



UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY  
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH  
W BYDGOSZCZY

## **ROZPRAWY NR 169**

Dariusz Sykutera

# **BADANIA PROCESÓW CIĘCIA I PODATNOŚCI NA ROZDRABNIANIE POLIOLEFIN POROWATYCH W ASPEKCIE ICH WTÓRNEGO PRZETWÓRSTWA**

BYDGOSZCZ – 2013

REDAKTOR NACZELNY  
prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski

REDAKTOR DZIAŁOWY  
dr hab. inż. Tomasz Piątkowski, prof. nadzw. UTP

OPINIODAWCY  
prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski  
prof. dr hab. inż. Józef Koszkul

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE  
mgr Dorota Ślachciak, mgr Tomasz Szałajda

© Copyright  
Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego  
Bydgoszcz 2013

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany  
ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych,  
kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody  
posiadacza praw autorskich.

Praca powstała przy wsparciu projektu  
„Realizacja II etapu Regionalnego Centrum Innowacyjności”  
współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego  
w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego  
Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007-2013

ISBN 978-83-61314-99-8  
ISSN 0209-0597

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego  
ul. Ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 3749426  
e-mail: [wydawucz@utp.edu.pl](mailto:wydawucz@utp.edu.pl)    <http://www.wu.utp.edu.pl>

---

Wyd. I. Nakład 88 egz. Ark. aut. 10,3. Ark. druk. 9,5.  
Oddano do druku i druk ukończono w sierpniu 2013  
Uczelniany Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. Ks. A. Kordeckiego 20

Składam serdeczne podziękowania Współpracownikom z Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy za twórcze i konstruktywne dyskusje oraz wsparcie w trudnych momentach realizacji rozprawy.

Dziękuję Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za pomoc finansową w ramach projektu N508 442236, bez której praca w takim zakresie by nie powstała.





## Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń .....	7
<b>1. WPROWADZENIE .....</b>	<b>9</b>
<b>2. STAN WIEDZY W ZAKRESIE ROZDRABNIANIA POLIOLEFIN POROWATYCH, HIPOTEZA, CELE I ZAKRES PRACY .....</b>	<b>14</b>
<b>3. STANOWISKA DO BADAŃ PROCESÓW CIĘCIA I ROZDRABNIANIA .....</b>	<b>27</b>
<b>4. PIERWOTNE WYTWARZANIE I WŁAŚCIWOŚCI POLIOLEFINOWYCH TWORZYW POROWATYCH .....</b>	<b>40</b>
4.1. Próbkki polimerowych materiałów porowatych wytworzonych metodą wtryskiwania porującego .....	40
4.2. Próbkki polimerowych materiałów porowatych wytworzonych metodą wytłaczania porującego .....	41
4.3. Ocena struktury i właściwości fizycznych materiałów przygotowanych do badania procesów cięcia i rozdrabniania .....	44
4.3.1. Metodyka badań .....	44
4.3.2. Wyniki badań .....	48
4.3.2.1. Gęstość .....	48
4.3.2.2. Zawartość fazy krystalicznej .....	50
4.3.2.3. Wytrzymałość na rozciąganie .....	52
4.3.2.4. Udarność .....	56
4.3.2.5. Twardość .....	57
<b>5. BADANIA PROCESU CIĘCIA POLIOLEFIN POROWATYCH OTRZYMANÝCH W PIERWOTNYM PRZETWÓRSTWIE .....</b>	<b>60</b>
5.1. Metodyka badań .....	60
5.2. Analiza wyników badania cięcia .....	61
5.2.1. Cięcie próbek porowatego polipropylenu .....	61
5.2.2. Cięcie próbek porowatego polietylenu małej gęstości .....	71
5.2.3. Cięcie polietylenu modyfikowanego przez porowanie fizycznie .....	80
<b>6. BADANIA PODATNOŚCI NA ROZDRABNIANIE POLIOLEFIN POROWATYCH .....</b>	<b>84</b>
6.1. Warunki realizacji prób rozdrabniania .....	84
6.2. Badanie rozdrabniania polietylenu małej gęstości przy zmiennym udziale poroforów .....	87
6.2.1. Rozdrabnianie wyprasek wtryskowych .....	87
6.2.2. Rozdrabnianie próbek wytłaczanych .....	92
6.3. Badania rozdrabniania polipropylenu przy zmiennym udziale poroforów .....	97
6.3.1. Rozdrabnianie wyprasek wtryskowych .....	97
6.3.2. Rozdrabnianie próbek wytłaczanych .....	102

<b>7. WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE WYTWORÓW OTRZYMANYCH Z RECYKLATÓW POROWATYCH .....</b>	<b>107</b>
7.1. Stanowiska do wtryskiwania i wytłaczania recyklatów .....	107
7.2. Parametry procesu przetwórstwa recyklatów .....	111
7.2.1. Proces wtryskiwania .....	111
7.2.2. Proces wytłaczania .....	112
7.2.3. Parametry procesu wtryskiwania zrealizowanego w warunkach przemysłowych .....	112
7.3. Stanowiska badawcze do oceny właściwości fizycznych wytworów otrzymanych z recyklatów .....	113
7.4. Wyniki badań materiałowych dla wyprasek otrzymanych z recyklatów .....	116
7.4.1. Gęstość .....	116
7.4.2. Zawartość fazy krystalicznej .....	118
7.4.3. Wytrzymałość na rozciąganie .....	120
7.4.4. Udarność .....	125
7.4.5. Twardość .....	127
7.5. Właściwości wytłocznyn uzyskanych z recyklatów tworzyw porowatych .....	129
7.5.1. Gęstość .....	129
7.5.2. Oznaczenie właściwości mechanicznych .....	130
7.6. Wyniki prób wykonanych w warunkach eksperymentu przemysłowego .....	131
<b>8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE .....</b>	<b>137</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>141</b>
Streszczenie .....	150
Summary .....	151

## Wykaz ważniejszych oznaczeń

Dotyczące tworzyw polimerowych:

PELD	–	polietylen małej gęstości
wPELD	–	wytłoczyny z polietylenu małej gęstości
rPELD	–	recyklat otrzymany z polietylenu małej gęstości
xPE	–	polietylen modyfikowany przez porowanie fizyczne
PP	–	polipropylen
wPP	–	wytłoczyny z polipropylenu
rPP	–	recyklat otrzymany przez rozdrobnienie polipropylenu
BD	–	wypraska uzyskana bez stosowania w procesie wtryskiwania docisku
PVC	–	poli(chlorek winylu)
TPE	–	termoplastyczny elastomer poliestrowy,
TPU	–	termoplastyczny elastomer poliuretanowy
$R_m$	–	wytrzymałość na rozciąganie, MPa
$\varepsilon_m$	–	wydłużenie względne przy osiągnięciu wytrzymałości na rozciąganie, %
$\sigma$	–	naprężenie rozciągające w próbie statycznego rozciągania, MPa
$\varepsilon$	–	odkształcenie względne w próbie statycznego rozciągania, %
$\Delta H_x$	–	entalpia topnienia, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
$K_{\%x}$	–	stopień krystaliczności, %

Dotyczące badania procesów cięcia i rozdrabniania:

$\alpha_r, \alpha_s$	–	kąty przyłożenia noży: ruchomego i nieruchomego, °
$\beta_r, \beta_s$	–	kąty ostrza noży: ruchomego i nieruchomego, °
$\gamma_r, \gamma_s$	–	kąty natarcia noży: ruchomego i nieruchomego, °
$\lambda$	–	kąt pochylenia krawędzi tnącej noża ruchomego w stosunku do krawędzi tnącej noża stałego, równoległej do osi wirnika, °
s	–	wartość szczeliny międzynożowej, odległość pomiędzy krawędziami tnącymi noży: ruchomego i nieruchomego, °
b	–	szerokość ciętego materiału, mm
g	–	grubość ciętego materiału, mm
$F_c$	–	wypadkowa siła cięcia, N
$F_d$	–	siła deformacji materiału, N
$F_p$	–	siła przemieszczenia materiału, N
$F_s$	–	siła spychająca, N
$F_r$	–	siła rozdzielania, N
$F_t$	–	siła tarcia, N
$v_c$	–	prędkość obwodowa noży ruchomych, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$L_1$	–	praca cięcia, J
n	–	prędkość obrotowa części roboczej urządzenia, $\text{s}^{-1}$
PVD	–	powłoka utworzona przez fizyczne osadzanie z fazy gazowej (ang. Physical Vapour Deposition)

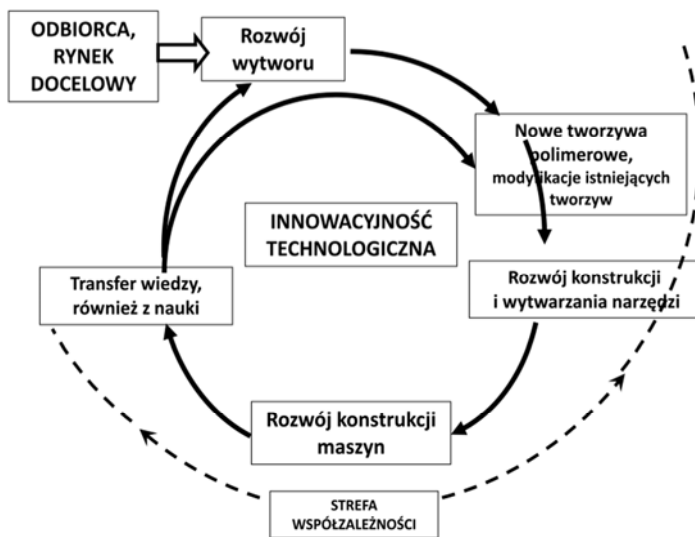
Dotyczące badań właściwości recyklatów:

$d_p$	–	średnica ziarna, mm
$d_{p50,3}$	–	średnica medialna rozkładu ziarnowego, mm

H	–	suma względnych odsiewów, %
$l_{\max}$	–	maksymalny projekcyjny wymiar liniowy ziarna, mm
$l_{\min}$	–	minimalny projekcyjny wymiar liniowy ziarna, mm
m	–	masa próbki, g
$\Delta m_i$	–	odsiew na i-tym sicie, g
$q_3(d_p)$	–	masowa gęstość rozkładu,
$Q_3(d_p)$	–	masowa suma rozkładu, %
P	–	obwód projekcyjny ziarna, mm
S	–	powierzchnia projekcyjna ziarna, mm <sup>2</sup>
$W_{rp}$	–	współczynnik rozwinięcia powierzchni ziaren rzeczywistych
$W_w$	–	współczynnik wydłużenia
$\sigma_c$	–	rozrzut uziarnienia
$m_c$	–	współczynnik kierunkowy prostej sumy rozkładu ziarnowego na siatce rozkładu normalnego
$b_c$	–	punkt przecięcia prostej sumy rozkładu ziarnowego na siatce rozkładu normalnego
$\sigma$	–	odchylenie standardowe rozkładu normalnego

# 1. WPROWADZENIE

Tworzywa polimerowe stanowią stosunkowo nową grupę materiałów. Wytwarzanie i przetwórstwo tych surowców z tempem przyrostu wolumenu około 9% mas. rocznie stanowi jedną z najbardziej dynamicznie rozwijających się gałęzi przemysłu [156, 157]. Według UNIDO tworzywa oparte na związkach wielkocząsteczkowych zostały uznane za najbardziej ekspansywnie rozwijającą się dziedzinę technik materiałowych na świecie [164]. W przetwórstwie polimerów innowacyjność technologiczna, maszynowa, produktowa, materiałowa i organizacyjna są ze sobą ściśle związane. To wzajemne, pozytywne oddziaływanie buduje w szybkim tempie spiralę wzrostu tego sektora przemysłu (rys. 1.1).

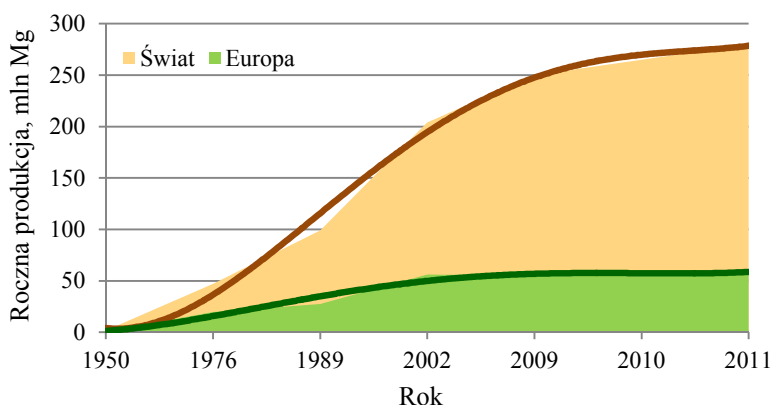


Rys. 1.1. Spirala współzależności innowacyjnej w procesach przetwórstwa tworzyw polimerowych [wg 164]

Poziom zaawansowania współczesnego przetwórstwa tworzyw polimerowych, którego celem jest wytworzenie konkurencyjnego na rynku wytworu, stanowi wypadkową wzajemnych relacji pomiędzy maszyną przetwórczą, narzędziem, procesem i przetwarzanym materiałem [8, 11, 12, 18-20, 29, 69, 72, 116]. W każdej z tych dziedzin obserwuje się znaczący postęp i silne oddziaływanie na pozostałe, dopełniające obszary, tworzące wspólnie innowacyjne wytwarzanie wytworów z tworzyw polimerowych. Rozwój w sterowaniu maszyn przetwórczych umożliwił wdrożenie wielu nowych technologii przetwarzania polimerów, zwłaszcza dotyczy to procesu wtryskiwania [19, 30, 143 164]. Na obecnym poziomie rozwoju technologii wtryskiwania istnieje ponad 100 odmian jej realizacji, wśród nich wtryskiwanie porujące, mikroporujące czy też wtryskiwanie ze wspomaganie gazem obojętnym lub cieczą [8-11, 14, 15, 18-23, 26, 52, 56, 74, 99, 107, 111, 119]. Rozwój technik przetwórstwa jest także wynikiem wprowadzania na rynek nowych rodzajów tworzyw lub modyfikacji istniejących, a także wdrażania metod numerycznych do wspomaganie prac inżynierskich w obszarze

konstrukcji narzędzi, projektowania wytworów czy technologii wytwarzania. Warto choćby wspomnieć o programach do symulacji procesu wtryskiwania [18, 70, 71, 76, 98, 133, 143, 144, 152]. Te współczesne narzędzia inżynierskie kryją w sobie skomplikowane algorytmy matematyczne, które opracowano na podstawie dotychczasowej wiedzy dotyczącej reologii polimerów i opisów zachowania się tworzyw pod wpływem oddziaływania obciążenia w zmiennych warunkach otoczenia.

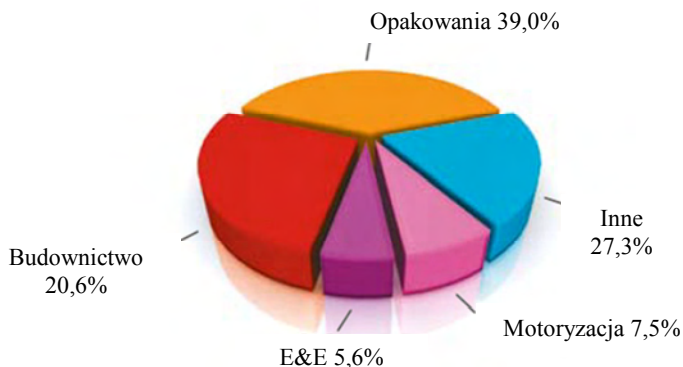
W 2011 roku wyprodukowano na świecie około 280 mln Mg tworzyw polimerowych, a w Europie 58,8 mln Mg (rys. 1.2). Branża przetwórstwa tworzyw kontynuowała zatem obserwowany w ciągu ostatnich lat dynamiczny wzrost produkcji. Z tego powodu w 2011 roku jednym z najważniejszych filarów gospodarki europejskiej było wytwarzanie granulatów polimerowych i ich przetwórstwo. Zapotrzebowanie europejskich przetwórców na te materiały wzrosło do poziomu 47 mln Mg, co oznacza wzrost o 1,1% w stosunku do roku 2010 [156, 157]. Warto dodać, że duża część produkcji wytworów polimerowych w państwach UE to zaawansowane technologicznie przetwarzanie tworzyw masowych i konstrukcyjnych w postaci innowacyjnych wytworów (np. inteligentne opakowania, barierowe folie wielowarstwowe, wytwory o wąskim polu tolerancji wykonania, mikrowypraski, wytwory kompozytowe).



Rys. 1.2. Rozwój produkcji tworzyw polimerowych na świecie i w Europie [wykres sporządzono na podstawie 156, 157]

Zważywszy, że w 1950 roku światowa produkcja tworzyw polimerowych wyniosła około 1,5 miliona Mg, obecny stan wykorzystania tych materiałów wydaje się imponujący. Największym odbiorcą granulatów od kilku lat są producenci opakowań, ich obecne zapotrzebowanie utrzymuje się na poziomie około 39% mas. całkowitego rocznego zapotrzebowania (rys. 1.3). Na drugim miejscu znajduje się budownictwo – ponad 20% oraz przeżywająca wahania koniunktury motoryzacja, z 7,5% zużyciem tworzyw w skali europejskiej [156, 157]. Biorąc pod uwagę ilość tworzyw polimerowych wykorzystywanych w opakownictwie, budownictwie i przemyśle samochodowym, nasuwa się wniosek, że to właśnie te sektory rynku wytwórczego są źródłem powstawania innowacyjnych wytworów przy zastosowaniu efektywnych technologii.

Przeprowadzona analiza produktów generowanych przez te branże na współczesnym rynku wskazuje na coraz większe wykorzystywanie tworzyw termoplastycznych o strukturze polimerowo-gazowej (rys. 1.4).



Rys. 1.3. Wykorzystanie tworzyw polimerowych przez największe branże przemysłowe [156]

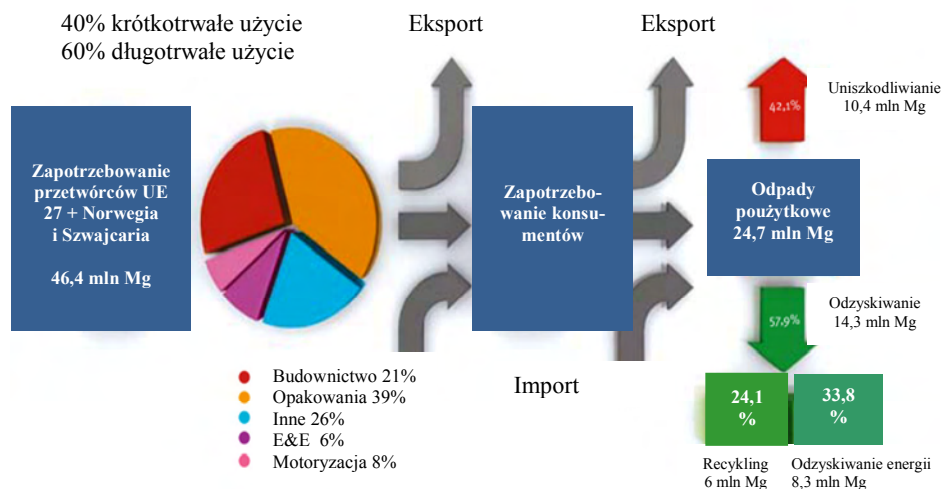


Rys. 1.4. Wykorzystanie termoplastycznych tworzyw porowatych w różnych segmentach rynku (rysunek własny na podstawie zdjęć własnych oraz materiałów firmy Engel)

Jest to zgodne ze światowymi tendencjami modyfikacji materiałów pod kątem redukcji ich gęstości, a także z podejmowaniem działań w kierunku obniżania emisyjności CO<sub>2</sub> i wdrażania procedur środowiskowych (np. LCA) [6, 7, 13, 24, 28, 33, 45, 49, 54, 62, 73, 82, 105, 108, 114, 165]. Wprowadzanie tworzyw termoplastycznych porowatych i tworzyw kompozytowych do produkcji części samochodowych przyczyniło się do zmniejszenia masy współczesnych pojazdów, a więc także do redukcji zużycia paliwa [69, 72].

W opakowalnictwie od wielu lat stosuje się polimerowe materiały porowate, głównie w postaci styropianu i poliuretanu. Jednak trudności z recyklingiem materiałowym obu tworzyw spowodowały, że jako zamiennik od kilku lat stosuje się poliolefinowe i polistyrenowe tworzywa porowate, uzyskane głównie metodą porowania fizycznego [8].

Wydaje się, że rozwój produktów o strukturze polimerowo-gazowej wykonanych z tworzyw termoplastycznych będzie zgodny ze spiralą innowacyjności (rys. 1.1), ponieważ wpisuje się także w tendencje obserwowane w dziedzinie recyklingu tworzyw polimerowych w Europie. Zapobieganie powstawaniu odpadów i recykling (*Waste prevention and recycling*) jest obszarem tematycznym wpisanym do strategii Unii Europejskiej na najbliższe lata [33]. W ramach tematów zawartych w rozporządzeniach UE wskazuje na zasadność używania materiałów wtórnych, powstałych z recyklingu opakowań do produkcji nowych produktów, a także nakłania producentów do wprowadzania na rynek wytworów o zredukowanej masie i wymiarach, jednocześnie podatnych na recykling i ponowne wykorzystanie. Gromadzenie odpadów polimerowych na wysypiskach jest ekonomicznie nieuzasadnione, a obecnie nawet zakazane w niektórych krajach europejskich. W 2011 roku w Europie ponad 14,9 mln Mg odpadów polimerowych w skali roku przetworzono metodami recyklingu mechanicznego lub też poddano procesom termicznego odzyskania energii, co stanowi wzrost o kolejne 6% w stosunku do roku 2010 (rys. 1.5) [157].

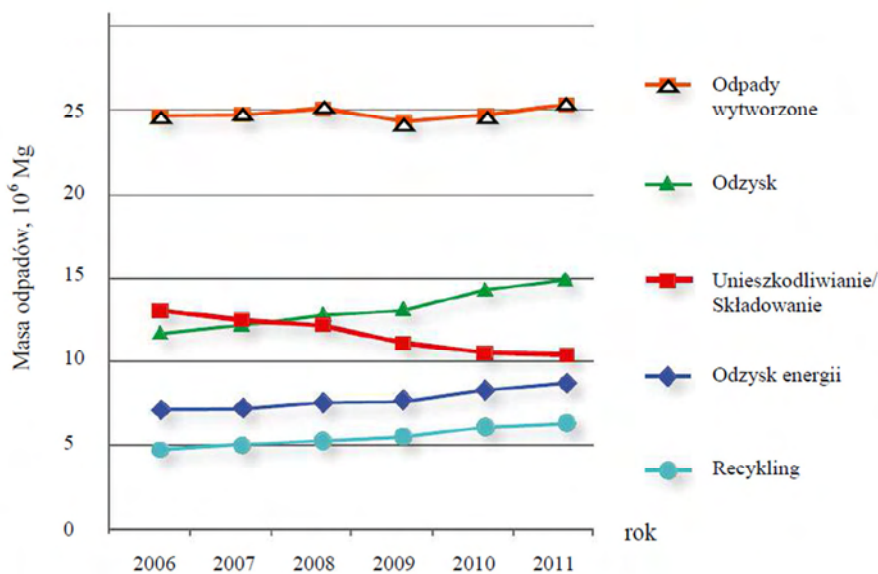


Rys. 1.5. Gospodarka odpadami polimerowymi w Europie w 2010 roku [157]

We współczesnym świecie drogą do zrównoważonego rozwoju jest między innymi zwiększanie efektywności wykorzystania istniejących zasobów naturalnych i zapobieganie powstawaniu odpadów „u źródła” ich wytwarzania. Jest to oczywiście bardzo trudne do realizacji, zważywszy, że aż 40% odpadów polimerowych stanowią wytwory o tzw. „krótkim czasie życia”, czyli krótkotrwałe użytkowane (np. worki foliowe, torby reklamowe) [7, 29, 62, 108]. Z tych powodów technologie ponownego wykorzystania potencjału materiałowego i energetycznego zgromadzonego w tworzywach polimerowych, zwłaszcza w tworzywach termoplastycznych, będą nadal intensywnie rozwijane.



Świadczą o tym dane liczbowe przedstawione na rysunku 1.6, według których stosowanie metod odzysku (recykling mechaniczny i energetyczny) w Europie odnotowuje na przestrzeni ostatnich pięciu lat ciągły, intensywny wzrost. Analiza dostępnych danych wskazuje, że kraje skandynawskie, państwa Beneluksu, Szwajcaria, Austria i Niemcy przerabiają ponad 90% masy powstających w tych krajach odpadów tworzyw polimerowych, przy czym udział recyklingu mechanicznego waha się od 20 do 30% całkowitej objętości zużytych wytworów [156, 157].



Rys. 1.6. Tendencje rozwojowe w obszarze sposobów utylizacji odpadów polimerowych na podstawie danych z lat 2006-2011 [157]

Wydaje się, że skutkiem widocznego, intensywnego rozwoju technologii przetwarzania tych materiałów będzie wzrost ich udziału w całkowitej masie odpadów. Zmiana struktury materiałowej wśród wytworów użytkowych, a przede wszystkim ustawodawstwo dotyczące gospodarki odpadami powodują rozwój technologii związanych z ponownym wykorzystaniem potencjału energetycznego i materiałowego, tkwiącego zwłaszcza w tworzywach termoplastycznych [6, 7, 13, 27, 36, 62, 73, 82, 108, 120, 132, 149, 165]. Dominujący udział poliolefin w opakownictwie, zauważalne zainteresowanie przemysłu motoryzacyjnego wielkogabarytowymi wytworami porowatymi z PP, a także większy udział poliolefinowych materiałów porowatych w budownictwie uzasadniają podjęcie prac zmierzających do opracowania efektywnych technologii ponownego wykorzystania poliolefin porowatych w postaci pełnowartościowego materiału wtórnego. Dotyczy to zwłaszcza opracowania sposobów separacji, rozdrabniania i ponownego przetwórstwa, dostosowanych do właściwości tych materiałów.

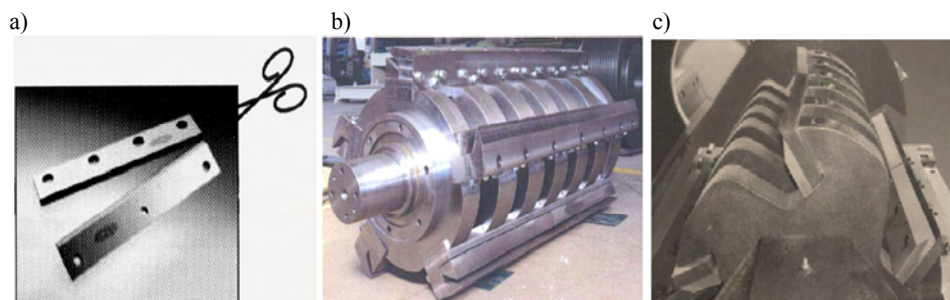
## **2. STAN WIEDZY W ZAKRESIE ROZDRABNIANIA POLIOLEFIN POROWATYCH HIPOTEZA, CELE I ZAKRES PRACY**

Rozdrabnianie jest podstawowym procesem składowym wielu technologii recyklingu mechanicznego tworzyw polimerowych [2, 25, 31, 34-46, 55, 61, 63-67, 75, 78, 80-83, 100, 101, 106, 113, 135, 140, 148, 158, 165-167]. Polega na zmianie objętości materiału wsadowego (nadawy), jego wymiarów liniowych oraz powierzchni właściwej na skutek przyłożenia określonego układu sił zewnętrznych, niszczących spójność i strukturę materiału. Podział tworzywa w trakcie rozdrabniania jest procesem dynamicznym, zależnym od wielu czynników związanych z konstrukcją rozdrabniacza, zastosowaną technologią oraz właściwościami materiałów poddawanych procesowi podziału w komorze roboczej urządzenia. Proces rozdrabniania charakteryzuje się niezadawalającą sprawnością energetyczną, co znajduje swoje odzwierciedlenie w znaczącym zużyciu energii na rozdrobnienie [3, 4, 13, 36, 53, 63, 82, 84, 120, 128, 150, 155, 160-167]. Energia dostarczona do układu roboczego rozdrabniacza tylko w niewielkiej części jest wykorzystana do podziału materiału i faktycznego wzrostu powierzchni właściwej jego ziaren. Straty energetyczne, które nieodłącznie towarzyszą procesom rozdrabniania tworzyw polimerowych, wynikają głównie z intensywnego mieszania i tarcia ziaren wzajemnie o siebie, a także o elementy robocze i ściany komory, również są wynikiem występujących odkształceń elastosprężystych nadawy [4, 38, 64, 78, 103, 104, 115, 122, 123]. Poziom tych strat zależy nie tylko od przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego rozdrabniacza, ale także od właściwości rozdrabnianego materiału. Ze względu na właściwości lepkosprężyste oraz podatność na zmiany stanu w zależności od temperatury, rozdrabnianie tworzyw polimerowych odbywa się głównie przez ścinanie w młynach nożowych i urządzeniach wielotarczowych [3-5, 34-44, 47, 48, 53, 61, 62, 79, 82, 84, 86-95, 102].

