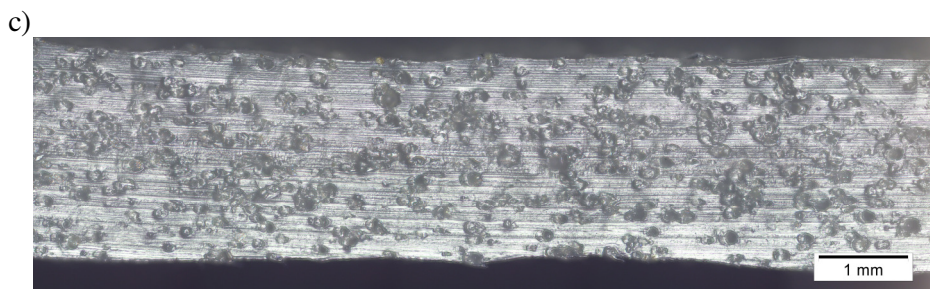
Na podstawie oceny struktury otrzymanej wytłoczyny mikroporowatej można stwierdzić, że stopień wymieszania tworzywa i mikrosfer nie jest wystarczający. Nowopowstała struktura nie jest jednorodna w całym przekroju wytłoczyny, co może wpływać na poszczególne właściwości fizyczne wytworu. Konieczne jest zastosowanie dodatkowych urządzeń np. dozownika umożliwiającego dozowanie poroforu w bardzo małych ilościach lub zmiany konstrukcji ślimaka.

a)



b)





Rys. 6. Wygląd struktury fizycznej wytłoczyny mikroporowatej (przekrój poprzeczny) otrzymanej przy szybkości obrotowej ślimaka 50 obr/min i o zawartości mikrosfer: a) 0,1%, b) 0,3%, c) 0,5%

Fig. 6. View of microporous extrudate physical structure (cross section) obtained with screw rotational speed of 50 rpm and with content of microspheres: a) 0,1%, b) 0,3%, c) 0,5%

5. Podsumowanie

Analizując efektywność procesu wytłaczania mikroporującego należy wziąć pod uwagę szereg czynników, wpływających na przebieg i jakość procesu. Do najważniejszych należy zaliczyć przede wszystkim zmiany temperatury w układzie uplastyczniającym wytłaczarki oraz w głowicy wytłaczarskiej oraz towarzyszące temu wahania ciśnienia, zmiany szybkości obrotowej ślimaka oraz zwiększane dozowanie mikrosfer zawartych w tworzywie przetwarzanym.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że polietylen małej gęstości modyfikowany środkiem mikroporującym w postaci mikrosfer wytłacza się najefektywniej przy szybkości obrotowej ślimaka wytłaczarki wynoszącej 150 obr/min oraz dozowaniu 0,5% mikrosfer. Wynika to z najniższych zmian temperatury i ciśnienia tworzywa, co korzystnie wpływa na stopień wymieszania, najmniejszy efekt Barusa, największą wydajność oraz sprawność energetyczną procesu i wytłaczarki.

Prezentowane wyniki badań dotyczące zmian temperatury i ciśnienia uplastycznionego tworzywa, jak również zależności wydajności, sprawności energetycznej wytłaczarki i procesu wytłaczania mikroporującego w funkcji szybkości obrotowej ślimaka mają swoje odzwierciedlenie w literaturze. Jednak zmiany badanych sprawności w funkcji ilości dozowanych mikrosfer wskazują na konieczność szerszej analizy wpływu środków mikroporujących na poszczególne parametry przeprowadzonego procesu, uwzględniającej inny sposób dozowania środka, konstrukcję ślimaka wytłaczarki czy rozkład czasu przebywania tworzywa w układzie uplastyczniającym.

Podczas oceny efektywności tego procesu trzeba wziąć pod uwagę jego wydajność, na którą wpływa znacząco obniżenie masy wytłoczyny, wynikające z dodania do tworzywa środka mikroporującego. Zmiany te wynikają z ilości strumienia energii doprowadzanego do wytłaczarki i głowicy wytłaczarskiej, strumienia ciepła (mocy cieplnej) przenoszonego przez tworzywo w układzie uplastyczniającym, entalpii właściwej tworzywa, strumienia energii grzejników cylindra wytłaczarki i głowicy wytłaczarskiej oraz mocy mechanicznej doprowadzonej do wału ślimaka. Wartości powyższych czynników znacząco wpływają na sprawność energetyczną wytłaczarki i samego procesu, które obok zmian temperatury i ciśnienia, jak również stopnia wymieszania tworzywa i środka mikroporującego są podstawowymi kryteriami oceny efektywności procesu wytłaczania mikroporującego.

Literatura

1. Bieliński M. Techniki porowania tworzyw termoplastycznych. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 2004; 10-25.
2. Garbacz T, Tor A. Wpływ zawartości środka porującego na właściwości użytkowe zewnętrznych powłok kabli. *Polimery* 2007; 52; 4: 286-293.
3. Iwko J.: Wybrane problemy procesu wytłaczania tworzyw polimerowych cz. 1. *PlastNews* 2008; 7/8; 52-55.
4. Jonsson L., Rosskothén K.R. Mikrosphären - ein universelles treibmittel. *Kunststoffe – Plast Europe* 2003; 7: 86-87.
5. Kelly A.L., Brown E.C., Coates P.D.: The effect of screw geometry on melt temperature profile in single screw extrusion. *Polymer Engineering and Science* 2006; 46; 2; 1706-1714.
6. Klepka T.: Efektywność wytłaczania polimerowych, specjalnych warstw ślizgowych. *Polimery* 2002; 47; 9; 649-653.
7. Klepka T. Charakterystyka stanu powierzchni specjalnych warstw ślizgowych utworzonych w procesie wytłaczania. *Polimery* 2004; 49; 2: 123-127.
8. Kracalik M., Laske S., Gschweidl M., Friesenbichler W., Langecker G.R.: Advances compounding: extrusion of polypropylene nanocomposites using the melt pump. *Journal of Applied Polymer Science* 2009; 113; 3; 1422-1428.
9. Schneider H.P.: Improved efficiency and quality trends in PVC profile and pipe extrusion. *Kunststoffe – Plast Europe* 2000; 90; 10; 42-45.
10. Sikora J. W.: Charakterystyka badań sprawności energetycznej procesu wytłaczania i wytłaczarki. *Polimery* 1999; 3; 190-197.
11. Sikora, J. W., Sasimowski E.: Influence of the length of the plasticating section on the selected characteristics of an autothermal extrusion process. *Advances in Polymer Technology* 2005; 24; 1; 21-28.
12. Sikora J. W.: Increasing the efficiency of extrusion process. *Polymer Engineering and Science* 2008; 48; 9; 1678-1682.
13. Stasiak J.: Eksperymentalne metody oceny jakości procesu wytłaczania. *Polimery* 1996; 1; 15-21.
14. Stasiak J.: Wytłaczanie tworzyw polimerowych. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno – Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2007; 93-108.
15. Tor-Świątek A., Samujło B.: Use of thermo vision research to analyze the thermal stability of microcellular extrusion process of poly(vinyl chloride). *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15; 1; 58-61.