Cięcie jest podstawowym procesem składowym technologii recyklingu mechanicznego tworzyw polimerowych prowadzonych w młynach nożowych [4, 16, 17, 61, 68, 106, 131, 136, 139, 148, 150, 168]. Trudno określić bezpośrednią zależność pomiędzy efektywnością energetyczną procesu rozdrabniania materiału a jego cięciem w szczelinie międzynożowej. Wydaje się jednak, że im wyższy udział naprężeń ścinających w procesie rozdziałania materiału, tym sprawniejsza praca młyna nożowego. Świadczą o tym dotychczasowe badania obu procesów, choćby odniesienie jednostkowego zużycia energii podczas rozdrabniania do kształtu i stanu powierzchni uzyskanych recyklatów polimerowych [3, 16, 17, 32, 50, 51, 57, 82, 124, 125, 129, 142, 149, 154, 159]. Sprawniejszy podział nadawy wpływa na krótszy czas jej przebywania w komorze młyna. Materiał pozostaje w niej do czasu, gdy jeden z jego wymiarów będzie mniejszy od wielkości otworów sitowych. Do podobnych wniosków skłania również analiza zmian temperatury w komorze roboczej młyna w trakcie realizacji procesu rozdrabniania materiału wsadowego. Ze względu na właściwości lepkosprężyste tworzyw znaczna część energii mechanicznej dostarczonej do układu roboczego jest bezpowrotnie tracona w postaci wydzielającego się ciepła [63, 64, 66, 120, 127, 128, 135, 142, 160]. Jest to szczególnie istotne w przypadku rozdrabniania materiałów o niskiej temperaturze mięknięcia (polichlorek winylu, poliolefiny, jonomery), gdyż niekontrolowany wzrost temperatury utrudnia quasi-przecinanie nadmiernie uplastycznionych fragmentów wsadu [134, 148-150, 151]. W przypadku generowania dużej ilości ciepła może dojść do zale-

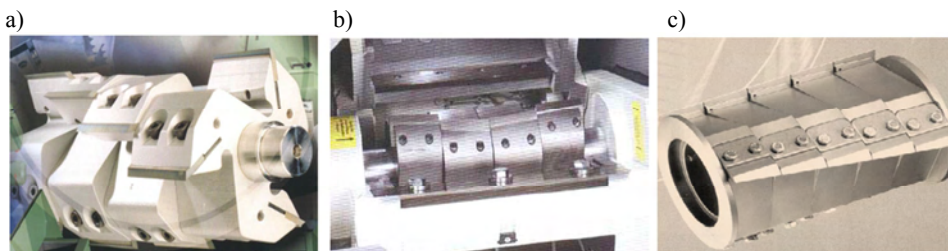
pienia otworów sitowych nadmiernie uplastycznionym materiałem, co prowadzi ostatecznie do utraty drożności sit. Im dłużej będzie przebywał materiał w otoczeniu wirujących noży, tym bardziej będzie narażony na oddziaływanie podwyższonej temperatury. Prostym rozwiązaniem byłoby zwiększenie prędkości obrotowej wirnika lub ilości noży tnących, ale zrealizowane w tym obszarze badania wskazują, że nie jest to oczywiste, a końcowe efekty zależą również od właściwości nadawy [63, 82, 109, 112, 128, 130, 137, 167]. Zdolność struktur porowatych do pochłaniania energii, w tym energii mechanicznej, oraz odmienne właściwości mechaniczne tych materiałów (np. moduł Younga, udurowienie) mogą zmienić, znane dla tworzyw o strukturze ciągłej, warunki i przebieg cięcia [4, 38, 131, 137, 139, 145, 148, 168]. Pory zamknięte mogą stanowić ośrodek tłumiący obciążenia udarowe, pochodzące od współpracy noży ruchomych i stałych w trakcie cięcia, inna zatem będzie propagacja i dynamika przecięcia materiału w szczelinie międzyżowej.

Analiza konstrukcji rozdrabniaczy do grubościennych wytworów termoplastycznych (grubość ścianki od 2 do 10 mm) wskazuje na tendencję do unifikacji konstrukcji układów nożowych i komór roboczych. Przyjęcie takiego założenia skutkuje znaczącym wzrostem zużycia energii i spadkiem wydajności w przypadku rozdrabniania termoplastów o właściwościach specjalnych (np. termoplastyczne elastomery TPE oraz TPU lub tworzywa jonomerowe lub poliuretany) [66, 67, 120, 135, 151]. Młyny nożowe różnią się konstrukcją i rozmiarami wirnika, ilością noży tnących, wielkością sit, a także kształtem i wielkością zasypu. Dodatkowe różnice w budowie tych maszyn można dostrzec także w łożyskowaniu wału wirnika, sposobach wyciszania komory roboczej i tłumienia drgań mechanicznych pochodzących od pracy wirnika oraz w zastosowanych systemach chłodzenia elementów roboczych młyna lub bezpośrednio rozdrobnionego materiału. Wydaje się jednak, że konstrukcja wirnika nożowego w największym stopniu wpływa na efektywność procesu rozdrabniania i jest zależna w największym stopniu od przeznaczenia i wielkości młyna. W przypadku dezintegratorów o najmniejszej wielkości dominują konstrukcje ze skośnym ustawieniem krawędzi tnących noży ruchomych i nieruchomych w stosunku do osi obrotu wirnika (rys. 2.1a, b). W pozostałych przypadkach najczęściej przyjmowanym rozwiązaniem jest konstrukcja wirnika, zapewniająca mocowanie noży tnących ruchomych w kształcie litery „V”, co według producentów młynów gwarantuje uzyskanie recyklatu o dobrej jakości, pozbawionego frakcji pylistej (rys. 2.1c).



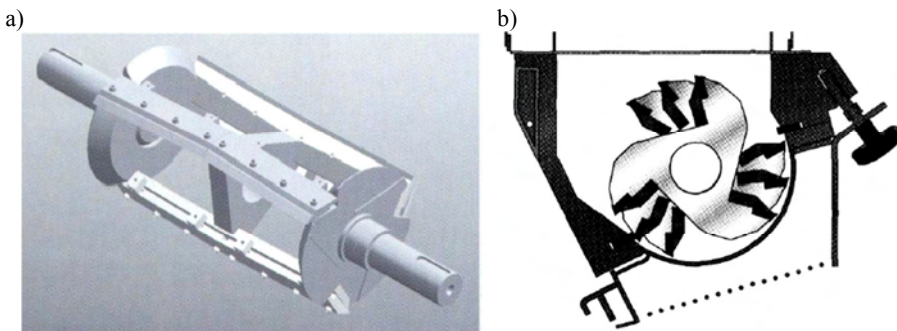
Rys. 2.1. Rozdrabnianie termoplastów: a) idea cięcia skośnego [92], b) wirnik z zamocowanymi nożami o pochylonej, w stosunku do osi wirnika, krawędzi tnącej [88], c) wirnik o podwójnie skośnych krawędziach tnących noży ruchomych w kształcie litery „V” [94]

Skośne, w stosunku do osi wirnika, ustawienie krawędzi tnących powoduje spadek siły i energii potrzebnej do przecięcia materiału, co jest szczególnie korzystne w przypadku rozdrabniania wytworów o znacznej grubości i dla elastomerów [3, 60, 110, 124, 130, 138, 168]. Obok jednolitych, mocowanych na całej szerokości wirnika noży ruchomych (rys. 2.1b), bardzo często stosuje się rozwiązania segmentowe (rys. 2.2). Narzędzia tnące są zamocowane jako niezależne elementy robocze, stanowiące z sąsiadującymi nożami przestrzeń roboczą. Zespoły tnące są mocowane do wirnika o specjalnej konstrukcji, zwanej segmentową (rys. 2.2a). W ten sposób uzyskuje się większą trwałość, zwłaszcza przy cięciu dużych wytworów o większej grubości, a ich ewentualna wymiana dotyczy tylko noży o stępionych albo wyszczerbionych krawędziach. Liczba segmentów nożowych wynosi zwykle, w zależności od wielkości urządzenia i przeznaczenia młyna, od 12 do 48 sztuk.



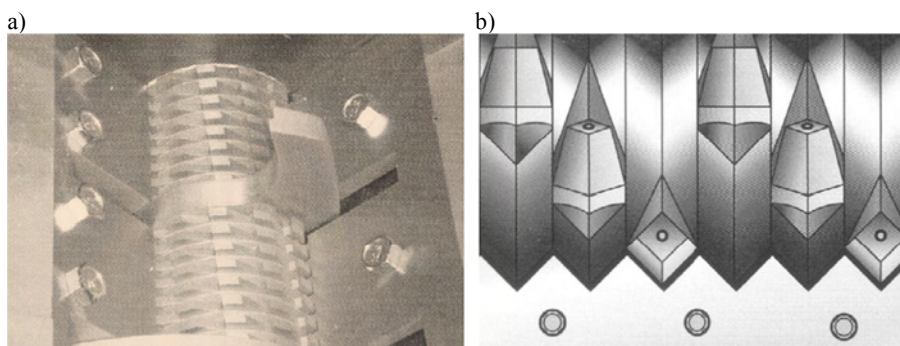
Rys. 2.2. Wirniki segmentowe stosowane w młynach tnących: a) wirnik dzielony [91], b) wirnik z nożami skośnymi [93], c) wirnik z nożami dzielonymi [89]

Jedną z obserwowanych współcześnie tendencji jest również wykonywanie wirników w postaci jednolitych bloków, dzięki czemu uzyskuje się większą wytrzymałość wałów i powtarzalność warunków realizacji cięcia do momentu zauważalnego stępienia krawędzi tnących (rys. 2.1b). Obok najczęściej występujących rozwiązań wirników uniwersalnych, przeznaczonych do rozdrabniania wytworów polimerowych w szerokim zakresie grubości ścianki, spotyka się rozwiązania specjalizowane. Wirnik gilotynowy (tzw. otwarty) przeznaczony jest do rozdrabniania tworzyw elastomerowych, dla których podczas realizacji procesu generowany jest znaczny wzrost temperatury (rys. 2.3a).



Rys. 2.3. Konstrukcja wirników o zastosowaniach specjalnych: a) do cięcia elastomerów [95], b) do cięcia wytworów cienkościennych [91]

Z kolei wirnik o konstrukcji specjalnej (rys. 2.1c) jest przeznaczony do rozdrabniania elementów grubościennych o przekroju typu rura. Młyn z dużą ilością szeregowo zamontowanych noży skośnych stosuje się natomiast do rozdrabniania wytworów cienkościennych, np. typu folia (rys. 2.3b). W przypadku młynów wolnoobrotowych konstrukcja wirników ewoluuje w kierunku walcowych elementów tnących o specjalnej geometrii. Tego typu rozwiązania są również proponowane do rozdzielania wytworów wielkogabarytowych, zwłaszcza cienkościennych (rys. 2.4a). Wirniki młynów wolnoobrotowych są zwykle wyposażone w zestawy zębów frezujących o różnej geometrii oraz zabieraki gnąco-kruszące, służące do wstępnego zredukowania objętości wytworów. Podział materiału następuje poprzez zdeformowanie i wciągnięcie fragmentów wytworu w regulowaną szczelinę pomiędzy zębami ruchomymi a nieruchomymi. Młyny wolnoobrotowe są bezsitowe, stąd służą zwykle do wstępnego przygotowania wielkogabarytowych odpadów (rys. 2.4b) lub do dezintegracji wadliwych wyprasek w miejscu ich powstawania (rys. 2.4a).

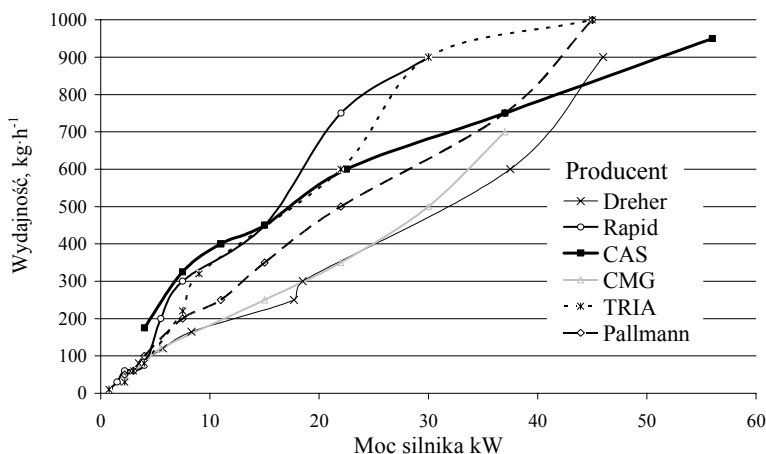


Rys. 2.4. Konstrukcja wirników stosowanych w młynach: a) wolnoobrotowych [86], b) do rozdrabniania zgrubnego, zwłaszcza dla wytworów o znacznej grubości [94]

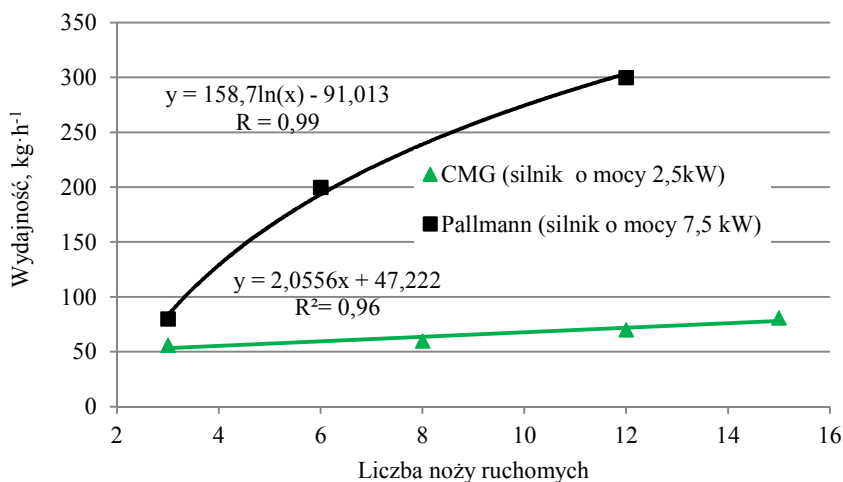
Różnice w budowie elementów roboczych młynów, w tym konstrukcji wirników, znajdują swoje odzwierciedlenie w wydajności realizowanego procesu, odniesionej do zużycia energii na rozdrobnienie lub do zainstalowanej mocy silnika. Sporządzone na podstawie dostępnych materiałów firmowych zależności graficzne wskazują na istotny związek pomiędzy wydajnością rozdrabniania a konstrukcją młyna, zwłaszcza wirnika (każdy z producentów posiada własne, oryginalne rozwiązania w tym względzie) (rys. 2.5). Należy jednak nadmienić, że podane dane mają charakter poglądowy, gdyż nie uwzględniają rodzaju i postaci wejściowej materiału, a także możliwego do uzyskania stopnia rozdrobnienia.

Przy niewystarczającym poziomie szczegółowych informacji zawartych w materiałach firmowych trudno jest analizować w sposób dokładny przyjęte rozwiązania ze względu na kryterium efektywności. W przypadku urządzeń o wydajności do  $500 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ , najczęściej na wirniku montuje się od 3 do 5 noży ruchomych (rozwiązania dotyczące litej krawędzi tnącej na całej szerokości wirnika), które oddziałują na rozdrabniany materiał z dwoma przeciwnożami montowanymi w obudowie młyna. Wydaje się, że są to relacje optymalne ze względu na zastosowanie tego typu urządzeń, głównie w miejscu generowania odpadów technologicznych przy stanowiskach produkcyjnych. W przypadku młynów o opisanej wyżej konstrukcji wzrost ilości noży powoduje zwiększenie wydajności rozdrabniania (rys. 2.6). Tego typu informacje są jednak zamieszcza-

ne bardzo rzadko, zwykle w bardzo ubogiej pod względem informatywności formie; w tym przypadku zostały zamieszczone w odniesieniu do młynów o mocy silnika 2,2 kW (CMG Granulatori) oraz 7,5 kW (Pallmann).



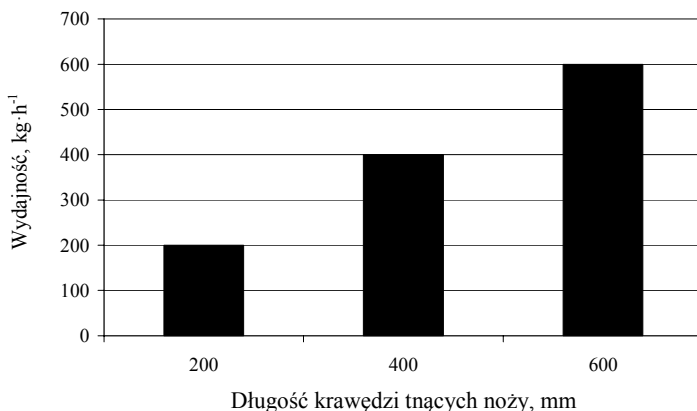
Rys. 2.5. Przykładowe zależności pomiędzy wydajnością rozdrabniania a zainstalowaną mocą silnika napędzającego wirnik – opracowanie na podstawie materiałów [86-95]



Rys. 2.6. Zależność wydajności rozdrabniania od liczby noży ruchomych – opracowanie na podstawie materiałów [87, 90]

Większa liczba noży ruchomych generuje wzrost ilości przecięt materiału znajdującego się w komorze roboczej młyna, co w konsekwencji powoduje szybsze jego rozdrobnienie do wielkości uziarnienia, pozwalającej na przejście recyklatów przez sita. Z tego punktu widzenia interesujące wydaje się odniesienie wydajności procesu rozdrabniania do długości krawędzi tnących noży oddziałujących na materiał. Zakładając stałą moc napędową silnika dla wszystkich rozpatrywanych przypadków, można

zaobserwować wzrost efektywności procesu rozdrabniania wraz ze wzrostem czynnej długości krawędzi tnącej, przy czym wydajność procesu rośnie proporcjonalnie do zmian długości krawędzi noży (rys. 2.7).

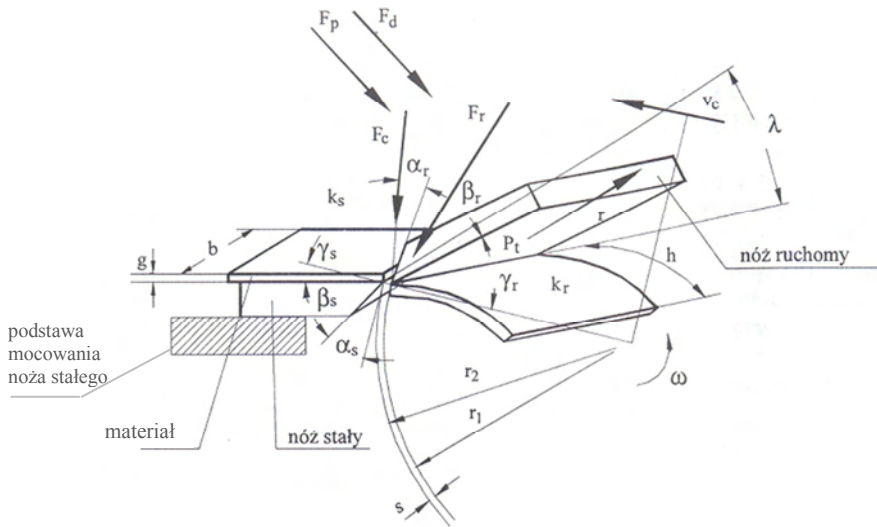


Rys. 2.7. Zależność wydajności rozdrabniania od długości krawędzi tnących noży – sporządzono na podstawie danych firmy Müller [89]

Cięcie nożowe, będące wynikiem współpracy noża ruchomego oraz noża nieruchomego, może przebiegać w kilku wariantach. Wynika to z faktu, że nóż ruchomy zamocowany w wirniku wykonuje ruch obrotowy, natomiast nóż stały (nieruchomy) – pomimo że jest zamocowany w obudowie urządzenia rozdrabniającego, hipotetycznie również zatacza powierzchnię, wynikającą z jego usytuowania względem wirnika i noża ruchomego. Gdyby przyjąć, że obudowa urządzenia rozdrabniającego wykonuje ruch obrotowy, to krawędź tego noża zatoczyłaby odpowiednią do przyjętego kształtu powierzchnię geometryczną, dającą w efekcie bryłę. W czasie cięcia obrotowego materiał leży na powierzchni natarcia noża nieruchomego. To właśnie od tego tworzywa jest odcinany wiór, na który w chwili cięcia oddziałuje siła cięcia  $F_c$ , będąca wypadkową sił. Wartość i kierunek oddziaływania tych sił jest zależny od usytuowania noży tnących względem wirnika, wzajemnego położenia i kształtu krawędzi tnących noży ruchomych i nieruchomych, szczeliny między nożami oraz od dynamiki ruchu wirnika. Prędkość obrotowa wirnika ma wpływ na poziom wartości siły deformującej  $F_d$  element nadawy, który znajdzie się pomiędzy nożami tnącymi (rys. 2.8). Sposób deformacji zależy od wartości kąta ostrza noża ruchomego, przy małej wartości  $\beta_r$  siła deformująca przyjmuje mniejsze wartości, ponieważ oddziaływanie elementu tnącego odbywa się na mniejszej powierzchni materiału. Dynamika tego oddziaływania zależy także od przyspieszenia ziarna nadawy podlegającej cięciu w momencie znalezienia się w szczelinie między-nożowej  $s_p$ . Analizując przebieg rozdziałania nadawy, można także wyróżnić siłę tarcia wióra o powierzchnię natarcia noża ruchomego  $F_t$ , której wartość zależy od współczynnika tarcia i rodzaju materiału przecinanego. Ważne znaczenie dla określenia siły wypadkowej ma siła rozdziałająca  $F_r$ , potrzebna do podziału tego fragmentu nadawy, który znajdzie się w szczelinie pomiędzy nożami tnącymi. Jej wartość zależy od cech materiałowych przecinanego materiału polimerowego, głównie jego sztywności i odporności na udarowe pęknięcie. Skośne ustawienie krawędzi tnących względem wirnika



skutkuje także pojawieniem się siły spychającej  $F_s$ , której wartość będzie tym większa, im bardziej znaczące pochylenie obu noży względem osi wirnika.



Rys. 2.8. Rozkład sił podczas cięcia obrotowego materiałów polimerowych [64]

W przypadku realizacji cięcia materiału w szczelinie międzyżyłowej o dużej wartości, np. 1 mm, dodatkowo pojawia się siła gnąca  $F_g$ , co z punktu widzenia energii potrzebnej na przecięcie materiału jest zjawiskiem niekorzystnym.

Reasumując ten fragment analizy można stwierdzić, że wypadkowa siła cięcia zależy od: wartości kątów noży ruchomego i stałego, wzajemnego usytuowania i kształtu ich krawędzi tnących względem osi wirnika urządzenia rozdrabniającego, właściwości materiałowych nadawy i noży tnących, a także cech geometrycznych materiału wsadowego, zwłaszcza jego grubości.

Ponadto na wartość wypadkowej siły tnącej będzie miała wpływ prędkość obwodowa noży ruchomych. Zatem ogólna zależność określająca wypadkową siłę cięcia może przyjąć postać [64]:

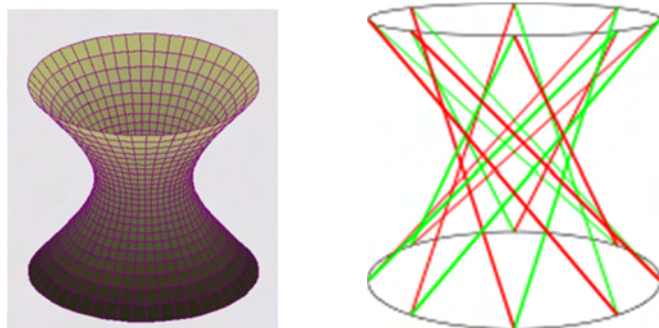
$$F_c = f(\alpha_r; \beta_r; \gamma_r; \alpha_s; \beta_s; \gamma_s; \lambda; \sigma_c; s; b; g; V_n; T_r; \mu_r) \quad (2.1)$$

gdzie:

- $\alpha_r, \alpha_s$  – kąty przyłożenia noży: ruchomego i nieruchomego,
- $\beta_r, \beta_s$  – kąty ostrza noży: ruchomego i nieruchomego,
- $\gamma_r, \gamma_s$  – kąty natarcia noży: ruchomego i nieruchomego,
- $\lambda$  – kąt pochylenia krawędzi tnących noża względem osi obrotu wirnika,
- $\sigma_c$  – opór cięcia (wytrzymałość na ścinanie nadawy),
- $s$  – wartość szczeliny międzyżyłowej, odległość pomiędzy krawędziami tnącymi noży: ruchomego i nieruchomego,
- $V_n$  – prędkość obwodowa noży ruchomych,
- $T_r$  – temperatura nadawy podczas cięcia,
- $\mu_r$  – współczynnik tarcia pomiędzy materiałami nadawy i noża tnącego.



Pochylenie krawędzi tnących względem osi wirnika powoduje w efekcie zatoczenie przez krawędź tnącą noża powierzchni obrotowej zwanej hiperboloidą jednopowłokową obrotową (rys. 2.9). Każda hiperboloida ma środek symetrii oraz co najmniej trzy osie i trzy płaszczyzny symetrii. Jest bryłą prostokreślną, stąd wykorzystanie do ustawienia krawędzi tnących noży. Biorąc pod uwagę, że ustawienie skośne może dotyczyć także noży nieruchomych, w przypadku cięcia obrotowego mogą zaistnieć cztery przypadki wzajemnego ustawienia na wirniku elementów tnących w ruchu obrotowym.




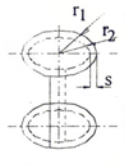
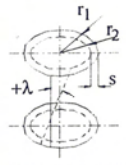


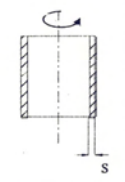
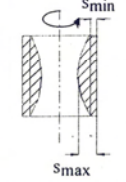
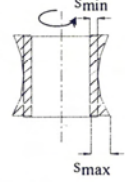
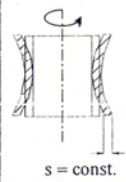
Rys. 2.9. Hiperboloida jednopowłokowa obrotowa [64, 66, 120, 168]

Współpraca przy równoległym ustawieniu krawędzi tnących noży (ruchomego i nieruchomego) jest przypadkiem zdecydowanie dominującym w praktyce przemysłowej, co ten ilustruje rysunek 2.10. Z matematycznego punktu widzenia jest to rodzaj współpracy dwu walców obrotowych o równaniach [61]:

$$x^2 + y^2 = r_1^2 \quad (2.2)$$

$$x^2 + y^2 = r_2^2 \quad (2.3)$$

W tym przypadku współpraca noży: stałego i ruchomego odbywa się jednocześnie na całej ich długości. Należy zauważyć, że wartość szczeliny  $s$  pomiędzy współpracującymi krawędziami noży jest stała na całej długości ich współpracy. Charakter obciążenia układu nożowego młyna momentem obrotowym od siły cięcia ma charakter udarowy (zwłaszcza podczas rozdrabniania szerokich płaskich płyt materiału). Pod względem energetycznym cięcie w tym wariantcie ustawienia jest realizowane na całej szerokości próbki wsadowej, co wymaga pokonania dużego oporu cięcia i generuje znaczącą wartość momentu od siły tnącej, zwłaszcza dla materiałów twardych i elastycznych o znacznej grubości.

	Rodzaje współpracy krawędzi tnących noży młyna			
	A	B	C	D
	nóż stały i ruchomy równoległe do osi	nóż ruchomy pochylony, nóż stały równoległy	nóż ruchomy równoległy, nóż stały pochylony	nóż stały i ruchomy pochylone przeciwnie
schemat współpracy krawędzi tnących				
równania powierzchni wyznaczanych przez krawędzie tnące	nóż ruchomy $x^2+y^2=r_1^2$ nóż stały $x^2+y^2=r_2^2$	nóż ruchomy $\frac{x^2-y^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$ nóż stały $x^2+y^2=r_2^2$	nóż ruchomy $x^2+y^2=r_1^2$ nóż stały $\frac{x^2+y^2}{(a+s)^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$	nóż ruchomy $\frac{x^2+y^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$ nóż stały $\frac{x^2+y^2}{(a+s)^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$
kształt szczeliny między współpracującymi krawędziami tnącymi				

Rys. 2.10. Możliwe przypadki współpracy noży w cięciu obrotowym [61, 62, 64, 165]

Pochylenie krawędzi tnącej jednego ze współpracujących noży stanowi przypadek współpracy dwóch powierzchni obrotowych: tj. hiperboloidy jednopowłokowej obrotowej i walca. Powierzchnie te można opisać matematycznie zgodnie z równaniami [61]:

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (2.4)$$

$$x^2 - y^2 = r_2^2 \quad (2.5)$$

Charakterystyczną cechą tego cięcia jest zmienna wartość szczeliny cięcia. Rozpatrując złożenie obu powłok obrotowych można stwierdzić, że szczelina osiąga największą wartość przy pochyleniu noża ruchomego w połowie długości obu noży. Należy zauważyć, że zwiększenie kąta pochyleniu krawędzi tnącej noża ruchomego powoduje równoczesny wzrost pola szczeliny. Stanowi to duże utrudnienie przy cięciu materiałów, których grubość jest mniejsza od szerokości szczeliny. Sytuacja odwrotna występuje przy skośnym ustawieniu względem osi wirnika noży nieruchomych i przy jednoczesnym zamocowaniu noży ruchomych na wirniku równoległe do osi jego obrotu. Pole szczeliny, powstałej przy pochylonej krawędzi noża nieruchomego, jest mniejsze niż w przypadku pochylonej krawędzi tnącej noża ruchomego.

Hiperboloidalna współpraca krawędzi tnących noży zachodzi wówczas, gdy występuje jednoczesne pochylenie krawędzi tnących noża stałego i ruchomego o tę samą wartość kąta  $\lambda$ , ale o różnych znakach. Wartość bezwzględna sumarycznego kąta

pochylenia krawędzi tnących wynosi  $2\lambda$ . W rozpatrywanym przypadku zachodzi współpraca dwu hiperboloid jednopowłokowych o równaniach [61]:

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (2.6)$$

$$\frac{x^2 + y^2}{(a+s)^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (2.7)$$

Równania te różnią się między sobą tylko stałą  $s$ , która jest wartością szczeliny pomiędzy współpracującymi nożami. Przy hiperboloidalnej współpracy obu krawędzi tnących niezmiernie ważne jest to, że szczelina ma wartość stałą na całej długości współpracujących noży. Ta stała wartość szczeliny przy jednoczesnym zachowaniu cięcia ukośnego pozwala uznać przypadek hiperboloidalnej współpracy obu krawędzi tnących za najbardziej korzystny z analizowanych przypadków. Cięcie materiału realizowane w tym wariantcie generuje znacznie mniejszą wartość siły cięcia niż podczas cięcia tego samego materiału za pomocą dwóch równoległych krawędzi tnących. Siłę cięcia w procesie cięcia hiperboloidalnego można obliczyć za pomocą wzoru wprowadzonego dla równoległych krawędzi tnących [61]:

$$F_c = \sigma_c \cdot b \cdot g \quad (2.8)$$

gdzie:

- $F_c$  – maksymalna siła cięcia podczas równoległej współpracy krawędzi tnących,
- $\sigma_c$  – właściwy opór cięcia [ $N \cdot m^{-2}$ ],
- $g$  – grubość ciętego materiału [m],
- $b$  – szerokość ciętego materiału [m].

Pracę cięcia  $L_1$  można obliczyć z zależności [36, 61]:

$$L_1 = \int_0^g F_c \cdot d(g) \quad (2.9)$$

Ustawienie krawędzi tnących noży w młynie może być realizowane również pod różnymi kątami w stosunku do osi wirnika. Jeśli część wirnika znajdująca się w strefie zasypu ma małą liczbę noży o dużym kącie natarcia i nachylonych do osi wirnika pod dużym kątem  $\lambda$ , to cechy te umożliwiają rozdrabnianie dużych gabarytowo elementów przy stosunkowo niewielkiej sile tnącej, której składowa pozioma zapewnia skuteczny transport rozdrabnianego materiału w kierunku następnych segmentów wirnikowych. Duża liczba noży o coraz mniejszym kącie nachylenia zapewnia skuteczne rozdrabnianie zmniejszających się cząstek materiału, zaś malejący kąt natarcia noży powoduje większą skuteczność odrzucania rozdrabnianego materiału w kierunku sita ograniczającego komorę rozdrabniania. Spotyka się także rozwiązania noży zamocowanych w kształcie litery V lub jeden nóż o takim kształcie krawędzi tnącej, co powoduje zatrzymanie dalszego ruchu poziomego rozdrabnianego materiału i jego ostateczne rozdrobnienie do rozmiaru określonego wymiarami otworów sit.

W zależności od przeznaczenia młyna, a głównie od postaci i rodzaju materiału, który będzie na nim rozdrabniany, na etapie konstruowania ustala się liczbę noży ruchomych i kąt pochylenia tych noży względem wirnika. W przypadku rozdrabniania

twardych wytworów wielkogabarytowych przyjmuje się mniejszą ilość noży ruchomych oraz większy kąt ich pochylenia [36, 93, 94]. Dla rozdrabniania materiałów elastycznych typu guma naturalna lub sztuczna stosuje się wirnik gilotynowy (otwarty), bez centralnego wału. Ten typ wirnika jest przydatny do realizacji procesu rozdrabniania materiałów, podczas którego można zauważyć istotny przyrost temperatury w komorze roboczej urządzenia, a także w samym materiale rozdrabnianym. Dla wytworów wykonanych z tworzyw konstrukcyjnych o znacznej grubości ścianek na wale montuje się dodatkowe koło zamachowe, aby zwiększyć moment obrotowy wirnika.

Reasumując można stwierdzić, że do rozdrabniania tworzyw polimerowych stosuje się noże o pochylonych, w stosunku do osi wirnika, krawędziach tnących, a przyjęte rozwiązania powinny być ściśle skorelowane z przeznaczeniem młyna nożowego. Sprzyja to większej równomierności rozdrabniania materiału, zwłaszcza w przypadku odpadów o znacznej grubości ścianki.

Jedną z zaobserwowanych tendencji rozwojowych jest ograniczanie prędkości obrotowych wirnika, co generuje mniejszą ilość frakcji pylistych i zmniejsza opory powietrza podczas obrotu wirnika. Jednak obniżenie prędkości obwodowej noży ruchomych zmniejsza wydajność rozdrabniania (mniejsza ilość przecięć materiału w określonym czasie) i jest zalecane w przypadku rozdrabniania zgrubnego, szczególnie do wytworów wielkogabarytowych o małej grubości ścianki (np. dla wyprasek o znacznej objętości w stosunku do masy). Warto jednocześnie podkreślić, że w proponowanych rozwiązaniach młynów nożowych rozdrabnianie materiału polimerowego odbywa się przy stałej prędkości obrotowej wirnika.

W dostępnych materiałach źródłowych brakuje podstawowych informacji dotyczących korelacji pomiędzy geometrią noży tnących a rodzajem materiałów poddawanych rozdziałaniu. Nie są dostępne także analizy dotyczące wpływu cech geometrycznych noży tnących oraz ich umiejscowienia na wirniku na wydajność i energochłonność podczas cięcia i rozdrabniania tworzyw porowatych.

Informacje dotyczące wydajności w odniesieniu do zainstalowanej mocy silników podawane są wybiórczo jedynie dla określonego typoszeregu młynów, z dużym zakresem tolerancji, bez uwzględnienia właściwości rozdrabnianych materiałów i wielkości użytych do ich rozdrobnienia sit. Przeprowadzone w tym zakresie badania własne wskazują na istotną zależność pomiędzy wielkością otworów sitowych i powierzchnią sit a wydajnością rozdrabniania [120, 122, 123, 126, 127].

W dostępnych doniesieniach literaturowych brak jest odniesienia efektywności procesów rozdrabniania tworzyw poliolefinowych do właściwości wytworzonych z porowatych recyklatów wytworów wtórnych. Nie ma także opracowań analizujących w sposób całościowy wpływ geometrii noży tnących na siłę cięcia.

Na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy w zakresie recyklingu mechanicznego tworzyw polimerowych sformułowano cele i zakres monografii oraz hipotezę badawczą.

Celem badań było podniesienie efektywności procesów składowych recyklingu mechanicznego tworzyw poliolefinowych o strukturze porowatej, poprzez ustalenie charakterystycznych, korzystnych parametrów konstrukcyjno-technologicznych procesów cięcia i rozdrabniania, ze względu na możliwość ponownego przetwórstwa uzyskanych recyklatów w standardowych maszynach do wytłaczania i wtryskiwania. Dążono do ustalenia wzajemnych relacji pomiędzy procesami składowymi, z uwzględnieniem specyfiki porowatej nadawy o właściwościach sprężysto-plastycznych.

Poznanie najkorzystniejszych sposobów rozdrabniania materiałów porowatych wymagało realizacji celów szczegółowych, które obejmowały:

- określenie, znamienne dla dekohezji tworzyw porowatych, cech konstrukcyjnych rozdrabniacza, zwłaszcza jego układu tnącego,
- określenie znaczenia hiperboloidalnego ustawienia noży tnących na sprawność przecinania materiałów porowatych,
- poznanie wpływu warunków technologicznych procesu na efektywność rozdrabniania,
- określenie właściwego stopnia rozdrobnienia tworzyw porowatych ze względu na ich dalsze przetwórstwo,
- oszacowanie cech geometrycznych ziaren recyklatów w zależności od stopnia porowatości struktury,
- opracowanie technologii ponownego wykorzystania uzyskanych recyklatów,
- zbadanie właściwości uzyskanych wytworów powstałych na bazie recyklatów porowatych,
- określenie wpływu wtórnego przetwórstwa<sup>1</sup> na strukturę produktów, otrzymanych w standardowych maszynach do przetwórstwa tworzyw polimerowych.

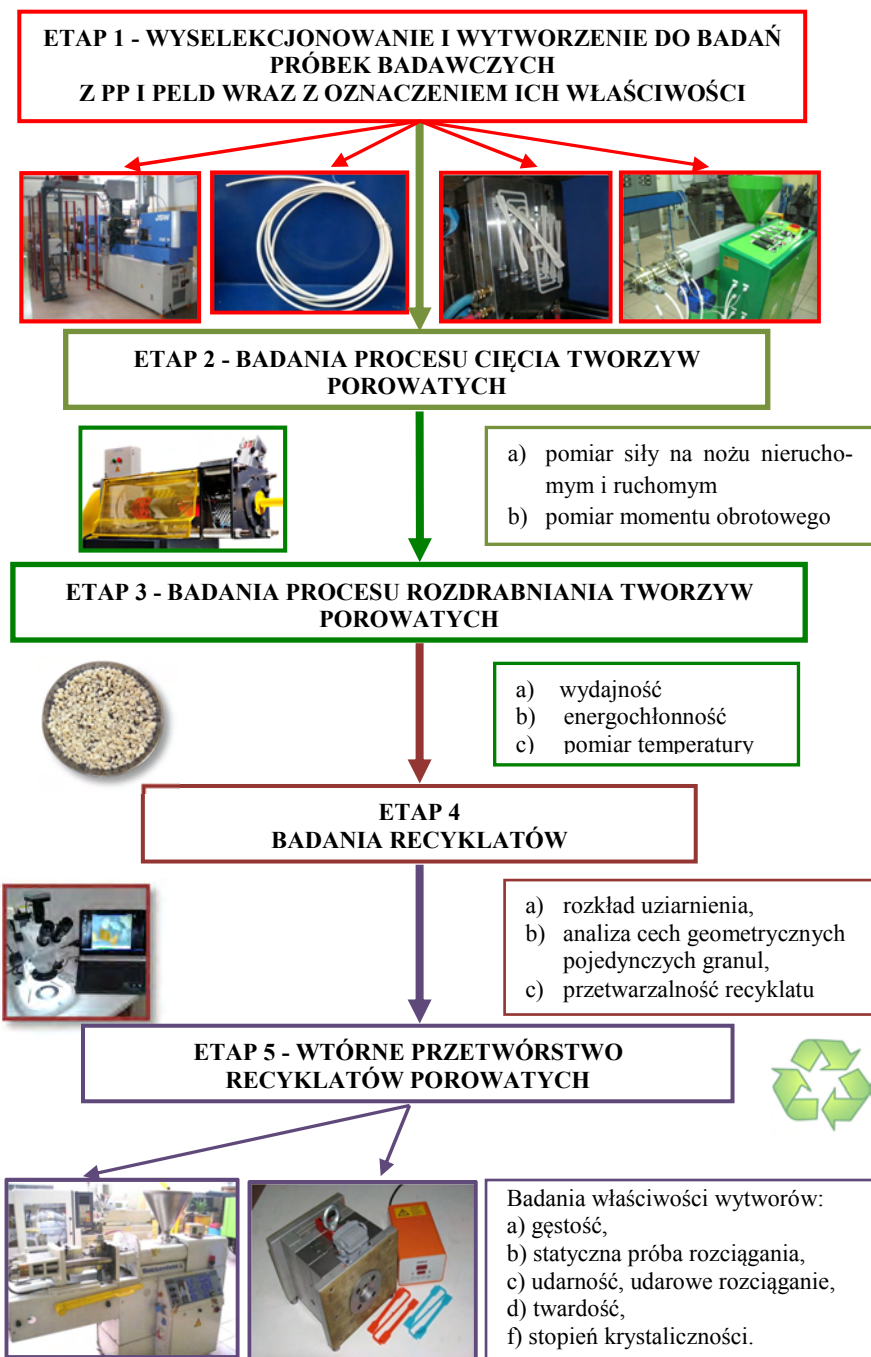
Przyjęte cele i zakres pracy umożliwią weryfikację hipotezy badawczej, według której:

*ze względu na lepkosprężyste zachowanie się tworzyw polimerowych, ich rozdrabnianie w temperaturze otoczenia odbywa się w złożonym stanie oddziaływania obciążeń zewnętrznych. Specyficzna, dwufazowa struktura tworzyw porowatych powoduje konieczność ustalenia odmiennych, w stosunku do materiałów litych, warunków cięcia i rozdrabniania, a skuteczność przyjętych rozwiązań powinna podlegać ocenie w powiązaniu z ponownym przetwórstwem uzyskanych recyklatów porowatych i właściwościami użytkowymi wytworów wtórnych.*

Postulowany i zrealizowany zakres badań został schematycznie przedstawiony na rysunku 2.11. Uznano za zasadne odnoszenie efektywności procesów technologicznych cięcia i rozdrabniania do specyficznych właściwości materiałów wsadowych, a także do cech użytkowych otrzymanych materiałów wtórnych. Wzajemne oddziaływanie i relacje **materiał wejściowy – proces rozdrabniania – rozdrabniacz – recyklat – wytwór wtórny** było istotą eksperymentu, który został zrealizowany w skali laboratoryjnej i z wykorzystaniem urządzeń przemysłowych. W tym drugim przypadku próby wykonano na obiekcie rzeczywistym, dotychczas wytwarzanym z tworzywa litego.

---

<sup>1</sup> Z uwagi na odmienne warunki przetwarzania recyklatów (postać wejściowa materiału, jego dozowanie, inne parametry procesowe itp.) od przetwórstwa granulatów tworzyw polimerowych, uznano za celowe określenie tych procesów jako wtórne wtryskiwanie lub wytłaczanie, w odróżnieniu do wytwarzania wytworów polimerowych z granulatów (pierwotne przetwórstwo).



Rys. 2.11. Schemat ideowy zakresu realizacji części doświadczalnej rozprawy

### 3. STANOWISKA BADAŃ PROCESÓW CIĘCIA I ROZDRABNIANIA

W ramach przygotowania stanowiska do badań procesu cięcia i rozdrabniania tworzyw polimerowych podjęto prace nad wyposażeniem komory roboczej w noże tnące o odpowiedniej geometrii oraz uniwersalne sita wymienne. Ponadto zaprojektowano i wykonano układy do podawania tworzywa w próbach cięcia i rozdrabniania oraz zmodernizowano tory pomiarowe służące do pomiaru wielkości fizycznych, opisujących przebieg procesów rozdzielania materiałów. Dotyczy to przede wszystkim zastosowania przetwornika cyfrowego do akwizycji danych pomiarowych, programu do analizy uzyskanych wyników oraz tensometrów i czujników temperatury. Ostateczny kształt systemu komputerowego do monitorowania zjawisk zachodzących podczas pracy rozdrabniacza nie był jedynie efektem złożenia odpowiednich, gotowych elementów, ale wynikał z wykonania wielu prac koncepcyjnych i analityczno-projektowych. Dotyczyły one przede wszystkim opracowania odpowiedniego kształtu noży pomiarowych, aby zapewnić im czułość, odpowiednią do właściwości rozdzielanych materiałów porowatych. Zaprojektowano i wykonano zestaw sit, umożliwiający odsuwanie i dosuwanie ich względem noży ruchomych, przy zachowaniu przez ich konstrukcję warunku szczelności komory roboczej [120, 127, 138]. Wykonano ponadto tor pomiaru siły na nożu ruchomym, co wymagało wywiercenia dodatkowego otworu w wirniku, pozwalającego na wyprowadzenie przewodów na zewnątrz. Sygnał napięciowy z tensometrów był rejestrowany i przetwarzany przez przetwornik pomiarowy. Zaprojektowano i wykonano mechatroniczny podajnik do automatycznego podawania próbki pomiarowej o zmiennej grubości w przestrzeń pomiędzy krawędzie tnące noży.

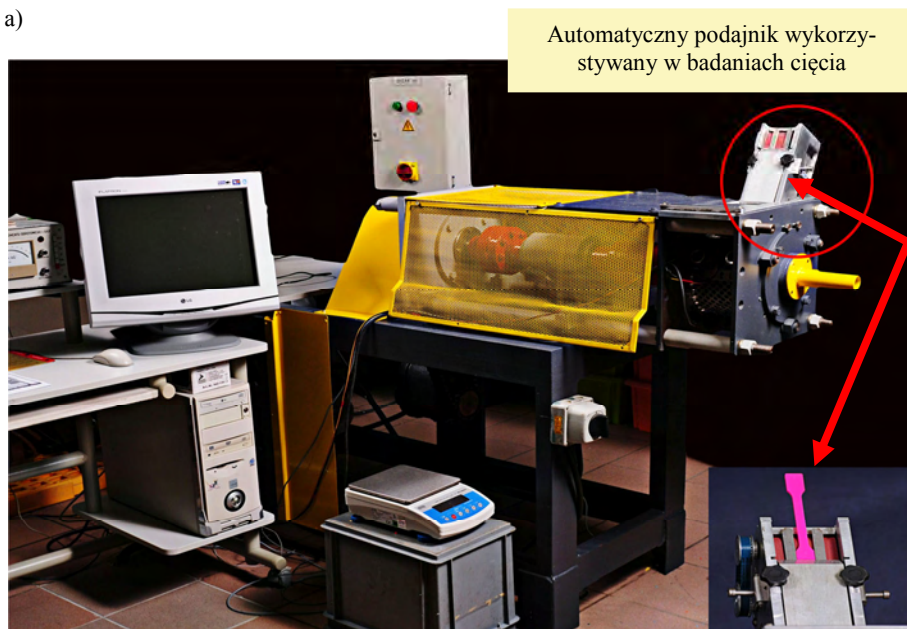
W efekcie badania cięcia i rozdrabniania materiałów porowatych realizowano w istotnie zmodyfikowanym stanowisku badawczym przedstawionym na rysunkach 3.1 i 3.2. Najważniejszą jego część stanowi jednostopniowy młyn tnący, którego wirnik napędzany jest za pośrednictwem typowego, indukcyjnego momentomierza Mi-20 przez silnik o mocy 5,5 kW, o sterowanej bezstopniowo prędkości obrotowej w zakresie od 0 do 23 s<sup>-1</sup>. W badaniach cięcia wykorzystano także przekładnię ślimakowo-zębatą, która pozwoliła na realizację prób cięcia wolnoobrotowego z maksymalną prędkością obwodową noży ruchomych 0,3 m·s<sup>-1</sup>. Bezstopniową regulację obrotów zespołu tnącego zapewniał falownik indukcyjny firmy Aniro. Komorę roboczą ograniczały 2 sita o określonej wielkości otworów (rys. 3.1b), które warunkowały uzyskanie recyklatów porowatych o określonym stopniu uziarnienia.

Zmierzając do stworzenia warunków dla wielokryterialnej oceny efektywności badanych procesów cięcia i rozdrabniania materiałów porowatych, stanowisko do cięcia i rozdrabniania wyposażono w komputerowy system pomiarowy, umożliwiający rejestrację, archiwizację i analizę zmienności następujących wielkości fizycznych:

- siły na nożu nieruchomym, określającej stopień obciążenia układu tnącego młyna w zależności od wymiarów i właściwości rozdrabnianego materiału oraz zastosowanej geometrii cięcia,
- siły na nożu ruchomym, określającej stopień obciążenia układu tnącego młyna w zależności od wymiarów i właściwości rozdrabnianego materiału oraz zastosowanej geometrii cięcia,
- momentu od siły tnącej, mierzzonego na wale wirnika oraz prędkości kątowej wirnika,
- zmian masy rozdrobnionego recyklatu w trakcie realizacji procesu rozdrabniania,
- temperatury w komorze roboczej i na sicie roboczym.



a)



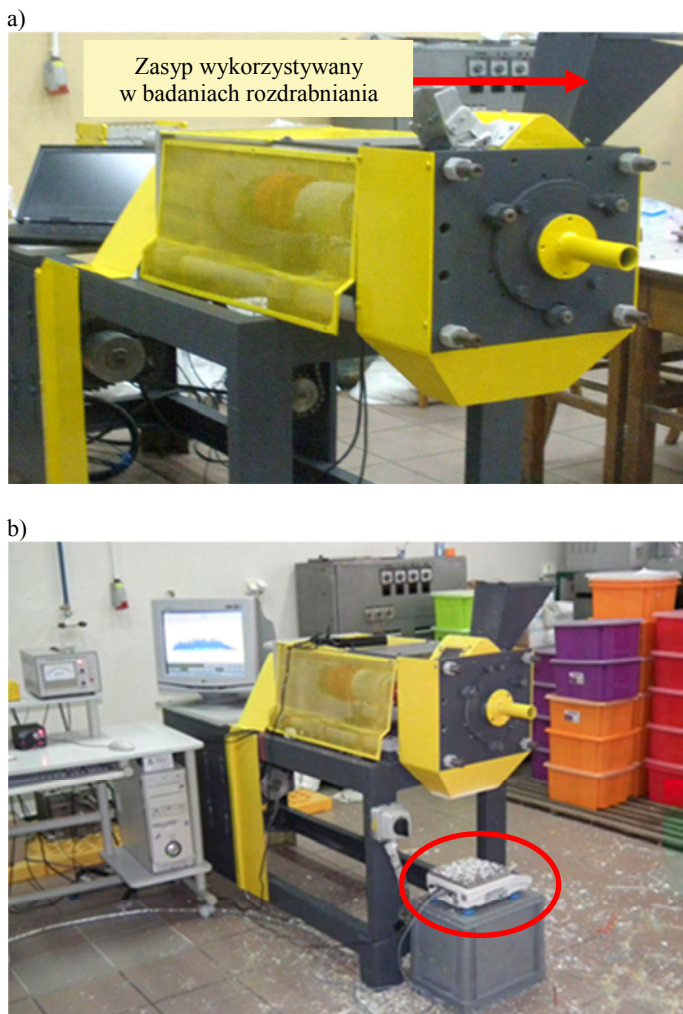
b)



Rys. 3.1. Stanowisko przygotowane do realizacji badań cięcia i rozdrabniania: a) widok ogólny z węzłem podawania, b) widok komory roboczej z założonym sitem (UTP Bydgoszcz)

W badaniach rozdrabniania wykorzystano specjalny podajnik z możliwością optycznego śledzenia procesów zachodzących w komorze roboczej (rys. 3.2a), a także tory pomiarowe temperatury na sicie (rys. 3.1a) oraz specjalistyczną, akumulatorową wagę laboratoryjną, dzięki której mierzono przyrosty masy recyklatu (rys. 3.2b).





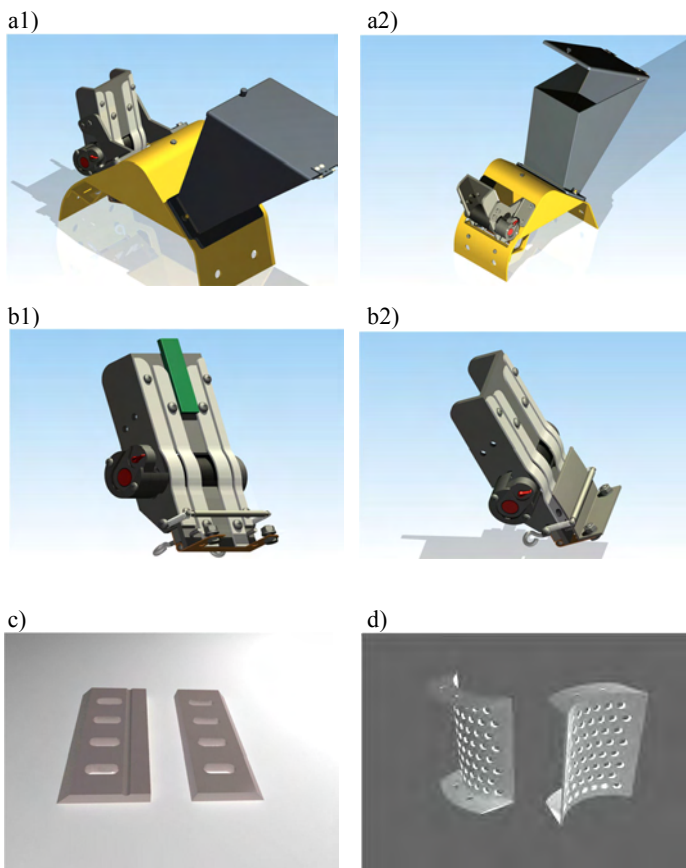
Rys. 3.2. Widok stanowiska badawczego przygotowanego do realizacji procesu rozdrabniania: a) układ zasypowy, b) w trakcie realizacji prób rozdrabniania z wagą do ciągłego pomiaru masy recyklatów (UTP Bydgoszcz)

Sygnaly napięciowe z zainstalowanych w urządzeniu rozdrabniającym czujników, po przetworzeniu w zewnętrznym 32-kanalowym przetworniku cyfrowym ESAM Traveller-1 typ 2532-S firmy ESA Messtechnik GmbH, rejestrowano komputerowo, a następnie analizowano za pomocą specjalizowanego pakietu pomiarowego ESAM i programu Excel. Przetwornik Traveller-1 umożliwiał jednoczesny pomiar wielkości fizycznych za pomocą 8 kanałów cyfrowych i 24 kanałów analogowych, z regulowanym czasem próbkowania, pozwalającym na zarejestrowanie do 250 000 zdarzeń w ciągu sekundy (rys. 3.3). Pozwoliło to na dostosowanie czasu próbkowania do prędkości obwodowej noży ruchomych. Stanowisko badawcze zaprojektowano tak, że po drobnych modyfikacjach służyło jednocześnie do monitorowania szybkozmiennego procesu cięcia, jak i rejestracji danych podczas badania procesu rozdrabniania.



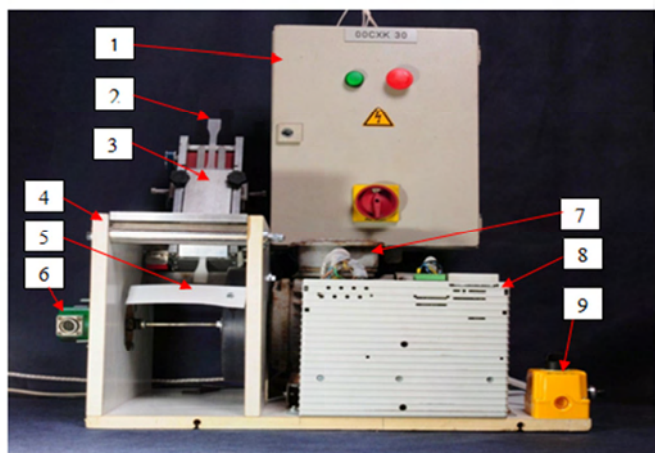
Rys. 3.3. Przetwornik ESAM Traveller 1 (UTP Bydgoszcz)

Wyposażenie stanowiska w odpowiednie elementy konstrukcyjne poprzedził etap analiz numerycznych, czego efektem są modele 3D przedstawione na rysunku 3.4. Przedstawione wersje układu zasilania uwzględniały wykorzystanie odrębnych podajników do realizacji badań procesu cięcia i rozdrabniania. W założeniach wstępnych zaplanowano zbudowanie odrębnego podajnika do realizacji procesu cięcia, zasilanego materiałem w postaci wytłoczonej wstęgi o określonej grubości i szerokości lub wyprasek o różnej grubości (co najmniej w przedziale wartości od 2 do 10 mm).



Rys. 3.4. Wyniki prac modelowych dotyczących: a) konstrukcji zasypu do rozdrabniania, b) konstrukcji podajnika materiału w próbach cięcia, c) konstrukcji noży, d) konstrukcji sit ograniczających komorę młyna (opracowanie własne)

Dotychczasowe wyniki badań wskazują, że proces cięcia, jako podstawowy sposób podziału materiału, ma kluczowe znaczenie dla efektywności procesów rozdrabniania realizowanego w młynie nożowym [3, 5, 35, 130, 131, 141, 142, 150]. Dlatego zaprojektowano i wykonano mechatroniczny podajnik, pozwalający na precyzyjne i powtarzalne sterowanie fazą podawania materiału w trakcie badań procesu cięcia. Założono, że wyposażenie stanowiska do badania procesów cięcia i rozdrabniania w precyzyjny układ podawania próbek z tworzyw polimerowych przyczyni się do podniesienia jakości prowadzonych prób w obszarze wprowadzania materiału do komory roboczej urządzenia. W pierwszej fazie powstał trójwymiarowy model rozwiązania układu podającego, który był następnie kilka razy modyfikowany na etapie analiz numerycznych. Na podstawie tych danych wykonano stanowisko modelowe, wyposażone w podajnik i układ sterowania, co pozwoliło na ostateczną weryfikację przyjętych założeń konstrukcyjnych (rys. 3.5).

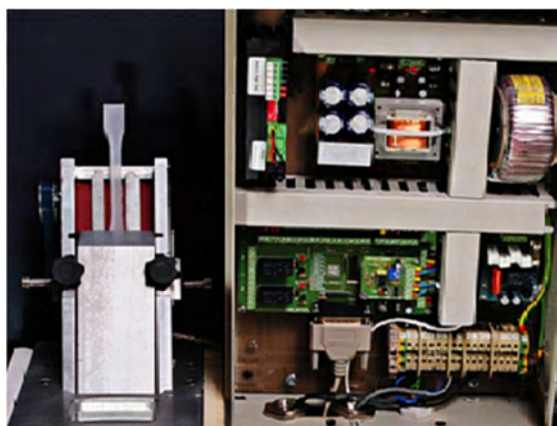


Rys. 3.5. Stanowisko do weryfikacji równomierności podawania próbek: 1 – skrzynka sterowniczo-elektryczna, 2 – próbka badawcza, 3 – podajnik taśmowy, 4 – obudowa komory roboczej, 5 – nóż tnący, 6 – enkoder, 7 – napęd elektryczny, 8 – falownik, 9 – włącznik (UTP Bydgoszcz)

Automatyzacja układu podawania wymagała zastosowania zaawansowanych rozwiązań w obszarze sterowania. Dotyczyło to doboru płyty głównej, układu sterowania pracą silnika krokowego oraz układu tzw. miękkiego startu. Dokonano ponadto wyboru programu sterującego pracą podajnika z poziomu komputera PC.

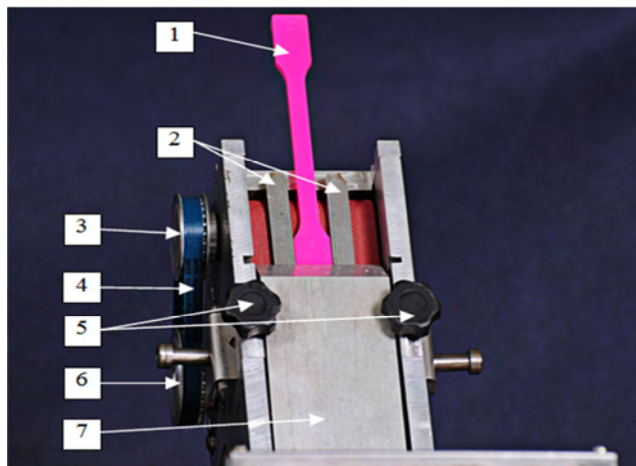
Jednym z głównych elementów układu sterowania pracą podajnika była płyta główna SSK-MB02, która zapewniła podłączenie sterowników silnika krokowego do komputera (rys. 3.6). Kolejnym ważnym elementem był sterownik silnika krokowego, który pozwolił na nadzorowanie pracy hybrydowych silników krokowych oraz na sterowanie 2-fazowymi i 4-fazowymi silnikami. Do sterowania prędkością podawania materiału w podajniku zastosowano moduł regulacji obrotów silnika, współpracujący z falownikiem. Wspólne działanie tych dwóch elementów dawało możliwość regulacji prędkości obrotowej silnika w bardzo szerokim zakresie. Mikroprocesorowe sterowanie pozwoliło także na realizację prób w wariantach pojedynczego lub seryjnego przecięcia.

Dokładne pozycjonowanie próbki było możliwe dzięki zastosowaniu czujnika ruchu i enkodera, co pozwoliło na precyzyjne wprowadzenie próbki za pomocą podajnika taśmowego na wybraną programowo głębokość przecięcia. Sprzężenie i kontrolowanie relacji pomiędzy prędkością obwodową noża ruchomego i prędkością przemieszczania się próbki na taśmie umożliwiało transport próbki w przestrzeń pomiędzy krawędziami tnącymi noży.



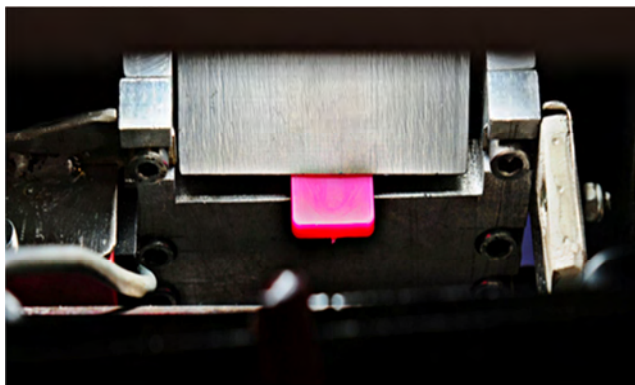
Rys. 3.6. Podajnik z widocznymi przewodnikami i elementy układu sterowania [147]

Po założeniu próbki przeznaczonej do przecięcia na bieżnię podajnika, następowało jej pozycjonowanie za pomocą aluminiowych przewodnic, które dodatkowo zapobiegały zakleszczaniu się materiału w trakcie realizacji procesu cięcia (rys. 3.7). Pozycjonowanie próbki względem krawędzi noża nieruchomego odbywało się z panela numerycznego. Próbka przemieszczała się w kierunku komory tnącej do momentu zauważenia jej przez czujnik optyczny firmy Bernstein Optronic typu OR 05PS. Sygnał z czujnika przekazywano do układu sterującego, co powodowało wycofanie próbki do pozycji startowej (rys. 3.8). W ten sposób można było bardzo precyzyjnie określić pozycję początkową materiału przeznaczonego do przecięcia, co jest szczególnie istotne w przypadku cięcia próbek o różnym przekroju, a także w sytuacji przecinania materiału o co najmniej dwufazowej strukturze, np. termoplasty porowate.



Rys. 3.7. Budowa podajnika: 1 – próbka badawcza, 2 – prowadnice, 3 – koło zębate, 4 – pasek zębaty, 5 – regulacja prowadnicy, 6 – koło napędowe, 7 – płyta dociskowa [147]

Przed rozpoczęciem próby ustalano także prędkość przesunięcia tworzywa wsadowego (w przypadku seryjnego przecinania), dostosowując ją do prędkości obwodowej noży ruchomych. Z poziomu komputera uruchamiano także wirnik młyna nożowego, który za pośrednictwem przekładni pasowej połączony był z silnikiem elektrycznym. W ten sam sposób sterowano także prędkością obrotową wirnika. Przed przystąpieniem do realizacji próby wprowadzano wartość przesunięcia próbki w odniesieniu do poziomu bazowego.

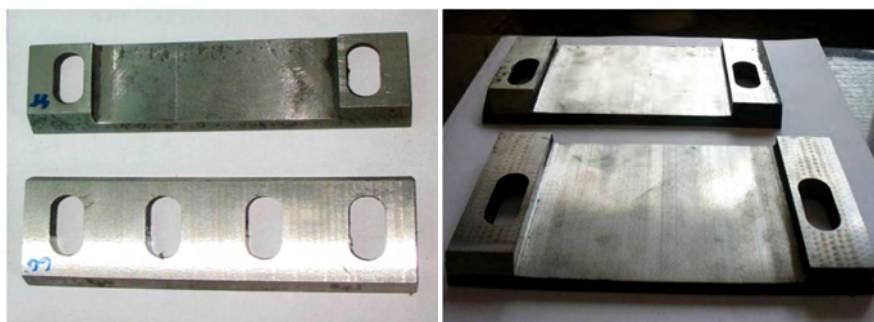


Rys. 3.8. Pozycja startowa próbki przeznaczonej do przecięcia [147]

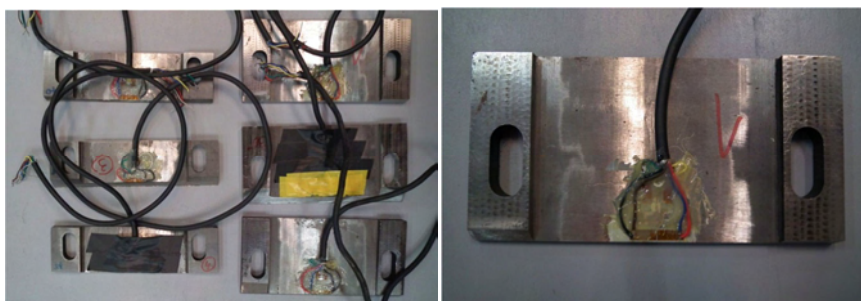
Układ tnący młyna składał się z zainstalowanych na wirniku czterech noży ruchomych oraz mocowanych w korpusie 6 noży nieruchomych (rys. 3.9). Na wybranych nożach ruchomych i nieruchomych naklejono tensometry firmy VISAY (rys. 3.10). Odpowiednią czułość pomiarową noży uzyskano po próbach wstępnych, dzięki zmniejszeniu ich grubości w części pomiarowej do wartości 5 mm. Prace zrealizowane w tym zakresie umożliwiły nawet rejestrację zmian siły podczas przecinania pojedynczej kartki papieru. Wykonano łącznie 8 noży pomiarowych z naklejonymi tensometrami oraz



ponad 20 noży tnących o różnej geometrii, co wynikało z realizacji przyjętych celów badań (rys. 3.9). Do produkcji noży użyto stal narzędziową 1.2063 do pracy na zimno, uzyskując po obróbce cieplnej twardość docelową 53 HRC. Twardość ta gwarantowała odpowiednią trwałość ostrzy, a jednocześnie zapewniała wystarczającą plastyczność, dzięki czemu nie dochodziło do wykruszeń ostrza podczas cięcia, zwłaszcza w trakcie rozdrabniania.



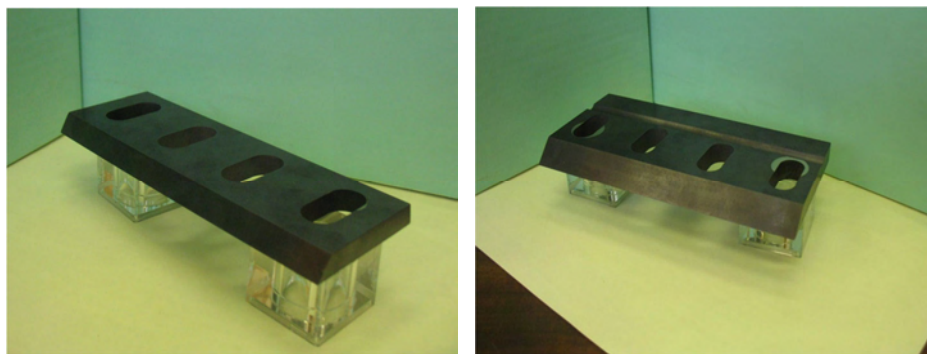
Rys. 3.9. Postać geometryczna noży tnących z przygotowanym miejscem do naklejenia tensometrów



Rys. 3.10. Noże ruchome i nieruchome przeznaczone do pomiarów siły, wyposażone w czujniki tensometryczne (UTP Bydgoszcz)

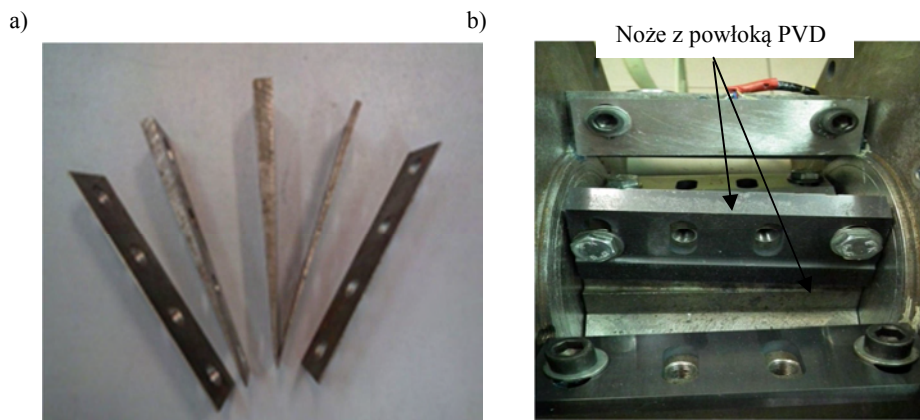
Na wybrane noże tnące przeznaczone do badań cięcia i rozdrabniania, naniesiono powłokę PVD (ang. *Physical Vapour Deposition*) w firmie Oerlikon Balzers Polska Sp. z o.o. Celem tego zabiegu było wydłużenie okresu trwałości ostrzy tnących, zwłaszcza w trakcie realizacji badań procesu pojedynczego przecinania materiałów porowatych. Na podstawie wcześniej zrealizowanych prac własnych stwierdzono bowiem, że stan krawędzi tnących noży wpływa na efektywność procesu rozdrabniania [58, 120]. Narzędzia, zgodnie z zaleceniami stawianymi materiałom powlekanym, wykonano ze stali narzędziowej 1.2379 (NC11LV), a następnie poddano hartowaniu i wysokiemu odpuszczaniu (powyżej 520°C). Dzięki tym zabiegom obróbki cieplnej uzyskano twardość noży 64 HRC, co było warunkiem koniecznym do przeprowadzenia operacji powlekania ich powierzchni powłokami PVD. Po analizie właściwości stosowanych powłok ochronnych zaproponowano pokrycie noży tnących powłoką BALINIT® FUTURA NANO TOP (rys. 3.11). Powłoka ta charakteryzuje się odpowiednią zależnością pomiędzy twardością a szczytkowym naprężeniem ściskającym powłoki, co zwiększa stabilność krawędzi tnących narzędzi. Na podstawie analiz studialnych można także stwier-

dzić, że nanoszenie powłoki PVD na krawędzie tnące noży jest oryginalną próbą zwiększenia ich trwałości, zrealizowaną w eksperymencie badawczym po raz pierwszy [16, 17, 36, 80, 82, 86-95, 113, 117, 154, 158].



Rys. 3.11. Noże tnące pokryte powłoką BALINIT® FUTURA NANO TOP (UTP Bydgoszcz)

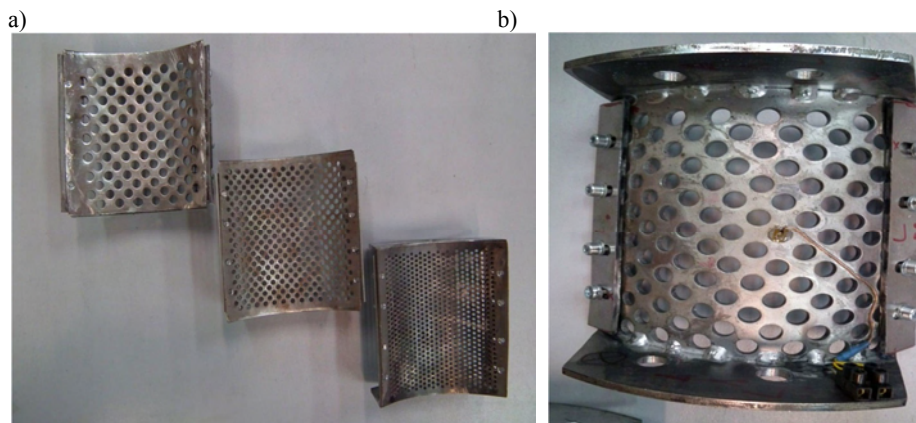
Warunek hiperboloidalnej współpracy krawędzi tnących zapewniło pochylenie noży w stosunku do osi wirnika. W celu uzyskania możliwości regulacji kąta pochylenia noży wykonano zestaw płytek podkładowych o różnym kącie (rys. 3.12). Płytki te można było składać ze sobą, co umożliwiło realizację prób cięcia przy kącie pochylenia krawędzi tnących noży  $2\lambda = 13,5^\circ$ . Ograniczeniem w pochyleniu noży była wielkość komory młyna nożowego.



Rys. 3.12. Sposób regulacji pochylenia krawędzi tnących: a) widok płytek regulacyjnych, b) widok zamontowanych na wirniku i pochylnych względem jego osi noży (UTP Bydgoszcz)

Zespół rozdrabniający został wyposażony w zestaw wymiennych sit, o różnych wartościach średnic otworów w zakresie od  $\varnothing 3$  do  $\varnothing 11$  mm (rys. 3.13). Założeniem konstrukcyjnym sit była możliwość elastycznego regulowania odległości ich powierzchni wewnętrznych od krawędzi wirujących noży ruchomych w przedziale od 0,1 do 0,5 mm [126, 127]. Z tego powodu sita tak zaprojektowano, aby była możliwość

regulacji powierzchni sitowej. Każda bowiem zmiana odległości sita od noży tnących skutkowałą zmianą powierzchni zamykającej przestrzeń roboczą młyna. Do tego celu służyły specjalnie wykonane płaskowniki z otworami typu owalnego, połączone rozłącznie z powierzchnią sit za pomocą śrub imbusowych (rys. 3.13).

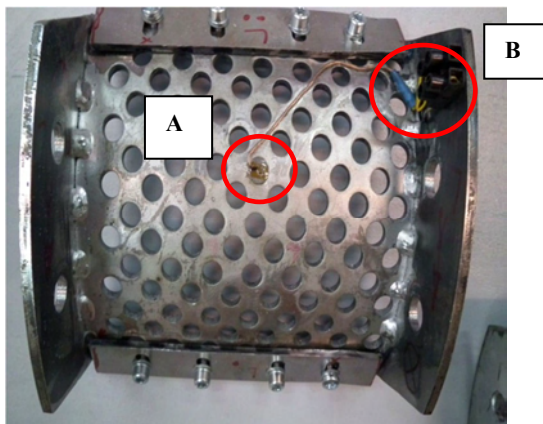


Rys. 3.13. Zestaw sit o różnej wielkości otworów; widok zewnętrznej strony sita z widocznymi pasami regulacyjnymi wielkość powierzchni sitowej (UTP Bydgoszcz)

Przed przystąpieniem do realizacji prób rozdrabniania na powierzchni sita naklejono czujnik ETG firmy VISAY (rys. 3.14). Zastosowano czujniki o bardzo małych rozmiarach 8 x 3 mm, bardzo łatwo spajane z metalowymi powierzchniami (za pomocą specjalnego kleju epoksydowego). Pozwoliło to na pomiar temperatury on-line w punktach komory roboczej młyna, w których wprowadzenie standardowej termopary było dotychczas niemożliwe (termopara ma większe gabaryty). Zaletą zastosowanego rozwiązania była możliwość rejestracji sygnałów z czujników ETG w przetworniku ESAM Traveller-1. Kompatybilność przetwornika i czujnika zapewnił moduł LST-10C-350 firmy VISAY, którego końcówki dostosowano do wejścia przetwornika Traveller-1. Tak zaprojektowany system pomiarowy pozwolił na rejestrację i akwizycję przebiegów zmian temperatury za pomocą przetwornika Traveller-1.

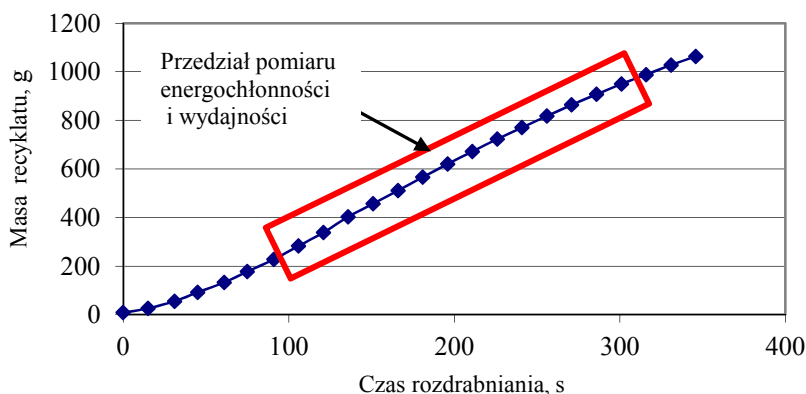
Elementy składowe firmy VISAY, po odpowiednim zmontowaniu, stanowiły tory pomiarowe stanowiska badawczego, zapewniające śledzenie dynamiki zmian temperatury podczas rozdrabniania tworzyw porowatych. Zminiaturyzowane czujniki ETG zostały naklejone pod nożem nieruchomym oraz na sicie (rys. 3.14). Możliwość pomiaru zmian cieplnych w komorze roboczej młyna była istotna, ponieważ rozdrabnianiu poddawano tworzywa termoplastyczne o temperaturze mięknięcia poniżej 100°C.



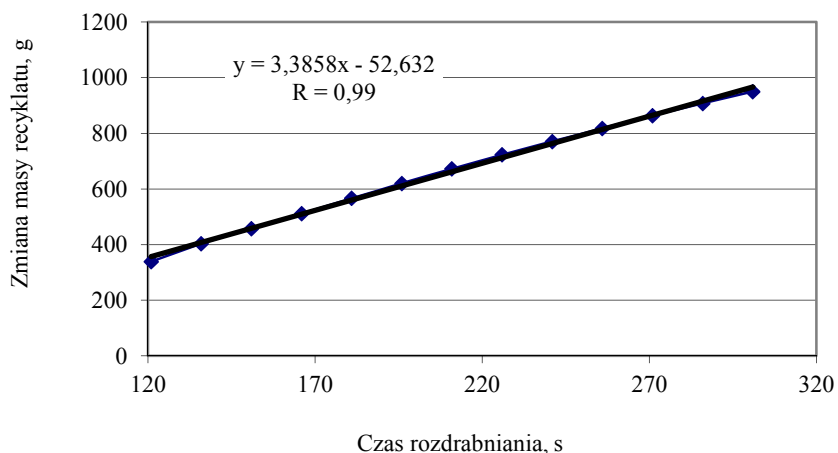


Rys. 3.14. Widok sita z naklejonym czujnikiem ETG (A) wraz z przyłączem (B) (UTP Bydgoszcz)

Pomocniczym urządzeniem stanowiącym zewnętrzne wyposażenie stanowiska do badań rozdrabniania i cięcia była waga akumulatorowa WLC 6 (Radwag) o zakresie pomiaru od 0,1 g do 6000 g (rys. 3.2). Dzięki specjalnemu programowi sterującemu odnotowywano zmiany masy recyklatów w określonych odstępach czasu. Dzięki temu zaistniała możliwość sporządzenia krzywej przyrostu masy otrzymanego materiału, uzyskanego w określonych warunkach realizacji procesu rozdrabniania (rys. 3.15). Do oszacowania wydajności i zużycia energii brano pod uwagę przedział czasowy krzywej, w którym przyrost masy recyklatu był stały (rys. 3.16). W ten sposób udało się wyodrębnić ten zakres czasowy realizacji próby, w którym wpływ nierównomierności dozowania był znikomy. Ta stabilność realizacji procesu pozwoliła na porównanie wyników prób dla różnego typu materiałów polimerowych i o różnym udziale fazy gazowej w strukturze.

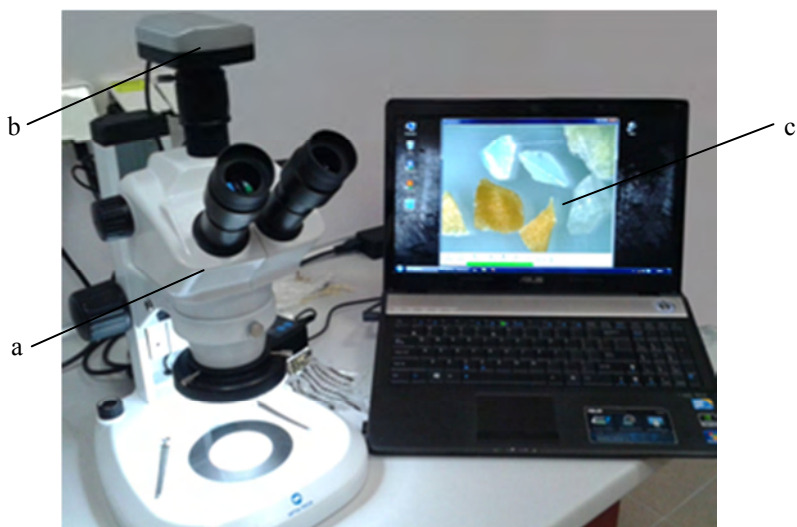


Rys. 3.15. Wykres zmian masy otrzymanego recyklatu w czasie realizacji procesu rozdrabniania na przykładzie rejestracji zrealizowanej podczas rozdrabniania polietylenu PELD z dodatkiem poroforów w ilości 1,5% mas. – badania wykonano na stanowisku do rozdrabniania w UTP Bydgoszcz



Rys. 3.16. Fragment wykresu zmian masy otrzymanego w trakcie rozdrabniania recyklatu, dla którego oszacowano zużycie energii i wydajność procesu rozdrabniania PELD z dodatkiem 1,5% mas. poroforów; zakres dotyczy tej części krzywej z rysunku 3.15, w której można wyróżnić proporcjonalny przyrost masy recyklatu w czasie

Dodatkowe wyposażenie stanowiska do badania cięcia i rozdrabniania stanowił sprzęt pomiarowy do oceny właściwości granulometrycznych recyklatów. Rejestracji obrazów dokonano za pomocą mikroskopu stereoskopowego (rys. 3.17). Dane techniczne mikroskopu zawarto w tabeli 3.1.



Rys. 3.17. Stanowisko do rejestracji i analizy obrazu: a – mikroskop stereoskopowy, b – kamera cyfrowa, c – komputer z odpowiednim oprogramowaniem (UTP Bydgoszcz)

Obraz z mikroskopu przekazywano automatycznie do kamery OPTA-TECH stworzonej w oparciu o przetworniki CMOS o rozdzielczości 3 mega pikseli (2048 x 1536). W zestawie z kamerą dostarczane było oprogramowanie do rejestracji i analizy obrazów.

Tabela 3.1. Szczegóły techniczne użytego do badań mikroskopu stereoskopowego

Głowica	głowica z regulacją rozstawu okularów 52÷75 mm, kąt pochylenia okularów 45°; głowica trójokularowa (binokularowa z dodatkowym torem wizyjnym dedykowanym do instalacji kamery)
Okulary	PL10X/22mm szerokopolewe z regulacją dioptryjną
Zakres zoom głowicy	0,8÷5
Współczynnik zoom głowicy	6,3 : 1
Odległość robocza	115 mm
Zakres powiększeń	8 X – 100 X
Regulacja ostrości	dwustronny mechanizm ustawiania ostrości
Oświetlenie	jasne oświetlenie diodowe o regulowanej intensywności. EPI – do światła odbitego o regulowanym kącie świecenia. DIA – do światła przechodzącego. Średnica szklanej płytki przedmiotowej 100 mm

Zastosowany w badaniach mikroskop firmy OPTA-TECH serii SN został wyposażony dodatkowo w diodowy, pierścieniowy system oświetlenia, zapewniający równomierne oświetlenie badanej próbki. Dzięki sterowaniu natężeniem oświetlenia odpowiednich stref wyeliminowano cienie, co z punktu widzenia analizy obrazu odgrywa kluczową rolę. W optycznych badaniach cech geometrycznych ziaren recyklatów wykorzystano program OptaView 7.1 firmy OPTA-TECH, który służył do zarejestrowania obrazów ziaren. Analizę ich cech geometrycznych przeprowadzono w programie Multi-Scan w wersji 18.03 firmy Computer Scanning Systems II. Program ten umożliwiał ręczną, jak i zautomatyzowaną analizę zapisanych obrazów dzięki funkcjom specjalnym i makropoleceniom. Pozwoliło to między innymi na automatyczne szacowanie cech geometrycznych zbioru ziaren na podstawie zapisu cyfrowego obrazów.

## 4. PIERWOTNE WYTWARZANIE I WŁAŚCIWOŚCI POLIOLEFINOWYCH TWORZYW POROWATYCH

### 4.1. PRÓBKI POLIMEROWYCH MATERIAŁÓW POROWATYCH WYTWORZONYCH METODĄ WTRYSKIWANIA PORUJĄCEGO

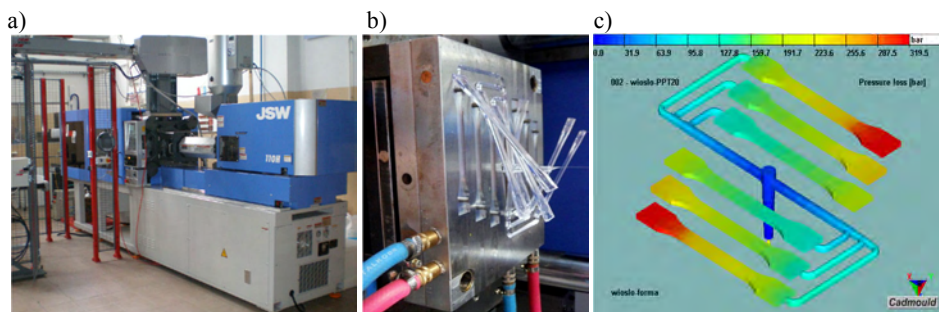
Do wytworzenia tworzyw porowatych użyto granulatów PELD i PP, które przed zasypaniem do leja wtryskarki wymieszano w stanie stałym z koncentratem substancji porującej w odpowiednim stosunku masowym. Jako porofor zastosowano Hydrocerol CF 40E (Clariant), którego właściwości przedstawiono w tabeli 4.1. Wybór ten poprzedziła analiza, której celem było odpowiednie skojarzenie zakresu temperatury uplastyczniania poliolefin z właściwościami substancji porującej, przy uwzględnieniu kompatybilności nośnika poroforów do wybranych do badań tworzyw.

Tabela 4.1. Charakterystyka przetwórcza porofora [8, 146]

Porofor	Właściwości	
Hydrocerol CF 40E	użyta postać	40-procentowy koncentrat w postaci granulatu z aktywnym środkiem nukleującym
	substancja czynna	system wielokomponentowy oparty na mieszaninie bikarbonatów i kwasów cytrynowych
	charakterystyka	przebieg rozkładu endotermiczny w temperaturze 175 °C oraz w temperaturze 205 °C
	przetwarzanie	zalecana temperatura przetwórstwa w zakresie od 190 do 230 °C
	zastosowanie	porowanie przy wtryskiwaniu i wytłaczaniu, np. do drobnokomórkowej struktury

Do wytworzenia próbek porowatych wykorzystano wtryskarkę o napędach elektrycznych JSW 110H (JSW), o sile zamykania formy 1100 kN (rys. 4.1). Zastosowanie napędów elektrycznych pozwoliło na precyzyjne sterowanie fazą wtrysku i docisku, co zwiększyło powtarzalność właściwości uzyskanych wyprasek. Regulacja temperatury stref grzejnych z dokładnością 0,1°C zwiększała prawdopodobieństwo uzyskania oczekiwanego efektu porowania w odpowiednim zakresie temperatury uplastyczniania.

Jako narzędzia przetwórczego użyto 6-gniazdową, zimnokanałową formę wtryskową, wyposażoną w układ chłodzenia, umożliwiającą jej podłączenie do urządzenia termostatującego (rys. 4.1b). Gwarantowało to realizację prób wtryskowych z odpowiednią powtarzalnością, zwłaszcza jeśli chodzi o czas i intensywność rozkładu poroforów w trakcie krzepnięcia wyprasek w formie wtryskowej. Forma wtryskowa była wyrównoważona reologicznie, co zapewniało jednoczesne wypełnianie wszystkich gniazd. Prace w tym zakresie wspomagano analizami uzyskanymi dzięki użyciu programu do symulacji procesu wtryskiwania Cadmould 3D-F wersja 5 firmy SIMCON. Dzięki numerycznemu zamodelowaniu przewęzek o różnym przekroju poprzecznym, ustalone relacje pomiędzy ich przekrojami pozwoliły na wypełnienie stoponionym tworzywem poliolefinowym wszystkich gniazd formy w tym samym czasie podczas realizacji fazy wtrysku.



Rys. 4.1. Stanowisko do wykonania próbek badawczych z tworzyw porowatych: a) wtryskarka JSW 110H, b) forma wtryskowa 6-gniazdowa, c) przykładowy obraz symulacji procesu wtryskiwania polipropylenu do formy badawczej 6-gniazdowej (UTP Bydgoszcz)

### Wypraski z polietylenu małej gęstości PELD

Wypraski wytworzono z polietylenu małej gęstości Riblene PELD MR 10 firmy Polimeri Europa, z jednoczesnym dozowaniem zgranulowanego koncentratu porofo-ru w ilości 0,5, 1,0, 1,5 oraz 2,0% mas. Jeden z rodzajów próbek o zawartości 2% mas. porofo-ru wykonano bez zastosowania fazy docisku (oznaczenie PELD 2% BD). Proces wtryskiwania realizowano przy następujących parametrach: a) temperatura uplastyczniania w poszczególnych strefach wtryskarki: dysza – 200°C, strefa IV – 200°C, strefa III – 195°C, strefa II – 185°C, strefa I – 180°C; b) ciśnienie wtryskiwania – 80 MPa, c) ciśnienie docisku – 40 MPa, d) czas wtrysku – 1,2 s, e) czas docisku – 30 s, f) czas chłodzenia – 35 s.

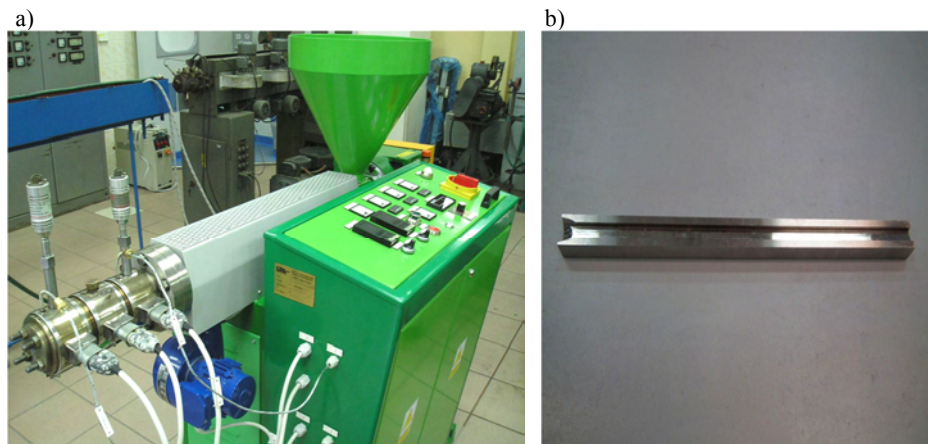
### Próbki wtryskowe z polipropylenu PP

Wypraski wytworzono z polipropylenu HP500J firmy Basell, z jednoczesnym dozowaniem koncentratu porofo-ru Hydrocerol CF 40E (Clariant) w ilości 0,5, 1,0, 2%. Jeden z rodzajów materiału o zawartości 2% mas. porofo-ru wykonano bez zastosowania fazy docisku (oznaczenie PP 2%BD). Proces wtryskiwania realizowano przy następujących parametrach: a) temperatura uplastyczniania w poszczególnych strefach wtryskarki: dysza – 250°C, strefa IV – 245°C, strefa III – 240°C, strefa II – 230°C, strefa I – 220°C; b) ciśnienie wtryskiwania – 80 MPa, c) ciśnienie docisku – 40 MPa, d) czas wtrysku – 1,2 s, e) czas docisku – 20 s, f) czas chłodzenia – 25 s. Próbki o grubości  $4 \cdot 10^{-3}$  m miały kształt zgodny z normą PN-EN ISO 527-2.

## 4.2. PRÓBKIE POLIOLEFINOWYCH MATERIAŁÓW POROWATYCH WYTWORZONYCH METODĄ WYTŁACZANIA PORUJĄCEGO

Porowate wytłoczyny otrzymano w laboratoryjnej wytłaczarce W-25, przeznaczonej do wyznaczania charakterystyk reologicznych polimerów. Maszynę wyposażono w trójstrefową głowicę wytłaczarską o przekroju ustnika 13,5 x 7,5 mm, z niezależnym pomiarem temperatury i ciśnienia w dwóch strefach (rys. 4.2a). Dzięki trójstrefowemu systemowi grzania, poprzez zmianę temperatury uplastyczniania, można było sterować intensywnością rozkładu porofo-ru w polimerowym stopie. Głowicę wytłaczarską wyposażono ponadto w element formujący strugę uplastycznionego tworzywa, którego kanał rozprowadzający na całej długości miał przekrój 13,5 x 7,5 mm (rys. 4.2b).

W efekcie uzyskano oczekiwane, bardziej intensywne wyporowanie środka chemicznego w stopionym, litym tworzywie polimerowym.



Rys. 4.2. Stanowisko do wytłaczania próbek badawczych: a) wytłaczarka laboratoryjna W-25 z trójstrefową głowicą wytłaczarską, b) kanał rozprowadzający w głowicy wytłaczarskiej o przekroju 13,5 x 7,5 mm (UTP Bydgoszcz)

Do wytłaczania z jednoczesnym porowaniem zastosowano jako środek porotwórczy Expancel 980 MBX 120 firmy Akzo Nobel. Porofor ten wybrano po wykonaniu wstępnych badań. Kryterium decydującym o wyborze rodzaju poroforu chemicznego był stopień redukcji gęstości uzyskanych wytłoczyn. Środek porujący Expancel 980 MBX 120 to zbiór mikrosfer wypełnionych gazem, otulonych hermetyczną powłoką zewnętrzną [85]. Podczas podgrzewania, w napełnionych sferami gazowymi termoplastycie, osłony gazu ulegają zmiękczeniu i dzięki temu gaz rozpręża się w rozszerzającej się otulinie i jednocześnie w stopionym polimerze. Porofor ten jest zalecany zarówno do wtryskiwania, jak i wytłaczania w zakresie temperatury uplastyczniania 200-230°C. Te dane należy jednak traktować jako orientacyjne, ponieważ na końcowy efekt porowania istotny wpływ wywiera także czas przetwórstwa, parametry procesowe i szybkość płynięcia. Wybrany porofor jest przeznaczony do porowania tworzyw termoplastycznych, modyfikuje właściwości reologiczne i fizyczne uzyskanych wytworów. Środek porujący w postaci koncentratu dodaje się w ilości do 6% mas., przy czym efekt porowania zależy od efektywności wzrostu mikrosfer, który z kolei jest wypadkową przyjętych warunków przetwarzania tworzywa. Według danych producenta, w zależności od intensywności wzrostu mikrosfer zawartych w poroforze Expancel 980 MBX 120 można uzyskać wytwory o różnej gęstości (tab. 4.2). Zmiany te wynikają z przyjętych nastaw procesowych i według tych danych dla polipropylenu można zredukować gęstość do poziomu około 40% wartości gęstości litego tworzywa.

Tabela 4.2. Wpływ udziału środka porującego na zmiany gęstości mieszaniny polimerowo-gazowej [85]

Gęstość osnowy, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Udział środka porującego Expancel 980 MBX 120, % mas.	Gęstość mieszaniny przy wzroście mikrosfer do gęstości $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Gęstość mieszaniny przy wzroście mikrosfer do gęstości $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
1000	2	730	610
1000	3	640	510
1000	4	560	440
1000	5	510	380
900	2	670	570
900	3	600	480
900	4	540	420
900	5	490	370

Producent nie precyzuje w jakiej technologii przetwórstwa polimerów można te wartości gęstości uzyskać.

### Próbki porowate z polietylenu małej gęstości

Do wytłoczenia próbek porowatych użyto Malen FABS 23002 (Basell). Porofor w postaci koncentratu dodano do PELD w ilości 1, 2 i 4% mas. Proces wytłaczania wytworów porowatych zrealizowano przy następujących nastawach procesowych: a) temperatura w układzie uplastyczniania wytłaczarki: strefa I –  $90^{\circ}\text{C}$ , strefa II –  $175^{\circ}\text{C}$ , strefa III –  $175^{\circ}\text{C}$ , b) temperatura w głowicy wytłaczarskiej: strefa I –  $150^{\circ}\text{C}$ , strefa II –  $145^{\circ}\text{C}$ ; c) prędkość obrotowa ślimaka  $n_s = 1,58 \text{ s}^{-1}$ . Uzyskano profile o średnim przekroju wytłoczyny porowatej  $14,20 \times 7,24 \text{ mm}$ .

### Próbki porowate z polipropylenu

Do otrzymania polipropylenu porowatego wykorzystano Moplen HP 456J firmy Basell. Porofor w postaci koncentratu dodano do PP w ilości 1, 2 i 4% mas. Proces wytłaczania wytworów porowatych zrealizowano przy następujących nastawach procesowych: a) temperatura w układzie uplastyczniania wytłaczarki: strefa I –  $165^{\circ}\text{C}$ , strefa II –  $220^{\circ}\text{C}$ , strefa III –  $215^{\circ}\text{C}$ , b) temperatura w głowicy wytłaczarskiej: strefa I –  $185^{\circ}\text{C}$ , strefa II –  $175^{\circ}\text{C}$ ; c) prędkość obrotowa ślimaka  $n_s = 1,42 \text{ s}^{-1}$ . Otrzymano profile o średnim przekroju wytłoczyny  $14,1 \times 7,7 \text{ mm}$ .

Badania cięcia i rozdrabniania przeprowadzono także z użyciem gotowych wytworów o strukturze porowatej, wykonanych z polietylenu małej gęstości. Próbki te charakteryzowały się znaczącym udziałem porów zamkniętych. Modyfikacja struktury PELD odbyła się metodą porowania fizycznego, stąd również w tym przypadku uzyskano bardzo znaczącą redukcję gęstości. Użyte w badaniach cięcia i rozdrabniania wytwory charakteryzowały się gęstością na poziomie  $30,61 \pm 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Wytypowanie tego materiału do badań wynikało z dużego udziału w rynku tworzyw porowatych wytworów porowanych fizycznie, stosowanych w przemyśle opakowaniowym. Tendencja, którą obserwuje się obecnie w tym sektorze gospodarki, to zastępowanie miękkich i twardych pianek PUR poliolefinowymi materiałami porowatymi zarówno z polietylenu jak i polipropylenu. Dla ułatwienia omawiania uzyskanych wyników badań, w dalszej części

pracy zastosowano system oznaczeń, zawierający skrót tworzywa, ilość porofora oraz symbol sposobu wytworzenia próbek. Poniżej przedstawiono schemat oznaczania:

$$wX Y\% BD \quad (4.1)$$

gdzie:

- w – oznacza wykonanie materiału w technologii wytłaczania,
- X – oznacza skrót tworzywa polimerowego, np. PP,
- Y – oznacza masową procentową zawartość poroforu, zastosowanego w materiale,
- BD – oznacza wykonanie wyprasek bez realizacji fazy docisku.

Przykładowo, próbki wtryskowe z polipropylenu wytworzonej metodą wytłaczania zawierający 1% substancji porotwórczej oznaczano symbolem **wPP 1%**.

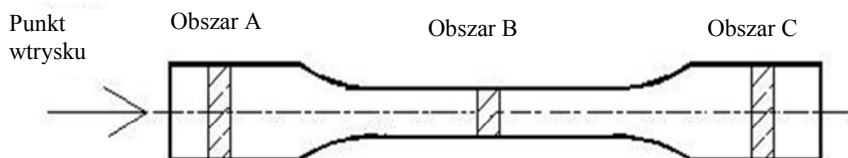
### 4.3. OCENA STRUKTURY I WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH MATERIAŁÓW DO BADANIA PROCESÓW CIĘCIA I ROZDRABNIANIA

#### 4.3.1. Metodyka badań

Badania materiałowe przeprowadzono z wykorzystaniem aparatury badawczej, będącej na wyposażeniu Zakładu Przetwórstwa i Recyklingu Tworzyw WIM UTP w Bydgoszczy oraz w Zakładzie Technologii Polimerów WTiCh UTP w Bydgoszczy.

Zakres badań obejmował: a) oznaczenie gęstości, b) określenie stopnia krystaliczności wybranych termoplastów o strukturze porowatej, c) oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości w próbie statycznego rozciągania, d) wykonanie prób udarowego rozciągania, e) oznaczenia twardości metodą wciskania kulki i Shore'a.

Badania zrealizowano zgodnie z procedurami badawczymi zawartymi w normach oraz w oparciu o doświadczenia własne. Kondycjonowanie próbek przed wyznaczeniem cech materiałowych przeprowadzono zgodnie z normami ISO 291 i PN-EN ISO 2231 w temperaturze  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  w atmosferze o wilgotności  $50 \pm 5\%$  przez okres czasu 16 godzin. Oznaczenie gęstości przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 1183-1 metodą zanurzeniową, przy wykorzystaniu wagi laboratoryjnej AD 50 firmy AXIS o dokładności pomiaru 0,0001 g, a także poprzez pomiar masy i wymiarów próbek na sucho. W przypadku wyprasek pomiar gęstości wykonywano na wycinkach, które pobierano z określonych miejsc wytworu (rys. 4.3).



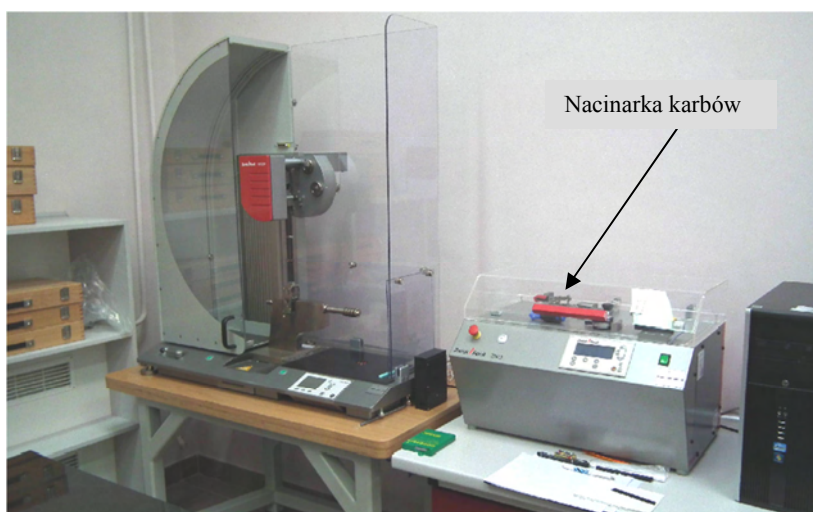
Rys. 4.3. Miejsca pobrania próbek do badania gęstości

Wyznaczenie odporności na obciążenia udarowe przeprowadzono zgodnie z normami PN-EN ISO 179-1:2004 i PN-ISO 8256 (udarowe rozciąganie). Do badań zastosowano młot udarowy HIT 50P firmy Zwick/Roel, wyposażony w zestaw 13 wadła roboczych, przystosowany do realizacji prób Charpy'ego i udarowego rozciągania



w temperaturze od pokojowej do  $-40^{\circ}\text{C}$ , w zakresie pracy wahadła od 0 do 50 J (rys. 4.4). Do wyznaczania przekrojów próbek zastosowano mikrometr o dokładności pomiarowej 0,01 mm. Pomiar grubości odbywał się za każdym razem, w miejscu późniejszego zetknięcia się próbki z końcówką roboczą wahadła młota. Wartość udarności określono zgodnie z normami EN ISO 179-1:2004, PN-ISO 8256 oraz PN-EN ISO 180 odnosząc energię zużytą na złamanie próbki do przekroju początkowego próbki w płaszczyźnie złamania. Rejestracja i oznaczenie udarności odbywało się automatycznie w programie TestXpert® II firmy Zwick/Roell.

Metodę udarowego rozciągania zastosowano do tworzyw poliolefinowych uważając, że jej przydatność do oceny właściwości mechanicznych jest znacznie większa od realizacji prób metodą Charpy'ego [32, 50, 57, 117]. Ze względu na powszechnie znane właściwości zarówno PE jak i PP, oszacowanie energii pochłoniętej na złamanie próbki dla tych materiałów jest trudne ze względu na ich odkształcenie plastyczne (efekt zgięcia i zabielenia powierzchni). Ponadto materiały te nie wykazują oznak złamania w przekroju oddziaływania wahadła. W badaniach udarowego rozciągania próbka podlega rozciąganiu i ulega zerwaniu w miejscu obustronnie naciętego karbu, o kształcie zgodnym z zapisami normy PN-ISO 8256 (str. 9 normy). Do nacięcia karbu wykorzystano automatyczną nacinarkę karbów ZNO firmy Zwick/Roell (rys. 4.4), wyposażoną w głowicę frezarską z frezem o geometrii pozwalającej na uzyskanie karbu o promieniu podstawy  $1,0\pm 0,02$  mm i kącie  $45^{\circ}\pm 1^{\circ}$ .

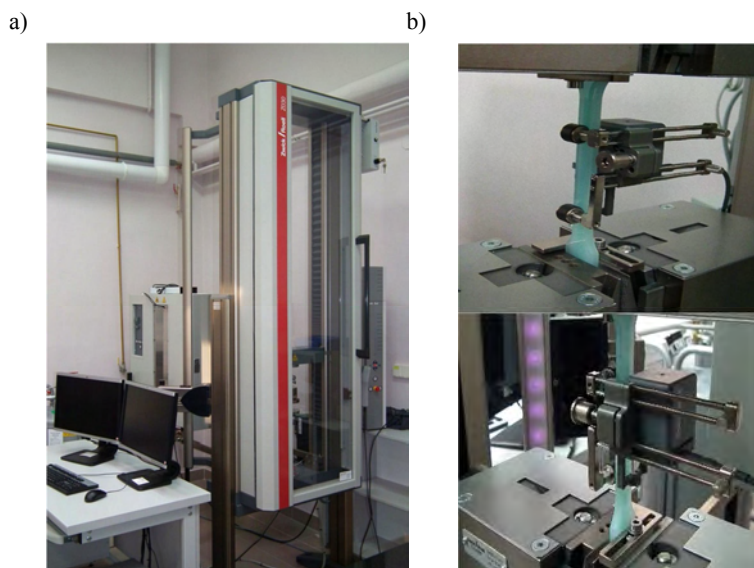


Rys. 4.4. Widok młota udarowego HIT 50P z nacinarką karbu ZNO firmy Zwick/Roell (UTP Bydgoszcz)

Badanie statycznego rozciągania polegało na poddawaniu próbki obciążeniu narastającemu, z prędkością przesuwu części ruchomej głowicy pomiarowej wynoszącej odpowiednio  $0,833\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Wytrzymałość na rozciąganie i współczynnik sprężystości wzdłużnej wyznaczono zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1. Próby przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Z030 firmy Zwick/Roell (rys. 4.5a). Wydłużenie próbki mierzono przy wykorzystaniu ekstensometru analogowego o bazie pomiarowej 50 mm, mocowanego na części pomiarowej próbki (rys. 4.5b). Dodatkowo, odkształcenie bez-

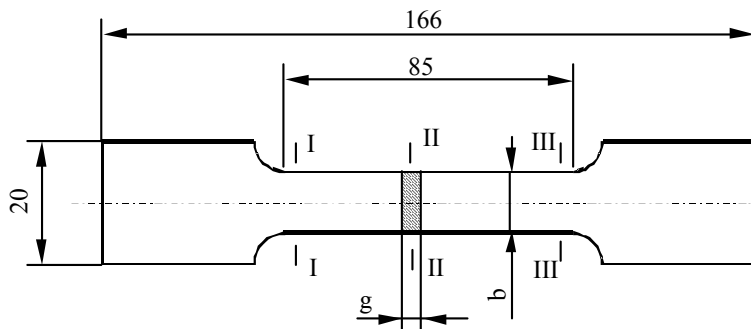
względne mierzono za pomocą bezdotykowego ekstensometru videoXtens. Próby przeprowadzono w temperaturze 23°C.

Określenie wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości odbywało się automatycznie w programie do sterowania pracą maszyny TestXpert® II firmy Zwick/Roell. Dodatkowo, zweryfikowano wyniki dla modułu Younga, poprzez wyliczenie jego wartości na podstawie przebiegu krzywej  $\sigma(\epsilon)$ .



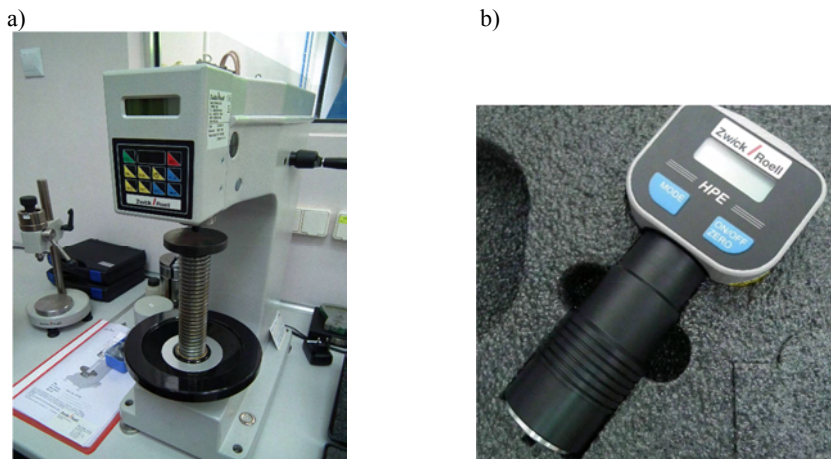
Rys. 4.5. Widok maszyny wytrzymałościowej Z030 (a) oraz próbki materiałowej zamocowanej w uchwytach z zamontowanym ekstensometrem (b) (UTP Bydgoszcz)

Wypraski wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 527, natomiast w przypadku próbek uzyskanych w procesie wytłaczania, losowo wycinano odcinki pomiarowe wyłoczyn o długości 170 mm. Kształt i wymiary próbek badawczych pokazano na rysunku 4.6.



Rys. 4.6. Kształt i wymiary wyprasek wykorzystanych w statycznej próbie rozciągania

Pomiar twardości metodą wciskania kulki przeprowadzono za pomocą twardościomierza H 04.3106.01 firmy Zwick/Roell, natomiast metodą Shore'a A na twardościomierzu HPE II firmy Zwick/Roell, zgodnie z normami PN-EN ISO 2039-1:2004 oraz PN-EN ISO 868:1998 (rys. 4.7). Dobór tych dwóch urządzeń wynikał z faktu, że w przypadku próbek z porowatego PELD, kulka pomiarowa zagłębiała się w materiale badanym na głębokość powyżej 0,35 mm przy obciążeniu badawczym 49N. Próbki do badań stanowiły wioselka wtryskowe oraz odcinki wytłocznin o wymiarach pozwalających spełnić wymogi norm. Oznaczenie twardości przeprowadzono w kilku punktach, z uwzględnieniem położenia punktu wtrysku (rys. 4.8).



Rys. 4.7. Stanowisko do pomiaru twardości firmy Zwick/Roell: a) aparat do pomiaru twardości metodą wciskania kulki, b) twardościomierz Shore'a [UTP Bydgoszcz]



Rys. 4.8. Punkty pomiaru twardości na wypraskach wtryskowych

Oznaczenie stopnia krystaliczności wykonano za pomocą różnicowego kalorymetru skaningowego DSC 204 firmy Netzsch. Do określenia stopnia krystaliczności konieczna była znajomość entalpii topnienia dla materiału o 100% zawartości fazy krystalicznej. Wartość ta w przypadku PELD wynosi  $290 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  (materiały Netzsch) lub  $293 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  (materiały Mettler Toledo). Do obliczeń zastosowano wzór:

$$K_{\%x} = \Delta H_x / \Delta H_{100\%} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

gdzie:

- $K_{\%x}$  – stopień krystaliczności badanego materiału,
- $\Delta H_x$  – entalpia topnienia analizowanego polimeru,
- $\Delta H_{100\%}$  – entalpia topnienia materiału o 100% krystaliczności.

Zrealizowano dwa przejścia cykli topnienie-krzepnięcie. Pierwszy cykl grzania ujawnia cechy polimeru związane z historią przetwórczą materiału, czyli wpływ parametrów przetwórczych na strukturę krystaliczną materiału. Drugi etap obejmujący I chłodzenie i II grzanie ujawnia „czystą” charakterystykę struktury krystalicznej materiału w zdefiniowanych warunkach topnienia i krystalizacji. Dlatego dalsza analiza obejmowała wyznaczenie temperatury krystalizacji I chłodzenia i temperaturę topnienia II grzania. Entalpie topnienia fazy krystalicznej (efekt topnienia rejestrowany w postaci piku na wykresie) określono dla przemiany podczas II cyklu grzania. W celu pełniejszej oceny uzyskanych wyników we wszystkich badaniach określono wartość odchylenia standardowego od średniej pomiarowej.

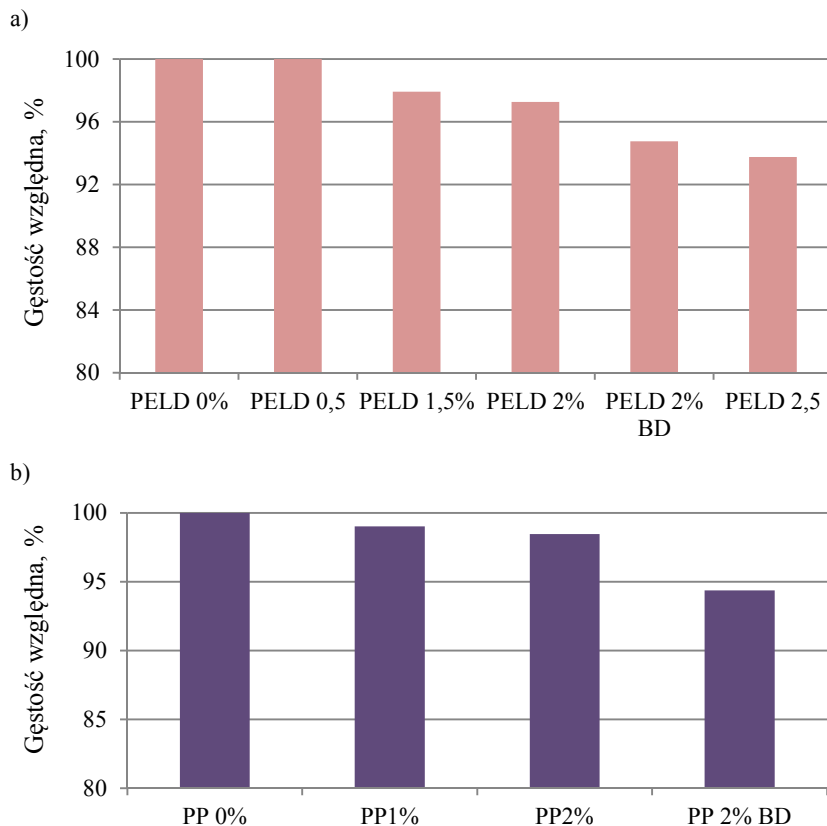
### 4.3.2. Wyniki badań

#### 4.3.2.1. Gęstość

Wartości gęstości porowatych próbek wtryskowych wykonanych z polietylenu małej gęstości, polipropylenu i polistyrenu przedstawiono w tabeli 4.3. Analiza wyników wskazuje, że dodatek poroforów spowodował redukcję gęstości wyprasek zarówno dla polietylenu, jak i polipropylenu. Zmiany te są najbardziej widoczne dla wytworów uzyskanych bez realizacji w cyklu przetwórczym fazy docisku (rys. 4.9, 4.10). Jednocześnie stwierdzono, że wraz ze wzrostem ilości środka porotwórczego w masie stopionego tworzywa wzrasta tendencja do nierównomiernego rozkładu porów gazowych w objętości wypraski, o czym świadczą różnice w gęstości fragmentów wytworów pobranych do badania (tab. 4.3). Jest to zgodne z doniesieniami naukowymi i dotychczas zrealizowanymi pracami własnymi, które wskazują na istotny wpływ temperatury stopionego tworzywa i ilości poroforów na intensywność porowania substancji chemicznych w objętości wytworu. Nierównomierny rozkład porów jest tym bardziej widoczny, gdy występuje duży gradient temperatury w gnieździe formy podczas krzepnięcia stopionego tworzywa, a wypraska charakteryzuje się grubością ścian powyżej 4 mm.

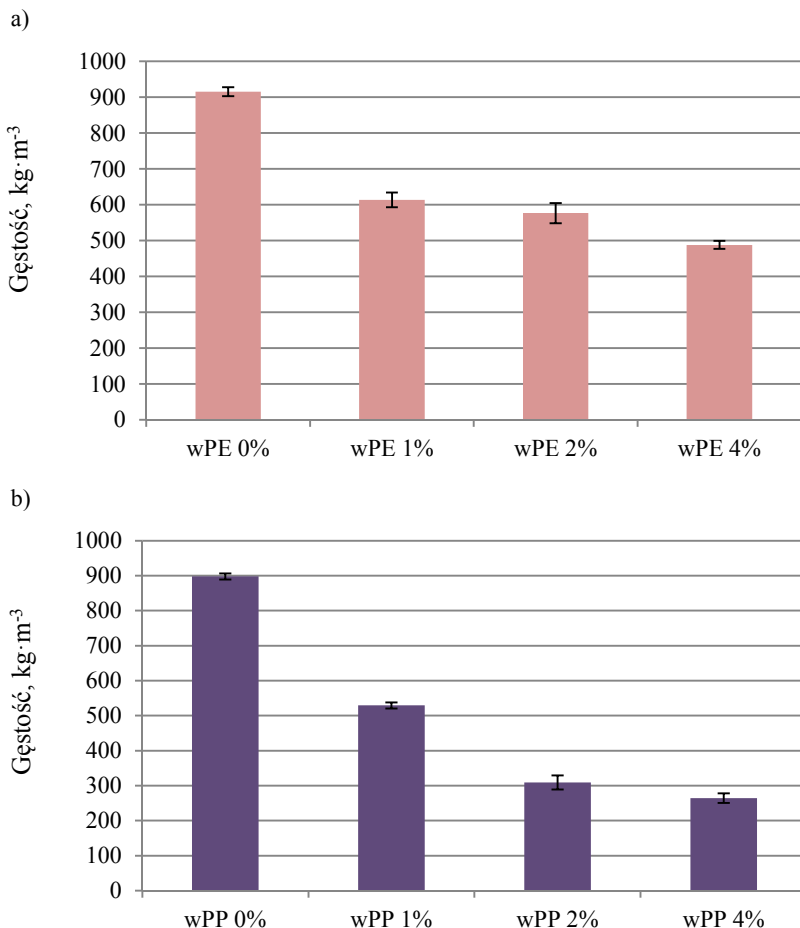
Tabela 4.3. Gęstość wyprasek z PELD w zależności od zawartości poroforów

Rodzaj tworzywa	Rodzaj próbki, ilość poroforów	Gęstość materiału, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ Punkty pomiarowe (oznaczenie zgodnie z rys. 4.3)			Gęstość średnia, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
		A	B	C	
PELD	PELD 0%	914±2	913±1	913±1	913±2
	PELD 0,5	912±2	913±2	912±2	913±2
	PELD 1,5%	903±2	897±4	0,881±2	894±1
	PELD 2%	899±3	894±4	871±10	888±2
	PELD 2% BD	881±5	870±20	846±20	865±30
	PELD 2,5	871±10	865±30	832±10	856±20
PP	PP 0%	903±3	907±2	903±3	904±4
	PP 1%	894±3	897±2	895±3	895±4
	PP 2%	886±3	897±3	887±3	890±9
	PP 2% BD	860±2	868±3	832±3	853±20



Rys. 4.9. Zmiana gęstości poliolefin porowatych w odniesieniu do litych tworzyw

W przypadku próbek uzyskanych metodą wytłaczania intensywność wyporowania poroforów jest znacznie wyższa niż wyprasek wtryskowych (rys. 4.10). Powodem większej redukcji gęstości jest sam proces przetwórczy o charakterze ciągłym, w którym tworzywo w postaci wytłoczyny krzepnie znacznie dłużej niż podczas formowania w gnieździe formy wtryskowej. Z tego powodu czas oddziaływania ciepła na porofory jest znacznie dłuższy, co skutkuje większym rozrostem porów (rys. 4.10). Dla tworzyw poliolefinowych intensywność porowania wyniosła dla PELD około 50% masy w odniesieniu do litej próbki, a w przypadku polipropylenu zredukowano gęstość w stosunku do litego PP aż o 70%. W porównaniu z danymi zawartymi w materiałach firmy AKZO NOBEL, producenta środków porujących Expancel, zredukowano gęstość materiałów, zwłaszcza polipropylenu, znacznie intensywniej (por. tab. 4.2). Gęstość próbek polietylenu porowanego fizycznie wyniosła  $30,6 \pm 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .



Rys. 4.10. Wpływ zawartości poroforów na gęstość wycieczyn z poliolefin

Można zauważyć, że w procesie wytłaczania z wykorzystaniem poroforów chemicznych uzyskano redukcję gęstości polipropylenu, w zakresie charakterystycznym dla tworzyw modyfikowanych przez porowanie fizyczne gazem obojętnym (por. [8, 85]).

#### 4.3.2.2. Zawartość fazy krystalicznej

##### Próbki wtryskowe z polietylenu

Otrzymane wartości stopnia krystaliczności zestawiono w tabeli 4.4. Temperatura topnienia ( $T_i$ ) (II przebieg) badanych materiałów nieznacznie ulega zmianie i wynosi ok.  $105^\circ\text{C}$ . Jedynie w przypadku próbki oznaczonej symbolem xPE  $T_t$  jest wyższa i wynosi  $113,7^\circ\text{C}$ . Dla tej próbki również temperatura krystalizacji  $T_k$  jest wyższa i wynosi  $98^\circ\text{C}$ . W przypadku pozostałych badanych materiałów  $T_k$  wzrasta w porównaniu z materiałem niemodyfikowanym. Zaobserwowano niewielkie zmiany w obliczonym udziale fazy krystalicznej badanych materiałów. Dla polietylenu niemodyfikowa-

nego zawartość fazy krystalicznej wynosi ok. 26% (uwzględniając, że entalpia topnienia materiału o 100% krystaliczności wynosi  $290 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ ). Próbka xPE jest materiałem o innych właściwościach cieplnych niż wyjściowy PELD. Jego temperatura topnienia i krystalizacji jest znacząco wyższa w porównaniu z niemodyfikowanym PELD.

Tabela 4.4. Zestawienie wyników badań DSC dla próbek wykonanych z PELD

nazwa	I przebieg				II przebieg			
	$T_t$ (°C)	A ( $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$T_k$ (°C)	K (100%- $290 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$T_t$ (°C)	A ( $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$T_k$ (°C)	K (100%- $290 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ )
PE 0%	107,7	73,49	87,2	25,3	105	76,49	87,2	26,4
PE 0,5%	106,7	73,58	89,5	25,4	104,9	75,46	89,6	26,0
PE 2%	106,5	76,98	89,7	26,5	104,7	79,73	89,8	27,5
PE 2% BD	108,1	72,24	89,6	24,9	105,2	73,66	89,6	25,4
xPE	116,3	96,98	98	33,4	113,7	94,4	98,1	32,6

### Próbki wtryskowe z PP

Zestawienie wyników stopnia krystaliczności przedstawiono w tabeli 4.5. Dodatek 2% mas. poroforów i wykonanie próbek bez realizacji fazy docisku (próbka oznaczona PP 2% BD) spowodował niewielki wzrost temperatury topnienia i krystalizacji materiału pierwotnego PP i jego recyklatu w porównaniu z próbką niemodyfikowaną.

Tabela 4.5. Zestawienie wyników badań DSC dla próbek wykonanych z PP

nazwa	I przebieg				II przebieg			
	$T_t$ (°C)	A ( $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$T_k$ (°C)	K (100%- $290 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$T_t$ (°C)	A ( $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$T_k$ (°C)	K (100%- $290 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ )
PP 0%	167,5	84,07	120,9	42,5	163,5	92,34	120,9	46,6
PP 2% BD	166,7	84,38	123	42,6	164,1	89,17	123,1	45,0

Zawartość fazy krystalicznej w modyfikowanych próbkach jest nieznacznie mniejsza niż w próbce materiału PP 0%. Próbki PP 2% BD zawierały niebieski barwnik i z tego powodu nie można jednoznacznie wykluczyć, że zaobserwowane zmiany są wywołane dodatkiem tego barwnika, gdyż może on wzmacniać nukleację w osnowie PP.

### Próbki wytłaczane

Wyniki oznaczania stopnia krystaliczności wytłoczonego z PELD zawarto w tabeli 4.6. Temperatura topnienia (II przebieg) próbki wytłoczonej z niemodyfikowanego polietylenu wynosi  $112,8^\circ\text{C}$ , a krystalizacji  $98,1^\circ\text{C}$ . Temperatura topnienia porowatego PELD zawierającego 4% mas. środka porotwórczego Expancel jest wyższa i wynosi  $113,7^\circ\text{C}$ . Stopień krystaliczności materiału porowanego jest niższy niż dla polietylenu niemodyfikowanego.

Tabela 4.6. Zestawienie wyników badań DSC dla próbek wykonanych z wPELD

nazwa	I przebieg				II przebieg			
	T <sub>t</sub> (°C)	A (J·g <sup>-1</sup> )	T <sub>k</sub> (°C)	K (100%-290 J·g <sup>-1</sup> )	T <sub>t</sub> (°C)	A (J·g <sup>-1</sup> )	T <sub>k</sub> (°C)	K (100%-290 J·g <sup>-1</sup> )
wPELD 0%	115,6	92,67	98	32,0	112,8	100,5	98,1	34,3
wPELD 4%	114,1	87,84	97	30,3	113,7	89,31	97	30,5

Jednocześnie można zauważyć, że zawartość fazy krystalicznej w próbkach PELD uzyskanych metodą wtryskiwania jest istotnie niższa niż dla próbek wytłoczonych.

#### 4.3.2.3. Wytrzymałość na rozciąganie

Modyfikowanie struktury polietylenu małej gęstości poroforem chemicznym nie zmienia istotnie jego wartości wytrzymałości na rozciąganie (tab. 4.7). We wszystkich przypadkach uzyskana wartość  $R_m$  oscyluje w przedziale od 7,65 do 8,58 MPa. Większą zmiennością charakteryzuje się współczynnik sprężystości wzdłużnej, przy czym największe zmiany w stosunku do litego PELD charakteryzują próbki o zawartości poroforów 1 i 1,5% mas.

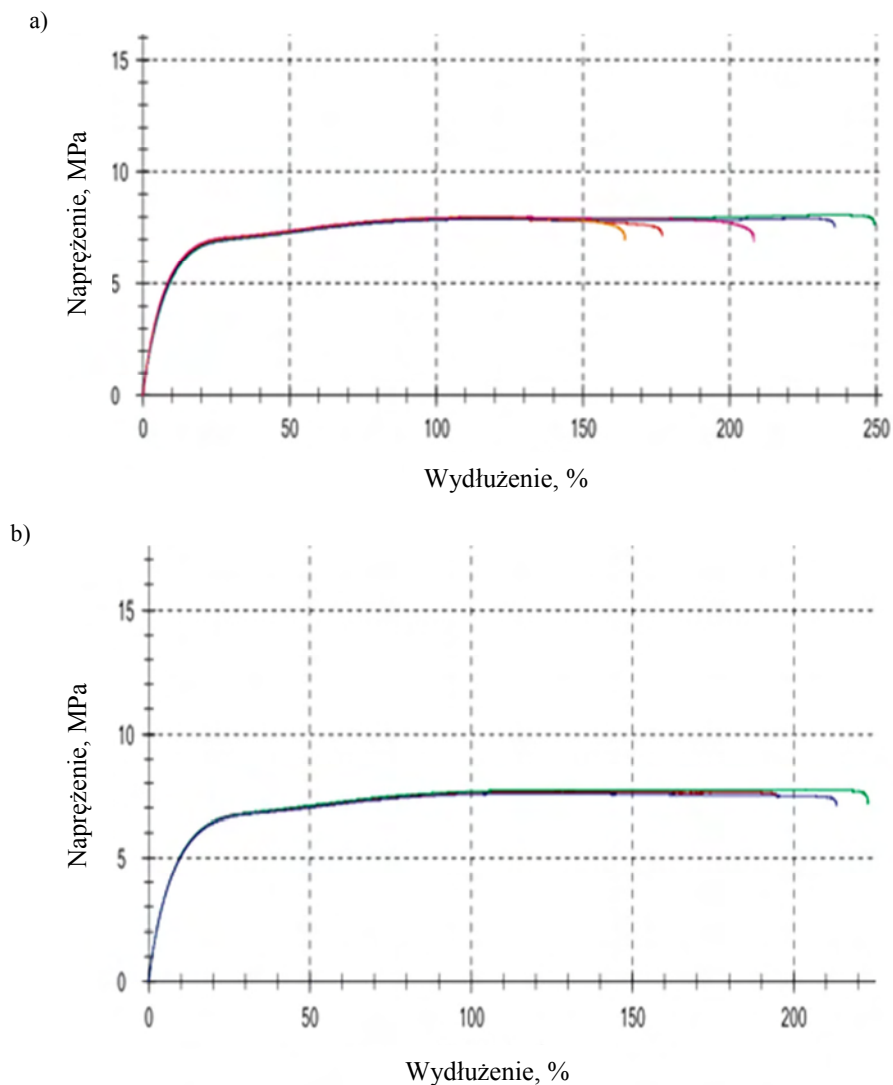
Tabela 4.7. Wpływ zawartości poroforów na właściwości wytrzymałościowe wyprasek z PELD

Rodzaj materiału	Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Moduł Younga, MPa	Odształcenie względne, %
PELD 0%	7,97±0,1	78,9±3,6	162,6±62,7
PELD 0,5%	8,23±0,2	80,1±2,1	225,2±104,6
PELD 1%	8,32±0,3	123,5±2,1	156,8±80,6
PELD 1,5%	8,54±0,6	136,0±2,1	140,1±92,2
PELD 2%	8,58±0,3	101,0±9,4	330,8±34,2
PELD 2% BD	7,65±0,4	77,8±0,1	151,6±45,2

Największej sztywności spośród przebadanych wyprasek z polietylenu towarzyszy spadek odkształcenia względnego  $\epsilon_m$ , co świadczy o umocnieniu się struktury polietylenu przy zawartości porofora 1 i 1,5%. Charakter przebiegu krzywych wytrzymałościowych  $\sigma(\epsilon)$  nie zmienia się wraz ze wzrostem zawartości poroforu (rys. 4.11).

Dla próbek z polipropylenu otrzymanych w procesie wtryskiwania wyniki przedstawiono w tabeli 4.8. Wzrost zawartości poroforów powoduje spadek wartości wytrzymałości na rozciąganie oraz modułu Younga, zwłaszcza dla próbek wtryskowych uzyskanych bez oddziaływania docisku w trakcie realizacji procesu wtryskiwania. Zauważalny wzrost wartości odkształcenia względnego dla próbek o strukturze polimero-gazowej wskazuje, że pory zwiększają udział fazy elastycznej w polipropylenie. Jest to odmienne w stosunku do wyprasek z PELD, dla których zaobserwowano nieznaczne wzmocnienie struktury porami gazowymi, pomimo nieznacznego spadku udziału fazy krystalicznej w strukturze porowatej (tab. 4.4 dla próbki wykonanej z PELD 2% BD). Niewielkie dodanie poroforów do litego polipropylenu spowodowało obniżenie jego wartości modułu sprężystości o ponad 40%.



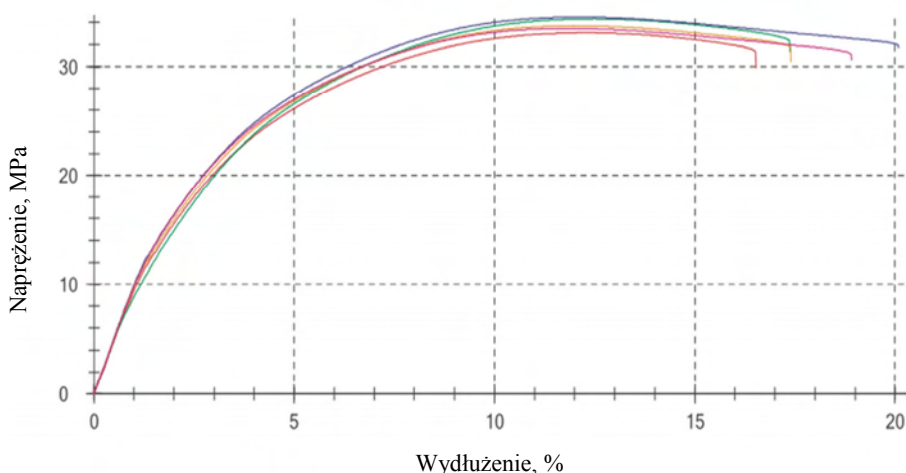


Rys. 4.11. Przebieg zmian  $\sigma(\epsilon)$  podczas prób statycznego rozciągania próbek wtryskowych z polietylenu: a) PELD 0%, b) PELD 2% BD; kolorami oznaczono kolejne próby

Tabela 4.8. Właściwości wytrzymałościowe wyprasek z polipropylenu o różnej zawartości poroforów, wyznaczone w próbie statycznego rozciągania

Rodzaj materiału	Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Moduł Younga, MPa	Odkształcenie względne, %
PP 0%	36,0±0,5	1610±38,6	7,5±0,2
PP 1%	34,5±0,3	949±6,6	12,4±0,1
PP 2%	33,8±0,6	933±16,6	12,2±0,2
PP 2% BD	32,7±0,4	917±19,5	11,4±0,2

W przypadku próbek z polipropylenu porowatego charakter przebiegu krzywych zarejestrowanych podczas statycznego rozciągania jest zbliżony do PELD. Jednak można zauważyć, że dla PP uzyskano znacznie mniejsze wartości odkształcenia względne, co może świadczyć o potencjalnie odmiennym zachowaniu się obu materiałów w próbach cięcia i rozdrabniania (rys. 4.12). Dominujący, w stosunku do PP, udział odkształceń plastycznych charakterystyczny dla PELD wskazuje na odmienne zachowanie się obu materiałów na skutek oddziaływania obciążeń zewnętrznych.

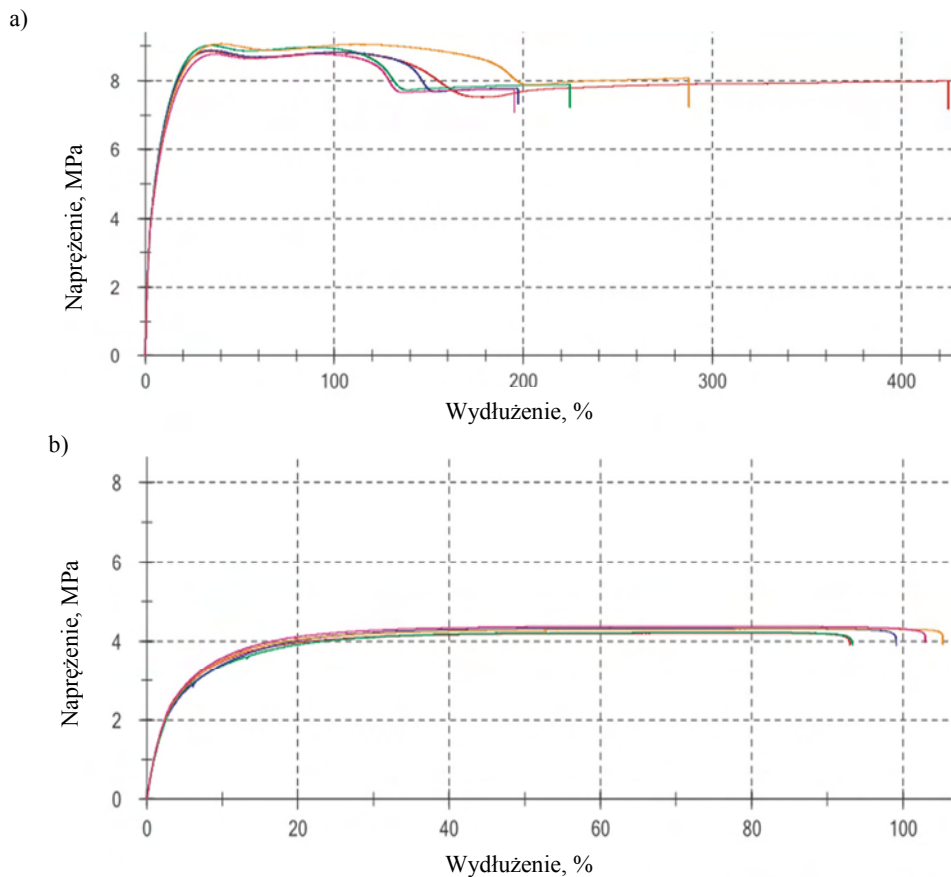


Rys. 4.12. Przykładowe przebiegi zmian  $\sigma(\epsilon)$  uzyskane w próbie statycznego rozciągania dla próbek z polipropylenu z udziałem 2% mas. poroforów; kolorami oznaczono kolejne próby

Oznaczenie cech wytrzymałościowych w próbie statycznego rozciągania zrealizowano także dla próbek uzyskanych w procesie wytłaczania porującego. Uzyskane rezultaty przedstawiono w tabeli 4.9. W przypadku próbek z PELD otrzymanych metodą wytłaczania porującego wzrost zawartości poroforów powoduje istotne obniżenie zarówno wytrzymałości na rozciąganie, jak i współczynnika sprężystości wzdłużnej, a także zwiększenie odkształcalności, zwłaszcza w przypadku zawartości w materiale wsadowym 2 i 4 % mas. poroforów. Zmienia się także charakter przebiegów krzywych na wykresach rozciągania (rys. 4.13).

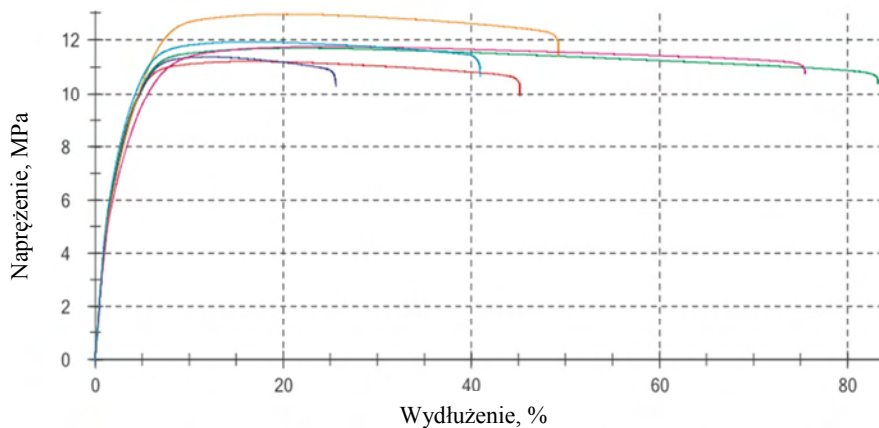
Tabela 4.9. Zestawienie wyników oznaczenia cech wytrzymałościowych w próbie statycznego rozciągania dla próbek porowatych otrzymanych w wytłaczarce

Rodzaj materiału		Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Moduł Younga, MPa	Odkształcenie względne, %
wPELD	wPELD 0%	8,9±0,1	166±3,4	46,9±24,9
	wPELD 1%	6,9±0,1	138±4,4	37,6±2,8
	wPELD 2%	5,4±0,1	109±4,8	65,2±8,5
	wPELD 4%	4,3±0,1	91±3,0	74,2±11,7
wPP	wPP 0%	23,5±1,2	629±51,9	25,2±2,8
	wPP 1%	16,6±2,3	525±57,5	21,0±1,0
	wPP 2%	11,8±0,6	424±26,6	18,5±4,3
	wPP 4%	7,9±0,8	302±24,5	14,2±2,5



Rys. 4.13. Przebieg zmian  $\sigma(\epsilon)$  podczas rozciągania wytłoczniny z PELD: a) lita wytłocznina z PELD, b) próbka porowata o zawartości 4% mas. poroforów; kolorami oznaczono kolejne próby

Porowanie struktury polipropylenu metodą chemiczną podczas wytłaczania powoduje obok zmniejszenia gęstości, także pogorszenie odporności materiału na naprężenia rozciągające oraz istotne obniżenie wartości współczynnika sprężystości wzdłużnej. Duży udział porów gazowych wpływa także na większą odkształcalność materiału, ale po przekroczeniu maksymalnych naprężeń rozciągających (rys. 4.14). Próbki wykonane z litego polipropylenu ulegają zerwaniu przy dwukrotnie mniejszym odkształceniu względnym w porównaniu z próbkami o największej zawartości poroforów. W tym ostatnim przypadku po osiągnięciu maksymalnych naprężeń rozciągających następuje długotrwałe odkształcenie plastyczne próbek (ciągnięcie) aż do zerwania, zachodzącego przy nieco obniżonych w stosunku do  $R_m$  wartościach naprężeń. Zatem dodanie do wytłaczanego polipropylenu chemicznych środków porotwórczych powoduje zwiększenie udziału fazy elastycznej, którą stanowią pory gazowe.

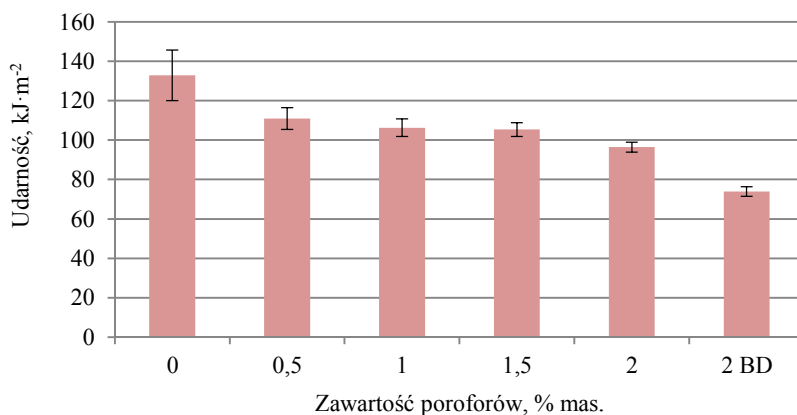


Rys. 4.14. Przykładowe wykresy zmian  $\sigma(\epsilon)$  zarejestrowane podczas próby statycznego rozciągania wytłoczyn z polipropylenu o zawartości 2% poroforów; kolorami oznaczono kolejne próby

Można także zauważyć, że pojawienie się porów gazowych likwiduje charakterystyczny dla tworzyw krystalicznych efekt wzmocnienia materiału na skutek dużego odkształcenia, tzw. „efekt szyjkowania”[69].

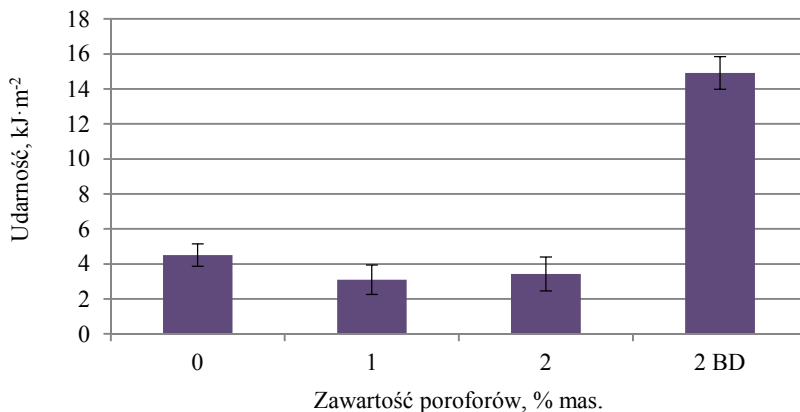
#### 4.3.2.4. Udarność

Wprowadzenie do struktury polietylenu porów gazowych spowodowało istotne obniżenie jego zdolności do oddziaływania na udarowe obciążenie (rys. 4.15). Największe zmiany zaobserwowano dla próbek wytryskowych wykonanych bez docisku (oznaczenie – PELD2% BD). Oprócz zauważalnej tendencji do obniżania zdolności materiału do pochłaniania energii podczas udarowego oddziaływania naprężeń rozciągających, stwierdzono niewielki rozrzut wyników od średniej pomiarowej dla próbek porowatych.



Rys. 4.15. Wpływ zawartości poroforów na zdolność polietylenu małej gęstości do pochłaniania energii podczas udarowego oddziaływania obciążenia

Zaskakująca jest tak duża różnica w wartościach udarowego rozciągania pomiędzy próbkami z PELD i PP (rys. 4.15 i 4.16). Mała wartość udarności polipropylenu, a jednocześnie odbiegający od pozostałych wynik dla wyprasek otrzymanych bez oddziaływania docisku (oznaczenie na wykresie 4.16 – 2 BD), wskazuje na istotny wpływ porów gazowych na zachowanie się materiału w trakcie próby.

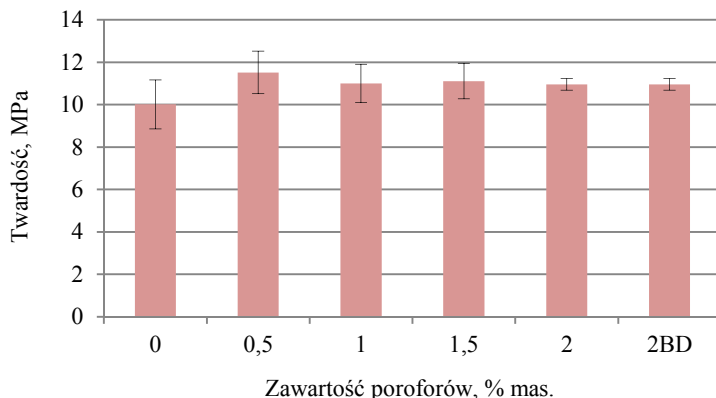


Rys. 4.16. Wpływ zawartości poroforów na zdolność polipropylenu do pochłaniania energii podczas próby udarowego rozciągania

Wydaje się, że duże znaczenie w tym przypadku odgrywa podatność materiału na odkształcenie do uzyskania maksymalnej wartości naprężenia w statycznej próbie rozciągania (por. tab. 4.8). Sztywny, poddany oddziaływaniu siły rozciągającej, zwłaszcza w obszarze naciętego karbu, polipropyleń łatwo pęka, a zjawisko to ogranicza jedynie duża zawartość porów (PP2% BD).

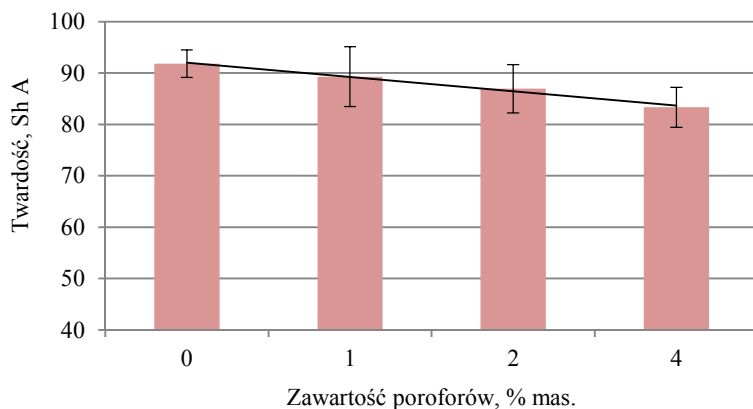
#### 4.3.2.5. Twardość

Twardość próbek z polietylenu małej gęstości wykonanych metodą wtryskiwania nie zmienia się istotnie wraz z zawartością fazy gazowej w strukturze materiału (rys. 4.17). Wynika to z faktu małego udziału fazy gazowej w objętości materiału, a także z powodu umiejscowienia porów w części rdzeniowej wypraski.



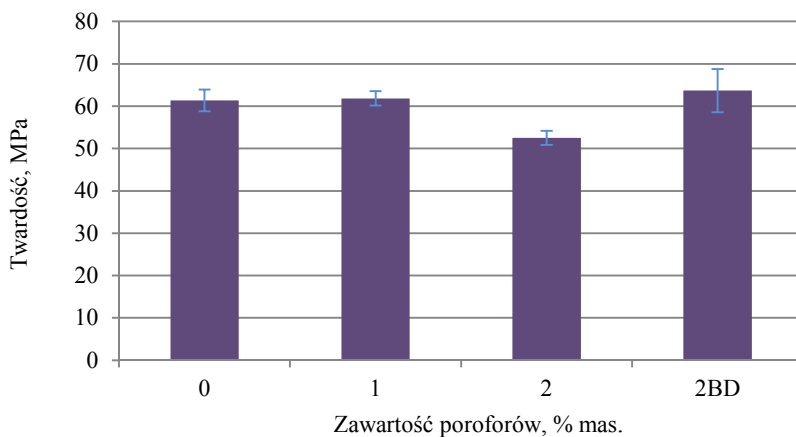
Rys. 4.17. Wpływ zawartości poroforów na twardość wyprasek wtryskowych z PELD

Zupełnie inny obraz przedstawiają wytłoczyny, w strukturze których pory zajmują znacznie większy udział. Z tych powodów twardość tych materiałów liniowo zmniejsza się wraz ze wzrostem ilości użytych środków porotwórczych (rys. 4.18). W strukturze wytłoczonego jest tak duża ilość porów zamkniętych, że badanie twardości należało przeprowadzić metodą Shore'a. Porowate wytłoczyny z PELD charakteryzowały się bowiem dużą elastycznością i były podatne na odkształcenia, co uniemożliwiało pomiar metodą weiskania kulki.

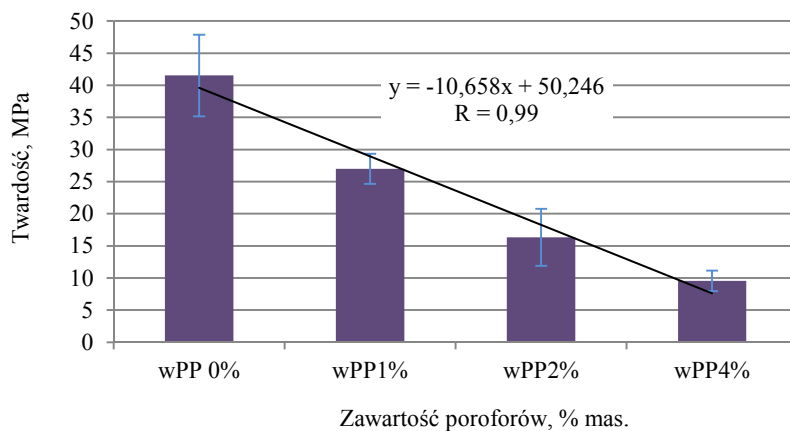


Rys. 4.18. Wpływ zawartości poroforów na twardość wytłoczonego z PELD

Wartości twardości wyprasek z polipropylenu zawierającego porofory nie różnią się istotnie od próbek wykonanych z litego PP (rys. 4.19), w przeciwieństwie do próbek wytłoczonych, dla których wzrost ilości porów spowodował liniowy spadek twardości (4.20). Podobnie jak w przypadku PELD liczne pory gazowe w strukturze wytłoczonego z PP podnoszą podatność tego materiału na odkształcenia.



Rys. 4.19. Wpływ zawartości poroforów na twardość wyprasek z PP



Rys. 4.20. Wpływ zawartości poroforów na twardość wytłocznin z polipropylenu

Zarówno w przypadku wytłocznin z polietylenu, jak i polipropylenu zmiany twardości w funkcji udziału poroforów można opisać zależnością matematyczną.

## 5. BADANIA PROCESU CIĘCIA POLIOLEFIN POROWATYCH OTRZYMANÝCH W PIERWOTNYM PRZETWÓRSTWIE

### 5.1. METODYKA BADAŃ

Do prób wykorzystano materiały opisane w rozdziale 4 niniejszej pracy. Dla każdego rodzaju próbek wykonano 12 przecięć, które każdorazowo rejestrowano w programie ESAM. Uzyskane przebiegi analizowano pod kątem wyznaczenia maksymalnej siły tnącej i momentu obrotowego od siły tnącej, a także w celu ustalenia czasu przecięcia i charakteru obserwowanych zmian. Badania cięcia wykonano na stanowisku opisanym w rozdziale 3 pracy i przedstawionym na rysunku 3.1.

W zrealizowanych badaniach cięcia wyróżniono 3 grupy czynników zmiennych. Są to:

- A) grupa czynników materiałowych:
  - a) rodzaj tworzywa termoplastycznego,
  - b) zawartość poroforów zastosowanych do modyfikacji tworzywa,
  - c) rodzaj poroforu zastosowanego w badaniach,
  - d) sposób wytworzenia materiału porowatego;
- B) grupa czynników technologicznych:
  - a) wielkość szczeliny pomiędzy nożami ruchomymi i nieruchomymi,
  - b) prędkość obwodowa noży ruchomych;
- C) geometria noży tnących:
  - a) wartość pochylenia krawędzi tnącej noży ruchomych i nieruchomych
  - b) kąt ostrza noża.

W efekcie program badań procesu cięcia obejmował 8 czynników zmiennych, których wartości przedstawiono w tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Zakres zmienności czynników wejściowych

Rodzaj czynnika	Poziomy wartości
Rodzaj tworzywa	PELD; xPE; PP
Zawartość poroforów, % mas.	0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 4
Rodzaj poroforów	Hydrocerol CF 40; EXPANCEL 980 MBX 120; gaz obojętny
Sposób wytworzenia próbek	wtryskiwanie bez fazy docisku i z realizacją fazy docisku; wytłaczanie
Szczelina międzynożowa, mm	0,06; 0,5
Prędkość obwodowa noży, m·s <sup>-1</sup>	0,05; 0,3; 3; 6; 9;
Pochylenie krawędzi noży 2λ	6°; 13,5°
Kąt ostrza noża β	nieruchomy – 60°; ruchomy – 30°; 45°; 60°

Przyjęty program badań miał charakter sekwencyjny dynamiczny, przy czym punktem wyjścia do wyboru kolejnych kroków była realizacja prób cięcia przy minimalnej szczelinie między nożami tnącymi, której wartość oszacowano na poziomie 0,06 mm. Hiperboloidalny charakter cięcia zapewniało odpowiednie, wzajemne ustawienie noży tnących. Nóż nieruchomy o kącie ostrza β = 60° był pochylony do osi wirnika o kąt λ wynoszący 3°, co w korelacji z nożem ruchomym o kącie ostrza β = 60° i pochy-



lonym przeciwnie o kąt  $\lambda = -3^\circ$  dawał w efekcie pochylenie krawędzi tnących  $2\lambda = 6^\circ$ . Nóż ruchomy w podstawowej sekwencji realizowanych prób, obracał się na wirniku z prędkością obwodową  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Wybór podstawowej prędkości obwodowej noży ruchomych był wynikiem przeprowadzonych wcześniej badań cięcia i rozdrabniania materiałów polimerowych. Struktura porowata stwarzała warunki do zastosowania cięcia wolnoobrotowego, które generuje mniejszą ilość frakcji pylistych. Mniejsza zawartość pyłów obniża niebezpieczeństwo samozapłonu oraz ogranicza efekty nadpaleń drobnych ziaren w trakcie wtórnego uplastycznienia rozdrobnionego materiału.

Z uwagi na fakt, że cięcie odbywa się w szczelinie pomiędzy krawędziami tnącymi noży, kolejnym założeniem było precyzyjne pozycjonowanie próbki z dokładnością  $\pm 0,1 \text{ mm}$  w stosunku do krawędzi tnącej nieruchomego noża tnącego. W przypadku próbek wytłaczanych przekrój próbki podlegał każdorazowo pomiarom liniowym.

Podczas prób testowych cięcie odbywało się zawsze równoległe do boku próbki o szerokości  $20\cdot 10^{-3} \text{ m}$  i grubości  $4,1\cdot 10^{-3} \text{ m}$  i zachodziło w tej samej odległości od jej końca, wynoszącej  $7\cdot 10^{-3} \text{ m}$ . Podczas realizacji fazy wstępnej prędkość układu podającego dostosowano do prędkości obwodowej noży tnących. Czynność ta polegała na ustawieniu takiej prędkości liniowej w układzie podającym, aby pomiarowy nóż ruchomy, wyposażony w mostek tensometryczny, przeciął próbkę dokładnie w dwóch miejscach (sprężenie obrotów wirnika z prędkością przesuwania się materiału po taśmie). Podczas prób testowych cięcia próbek wtryskowych PELD średnia wartość siły na nożu stałym wyniosła  $401,1\pm 3,5 \text{ N}$ , natomiast dla noża ruchomego  $416,7\pm 7,3 \text{ N}$ . Uzyskane wyniki wskazują na zasadność zastosowania mechatronicznego podajnika w procesach cięcia, ponieważ świadczą o tym małe wartości odchylenia standardowego od średniej pomiarowej i wartość współczynnika zmienności, którą oszacowano na poziomie poniżej 2%. Charakterystyczne wartości otrzymane w oparciu o wykresy zmian siły i momentu obrotowego podczas cięcia poddano obróbce statystycznej.

## 5.2. ANALIZA WYNIKÓW BADANIA CIĘCIA

### 5.2.1. Cięcie próbek porowatego polipropylenu

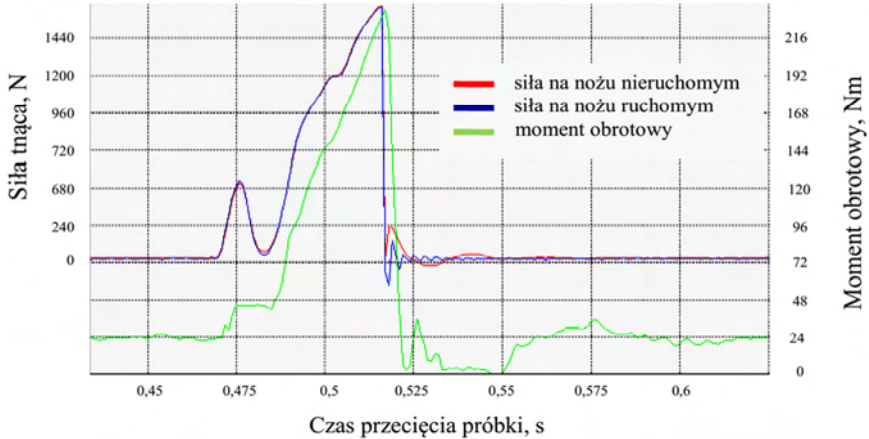
#### Wypraski

Polipropylen jest tworzywem, które w temperaturze otoczenia nie pęka samoistnie w próbie udarności metodą Charpy'ego i nie podlega opisom charakteryzujących kruche pękanie. W przypadku tego tworzywa istotny udział odkształceń plastycznych i mała wartość modułu Younga decyduje o jego zachowaniu, na skutek oddziaływania obciążeń wywołanych przez noże tnące.

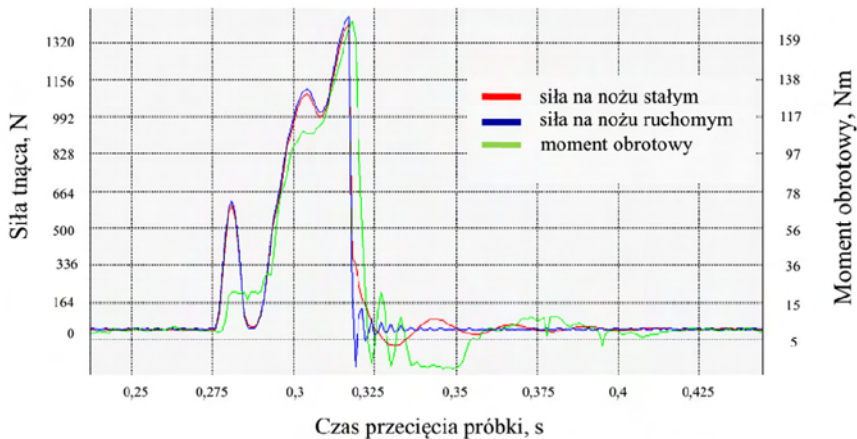
Zarejestrowane przebiegi w zestawieniu z podstawowymi parametrami (kąty ostrza  $\beta_f = 60^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , kąt pochylenia krawędzi tnących  $2\lambda = 6^\circ$ , szczelina międzynóżowa  $0,06 \text{ mm}$ , prędkość obwodowa  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) wykazują duże podobieństwo do cięcia próbek z poli(chloroku winylu), zwłaszcza o strukturze litej. Świadczą o tym także podobne wartości zarejestrowanych wartości maksymalnej siły tnącej oraz momentu obrotowego (rys. 5.1 i 5.2). Kształt krzywej dla litego PP wskazuje na wystąpienie lokalnego maksimum wartości w początkowym etapie odkształcenia materiału, po którym nastąpił charakterystyczny w swoim przebiegu wzrost siły tnącej aż do przecięcia. Krzywa

zmian momentu obrotowego swoim kształtem jest zbliżona do zmian wartości siły tnącej, zarówno na nożu nieruchomym i ruchomym (rys. 5.1a).

a)

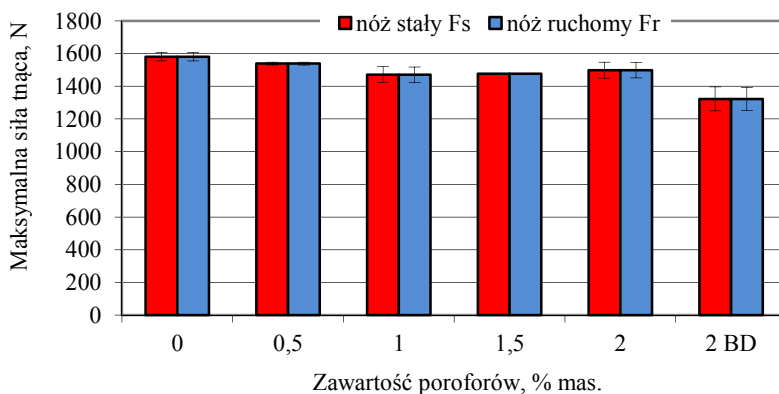


b)



Rys. 5.1. Porównanie przebiegów zmian siły i momentu obrotowego podczas cięcia próbek: a) z litego PP oraz b) PP o zawartości 2% poroforu uzyskanych bez stosowania docisku; parametry procesu: prędkość obwodowa noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąty ostrza  $\beta_f = 60^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , kąt pochylenia krawędzi tnących  $2\lambda = 6^\circ$ , szczelina międzynożowa  $0,06 \text{ mm}$

Dla próbek z polipropylenu z dodatkiem 2% poroforów zmniejszeniu uległa siła potrzebna na przecięcie i występuje podwójne lokalne maksimum na krzywych zmian wartości siły tnącej. W obu przypadkach zmiany siły na nożu ruchomym i nieruchomym są dokładnie takie same. Wydaje się, że jest to wynikiem oddziaływania na materiał noży o tej samej geometrii. Największe spadki zanotowano dla próbek z udziałem 2% poroforu, wykonanych przez wtryskiwanie bez fazy docisku (tab. 5.2).



Rys. 5.2. Wpływ zawartości poroforów na wartość maksymalnej siły tnącej podczas cięcia PP; parametry: prędkość obwodowa noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąty ostrza  $\beta_r$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , szczelina międzyżoźowa  $0,06 \text{ mm}$ , kąt pochylenia krawędzi  $2\lambda = 6^\circ$

Tabela 5.2. Charakterystyka badań cięcia próbek z PP litego i porowatego przy pochyleniu krawędzi tnącej i przy zmiennej wartości kąta ostrza noża ruchomego

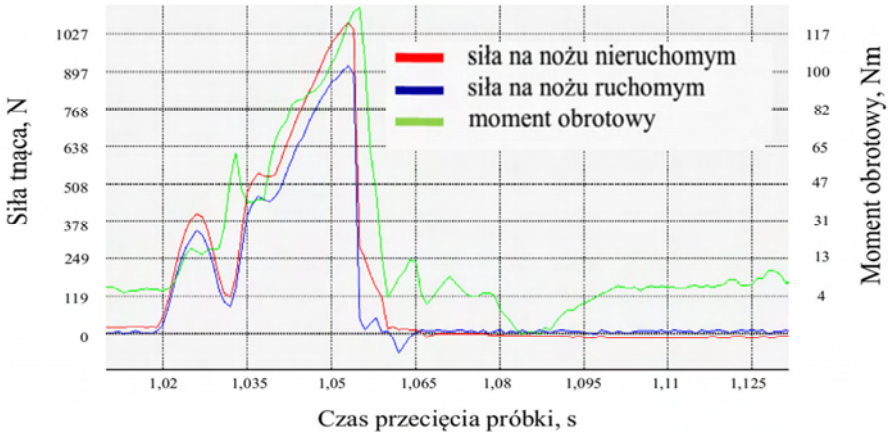
Warunki cięcia: szczelina międzyżoźowa $0,06 \text{ mm}$ , prędkość obwodowa noży ruchomych $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąt ostrza noża nieruchomego $\beta_s = 60^\circ$ , kąt ostrza noża ruchomego $\beta_r = 60^\circ$ , kąt pochylenia $2\lambda = 13,5^\circ$				
Zawartość poroforów, %	Siła na nożu nieruchomym, N	Siła na nożu ruchomym, N	Moment obrotowy, Nm	Czas przecięcia, s
0	$1146,8 \pm 47,0$	$1002,7 \pm 49,4$	$135,2 \pm 3,8$	0,05
1,0	$931,4 \pm 55,5$	$859,9 \pm 43,8$	$109,6 \pm 8,2$	0,05
1,5	$856,0 \pm 36,1$	$780,0 \pm 36,1$	$99,0 \pm 2,8$	0,04
2	$827,6 \pm 32$	$766,8 \pm 33,0$	$95,2 \pm 3,5$	0,04
2 DB	$822,4 \pm 32,2$	$741,9 \pm 50,1$	$97,7 \pm 4,3$	0,03
Warunki cięcia: szczelina międzyżoźowa $0,06 \text{ mm}$ , prędkość obwodowa noży ruchomych $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąt ostrza noża nieruchomego $\beta_s = 60^\circ$ , kąt ostrza noża ruchomego $\beta_r = 30^\circ$ , kąt pochylenia $2\lambda = 13,5^\circ$				
0	$865,6 \pm 23,1$	$1043,7 \pm 29,5$	$83,7 \pm 3,9$	0,04
1,0	$808,5 \pm 23,7$	$1016,8 \pm 25,7$	$75,5 \pm 2,8$	0,04
1,5	$787,0 \pm 2,8$	$1001,0 \pm 18,7$	$73,0 \pm 0,7$	0,04
2	$771,3 \pm 18,1$	$993,5 \pm 14,6$	$74,9 \pm 0,6$	0,03
2 DB	$728,7 \pm 31,7$	$918,1 \pm 44,3$	$71,1 \pm 2,5$	0,03
Warunki cięcia: szczelina międzyżoźowa $0,06 \text{ mm}$ , prędkość obwodowa noży ruchomych $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąt ostrza noża nieruchomego $\beta_s = 60^\circ$ , kąt ostrza noża ruchomego $\beta_r = 30^\circ$ , kąt pochylenia $2\lambda = 6^\circ$				
0	$1491,1 \pm 111,5$	$1768,0 \pm 124,6$	$184,7 \pm 4,9$	0,06
1,0	$1570 \pm 41,6$	$1870,4 \pm 52,6$	$185,1 \pm 6,6$	0,07
1,5	$1510,5 \pm 40,8$	$1800,0 \pm 60,2$	$182,5 \pm 5,4$	0,06
2	$1464,0 \pm 55,3$	$1745,0 \pm 71,4$	$179,5 \pm 9,1$	0,06
2 DB	$1341,3 \pm 45,7$	$1592,3 \pm 62,9$	$158,2 \pm 5,7$	0,06

Wydaje się, że przyczyną spadku siły o  $300 \text{ N}$  jest w tym przypadku intensywniejsze wyporowanie gazu w osnowie stopionego tworzywa. Po początkowym zauważalnym wzroście siły tnącej następuje ściśnięcie porów gazowych i wstępne nacięcie prób-

ki, po którym następuje intensywny wzrost siły aż do pełnego przecięcia materiału. Największą wartość momentu obrotowego zarejestrowano podczas cięcia litego polipropylenu na poziomie  $206,8 \pm 5,3$  Nm, natomiast najmniejszą wynoszącą  $165,0 \pm 9,3$  Nm uzyskano dla próbek bez docisku z 2% zawartością poroforu.

Zmiana kąta pochylenia krawędzi tnących noży spowodowała istotne obniżenie wartości siły tnącej i momentu obrotowego. Pochylenie krawędzi noży tnących do wartości  $2\lambda = 13,5^\circ$  zmniejszyło wartości siły tnącej o około 500-600 N (rys. 5.3).

a)



b)



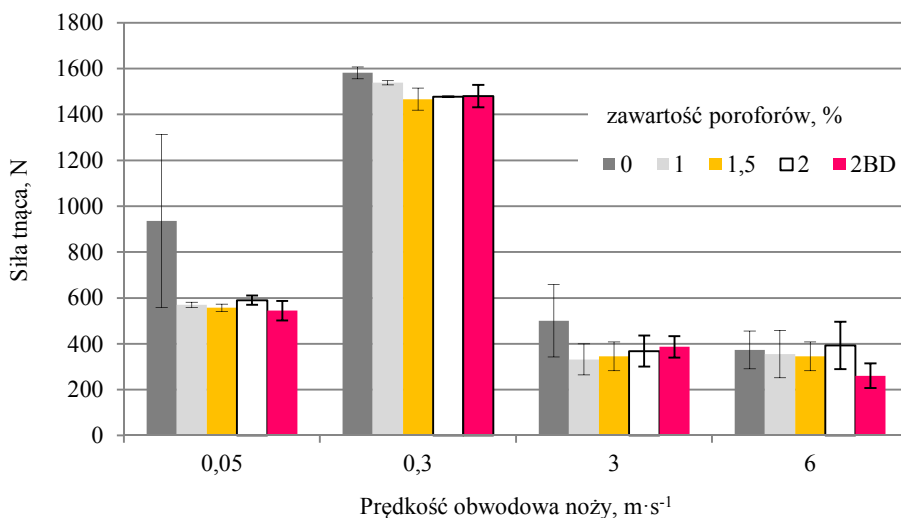
Rys. 5.3. Wpływ pochylenia krawędzi tnących  $2\lambda = 13,5^\circ$  dla przebiegów zmian siły i momentu obrotowego podczas cięcia próbek: a) z litego PP oraz b) PP o zawartości 2% poroforu uzyskanych bez stosowania docisku; pozostałe parametry: prędkość obwodowa noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąty ostrza  $\beta_r = 60^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , szczelina międzyżoźowa  $0,06 \text{ mm}$

Także wartość momentu obrotowego została zredukowana o około 30% dla PP litego oraz o około 40% dla próbki PP 2% BD. Dla polipropylenu o największej zawartości poroforów zmniejszył się także czas cięcia, co oznacza, że materiał jest bardziej podatny na quasi-cięcie. Zmniejszenie kąta ostrza noża ruchomego z  $\beta_r = 60^\circ$  do  $\beta_r = 30^\circ$

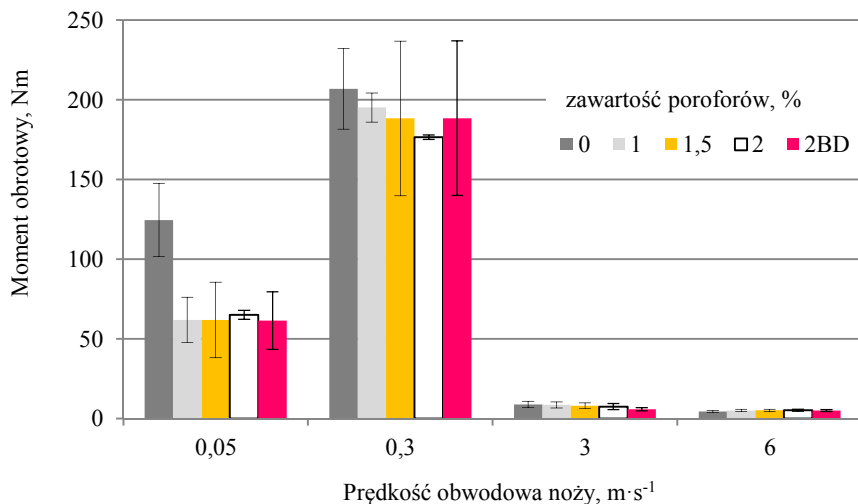
przy zachowaniu maksymalnego pochylenia krawędzi tnących noży nie powoduje dalszych, istotnych zmian w profilu przebiegów krzywych opisujących proces cięcia. Można jedynie zaobserwować bardziej intensywne obciążenie krawędzi tnącej noża ruchomego. Wydaje się, że jest to korzystna zmiana głównie dla materiału litego, natomiast dla próbek z polipropylenu porowatego nie wydaje się uzasadniona.

Cięcie próbek z PP litych i porowatych przy kącie  $2\lambda = 6^\circ$  i kątach ostrza  $\beta_s = 60^\circ$  i  $\beta_r = 30^\circ$  nie wnosi istotnych zmian w stosunku do cięcia podstawowego z parametrami  $2\lambda = 6^\circ$ ,  $\beta_s = 60^\circ$ ,  $\beta_r = 60^\circ$ . Analiza porównawcza rezultatów dla obu wariantów wskazuje na podobne wyniki, które są znacznie gorsze od uzyskanych przy maksymalnym pochyleniu krawędzi tnącej  $2\lambda = 13,5^\circ$ .

Istotnym parametrem mającym wpływ na przebieg procesu przecinania próbek z polipropylenu jest prędkość obwodowa noży ruchomych. Wraz z jej wzrostem spada wartość siły tnącej, ponieważ podział materiału następuje głównie przez pęknięcie. Świadczą o tym przebiegi zmian siły i momentu zarejestrowane w trakcie badania (rys. 5.4 i 5.5). Im wyższa prędkość, tym procesy te mają coraz większe znaczenie. Pomimo, że polipropylen ma wysoką udarność, procesy pęknięcia były główną przyczyną jego podziału w badanym zakresie prędkości obwodowej noży ruchomych od 3 do 6  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dla tych dwóch poziomów zmienności prędkości, przebiegi zmian siły i momentu obrotowego są podobne do charakterystyki cięcia próbek z PVC [131]. Można także stwierdzić, że czas przecięcia próbki wynosił od 6 do 10 milisekundy.



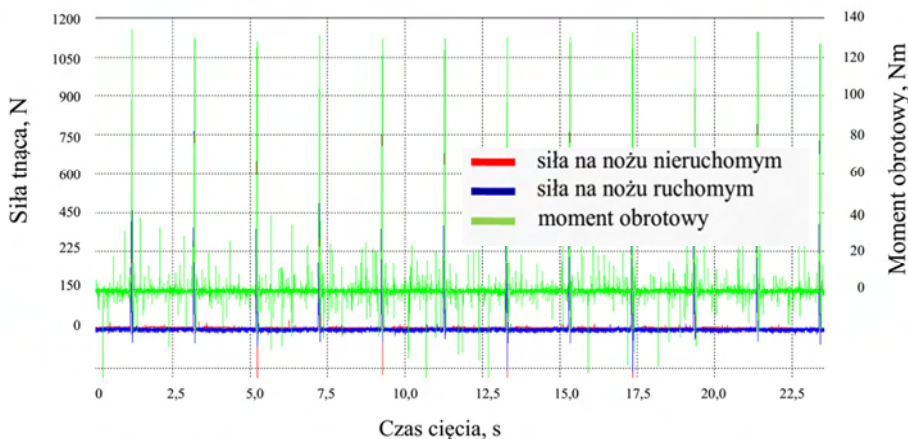
Rys. 5.4. Wpływ prędkości obwodowej noży ruchomych na zmiany maksymalnej siły tnącej podczas cięcia wyprasek z polipropylenu litego i porowatego; parametry procesu: kąty ostrza  $\beta_r = 60^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , kąt pochylenia krawędzi tnących  $2\lambda = 6^\circ$ , szczelina między-nożowa 0,06 mm



Rys. 5.5. Wpływ prędkości obwodowej noży ruchomych na zmiany momentu obrotowego podczas cięcia próbek wtryskowych z PP litego i porowatego; parametry procesu: kąty ostrza  $\beta_r = 60^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , kąt pochylenia krawędzi tnących  $2\lambda = 6^\circ$ , szczelina między-nożowa 0,06 mm

### Porowate wytłoczyny z polipropylenu

Wyniki cięcia uzyskane dla wytłocznin z udziałem 2% porofoforu wskazują, że cięte przekroje miały jednorodną strukturę, o czym świadczy wysoka powtarzalność zarejestrowanych zmian siły i momentu obrotowego podczas cięcia (rys. 5.6).

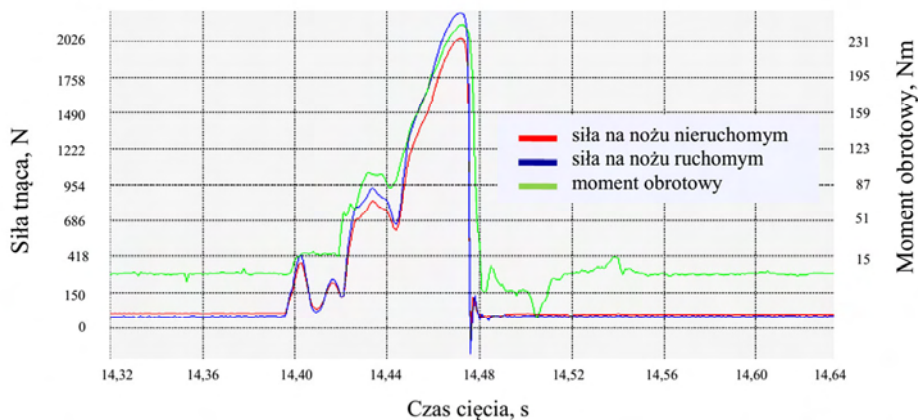


Rys. 5.6. Przebiegi zmian siły i momentu zarejestrowane podczas prób cięcia PP o zawartości 2% mas. porofoforów, przy ustawieniach noży  $2\lambda = 6^\circ$  o kątach ostrza  $\beta_s = 60^\circ$  i  $\beta_r = 60^\circ$

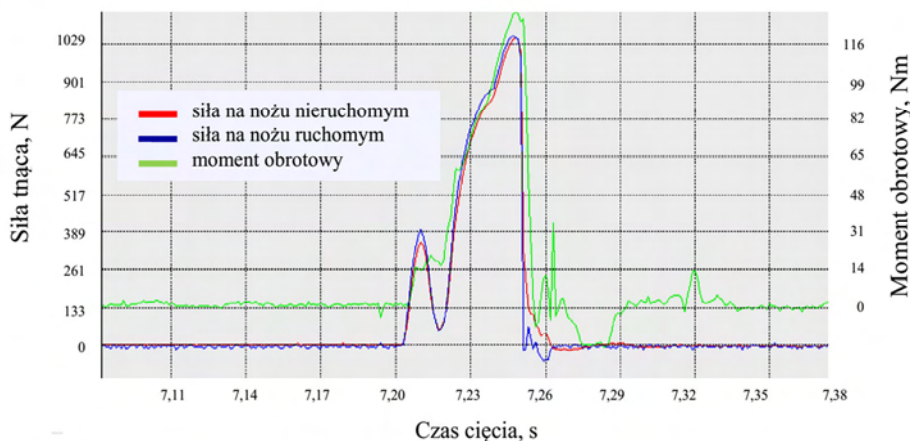
Przy podstawowym ustawieniu parametrów procesu, zarejestrowana, maksymalna wartość siły na nożu ruchomym jest istotnie wyższa niż na nożu nieruchomym (rys.

5.7). Zwykle tego typu wyniki uzyskiwano przy zastosowaniu noży o kącie  $\beta_r = 30^\circ$ . Powodem istnych różnic wartości maksymalnej siły tnącej może być fakt, że przy tak znaczącej wartości kątów ostrza, krawędź tnąca noża ruchomego w większym stopniu decydowała o przecięciu materiału, natomiast krawędź noża nieruchomego stanowiła podparcie dla materiału przecinanego. Z tego powodu ugięcie dynamicznie pracującego noża ruchomego było większe, co znalazło wyraz w wartości siły.

a)



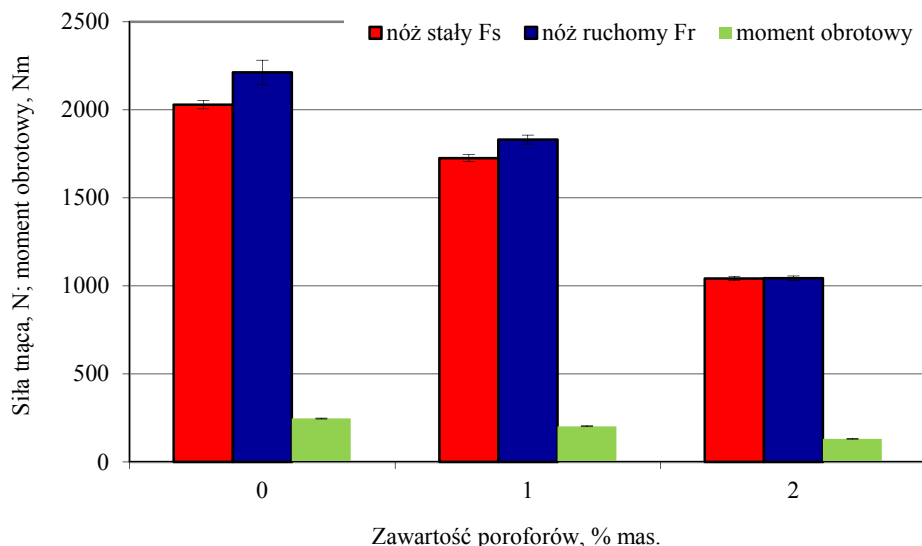
b)



Rys. 5.7. Porównanie przebiegów zmian siły i momentu obrotowego podczas cięcia próbek: a) wyłoczyna z litego PP oraz b) wyłoczyna z PP o zawartości 2% poroforów; parametry procesu: prędkość obwodowa noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąty ostrza  $\beta_r = 60^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , kąt pochylecia krawędzi tnących  $2\lambda = 6^\circ$ , szczelina międzyżoźowa  $0,06 \text{ mm}$

Analizując przebiegi z rysunków 5.4, 5.7 i 5.8 można zauważyć, że do przecięcia porowatej wyłoczyny z PP o zawartości 2% poroforów potrzebna jest znacznie mniejsza siła tnąca i moment obrotowy niż w przypadku wyprasek, co z punktu widzenia zużycia energii jest zjawiskiem korzystnym.





Rys. 5.8. Wpływ zawartości poroforów na wartości maksymalnej siły tnącej i momentu obrotowego podczas cięcia próbek wPP; parametry procesu: kąty ostrzy  $\beta_r$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , prędkość obwodowa  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , szczelina międzyżoźowa  $0,06 \text{ mm}$ , kąt pochylenia  $2\lambda = 6^\circ$

Zmiana kąta pochylenia krawędzi tnących noży nie spowodowała istotnego obniżenia wartości siły tnącej i momentu obrotowego podczas cięcia wytłocznin z polipropylenu porowatego (tab. 5.3 i rys. 5.9), natomiast wpłynęła zauważalnie na redukcję siły dla polipropylenu litego.

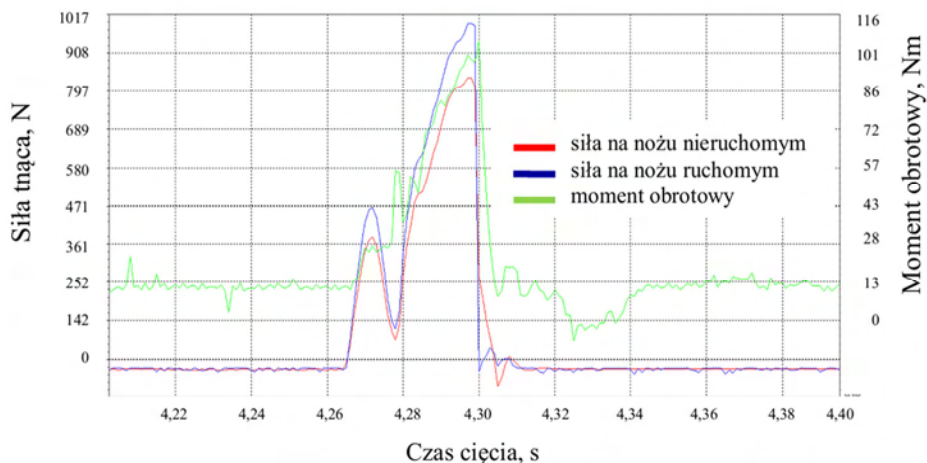
Stwierdzono ponadto intensywniejsze ugięcie na nożu stałym, wskazujące na odmienne zachowanie się PP w stosunku do wytłocznin z PVC [131]. Czas przecięcia próbki nie różnił się w tym przypadku od czasu uzyskanego dla ustawienia podstawowego noży i wyniósł od 80 ms dla litego PP do 50 ms dla struktury porowatej. Najważniejszą z zaobserwowanych zmianą jest bardzo istotne obniżenie wartości siły tnącej po zastosowaniu noża ruchomego o kącie ostrza  $\beta_r = 30^\circ$ , przy pozostawieniu kąta  $2\lambda$  na poziomie wartości  $6^\circ$ . Zmiany te wskazują, że ta konfiguracja noży tnących jest korzystnym ustawieniem z punktu widzenia procesu cięcia, co jest kolejnym potwierdzeniem przyjętej w pracy hipotezy badawczej. Analiza krzywych cięcia z rysunku 5.9 wskazuje ponadto, że pochylenie krawędzi nożowych w stosunku do osi obrotu wirnika o kąt  $2\lambda = 6^\circ$ , powoduje równomierny rozkład siły tnącej na obu współpracujących ze sobą nożach i podobne jej wartości maksymalne. Jest to korzystny przypadek cięcia polipropylenu porowatego pod względem eksploatacji młyna nożowego.



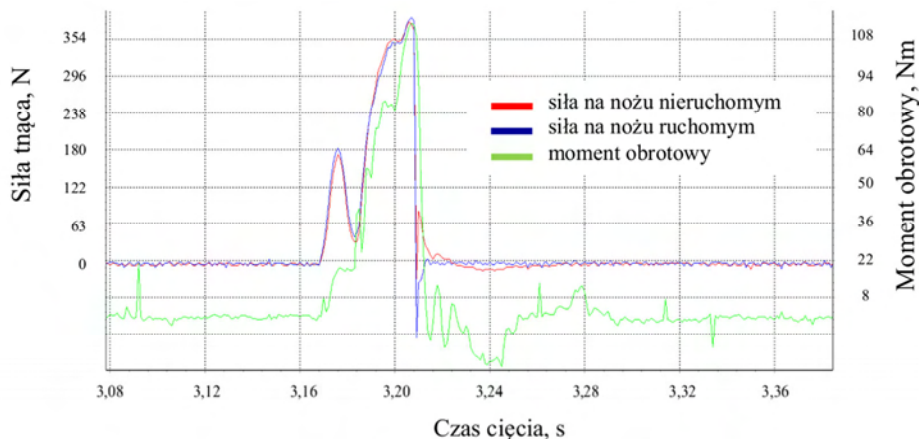
Tabela 5.3. Charakterystyka badań cięcia wytłocznyn z polipropylenu litego i porowatego, w zmiennych warunkach pochylenia krawędzi tnącej i przy zmiennej wartości kąta ostrza noża ruchomego

Warunki cięcia: szczelina międzynożowa 0,06 mm, prędkość obwodowa noży ruchomych $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąt ostrza noża nieruchomego $\beta_s = 60^\circ$ , kąt ostrza noża ruchomego $\beta_r = 60^\circ$ , kąt pochylenia $2\lambda = 13,5^\circ$				
Zawartość poroforów, % mas.	Siła na nożu nieruchomym, N	Siła na nożu ruchomym, N	Moment obrotowy, Nm	Czas przecięcia, s
0	1844,0±61,8	1202,7±86,1	210,1±13,0	0,08
1	1794,9±31,3	1633,4±27,1	199,2±1,7	0,07
2	1024,1±13,0	977,9±39,2	131,0±2,2	0,05
Warunki cięcia: szczelina międzynożowa 0,06 mm, prędkość obwodowa noży ruchomych $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąt ostrza noża nieruchomego $\beta_s = 60^\circ$ , kąt ostrza noża ruchomego $\beta_r = 30^\circ$ , kąt pochylenia $2\lambda = 13,5^\circ$				
0	1797,3±21,2	2260,9±35,9	171,2±8,3	0,06
1	1251,0±24,9	1498,7±33,7	122,4±3,9	0,05
2	841,1±21,0	1004,9±30,5	88,7±6,3	0,04
Warunki cięcia: szczelina międzynożowa 0,06 mm, prędkość obwodowa noży ruchomych $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąt ostrza noża nieruchomego $\beta_s = 60^\circ$ , kąt ostrza noża ruchomego $\beta_r = 30^\circ$ , kąt pochylenia $2\lambda = 6^\circ$				
0	431,8±15,6	408,8±22,4	152,8±9,2	0,06
1	420,6±21,3	399,5±21,5	155,1±3,7	0,07
2	390,3±19,1	398,5±27,3	112,0±5,6	0,04

a)  $2\lambda = 13,5^\circ$ ;  $\beta_r = 30^\circ$ ;  $\beta_s = 60^\circ$



b)  $2\lambda = 6^\circ; \beta_r = 30^\circ; \beta_s = 60^\circ$



Rys. 5.9. Porównanie przebiegów zmian siły i momentu obrotowego podczas cięcia wytłoczniny o zawartości 2% mas. poroforów: a) pochylenie krawędzi tnących noży  $2\lambda = 13,5^\circ$ ; b) pochylenie krawędzi tnących noży  $2\lambda = 6^\circ$ ; pozostałe parametry procesu: prędkość obwodowa noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąty ostrza  $\beta_r = 30^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , szczelina międzynożowa  $0,06 \text{ mm}$

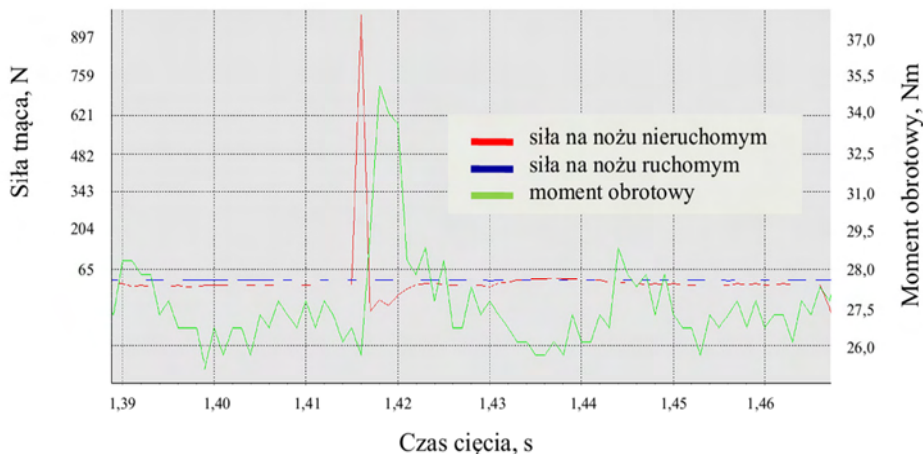
Podobnie jak poprzednio, wzrost prędkości obwodowej noży powoduje spadek znaczenia quasi-cięcia w podziale materiału, a także redukcję wartości maksymalnej siły i momentu obrotowego (tab. 5.4). Również i w tym przypadku można zauważyć duży rozrzut pojedynczych wyników od wartości średniej.

Tabela 5.4. Charakterystyka badań cięcia wytłoczniny z PP litego i porowatego, przeprowadzonych z prędkością obwodową noży tnących  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  oraz  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Prędkość obwodowa noży ruchomych $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pozostałe warunki realizacji badań: kąt ostrza noża nieruchomego $\beta_s = 60^\circ$ , kąt ostrza noża ruchomego $\beta_r = 60^\circ$ , kąt pochylenia $2\lambda = 6^\circ$ , szczelina międzynożowa $0,06 \text{ mm}$			
Zawartość poroforów, % mas.	Siła na nożu nieruchomym, N	Moment obrotowy, Nm	Czas przecięcia, s
0	$940,5 \pm 110,0$	$10,1 \pm 0,7$	0,002
1	$463,5 \pm 78,4$	$8,2 \pm 0,7$	0,002
2	$520,7 \pm 97,8$	$8,4 \pm 0,5$	0,002
Prędkość obwodowa noży ruchomych $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pozostałe warunki realizacji badań: kąt ostrza noża nieruchomego $\beta_s = 60^\circ$ , kąt ostrza noża ruchomego $\beta_r = 60^\circ$ , kąt pochylenia $2\lambda = 6^\circ$ , szczelina międzynożowa $0,06 \text{ mm}$			
Zawartość poroforów, % mas.	Siła na nożu nieruchomym, N	Moment obrotowy, Nm	Czas przecięcia, s
0	$731,2 \pm 258,5$	$8,6 \pm 0,8$	0,002
1	$678,0 \pm 115,1$	$6,6 \pm 0,4$	0,002
2	$620,7 \pm 93,5$	$6,2 \pm 0,2$	0,002

Na tej podstawie można zatem uznać, że korzystnym rozwiązaniem jest stosowanie dużych prędkości obwodowych noży. Jednak należy pamiętać, że intensywnemu cięciu towarzyszy wzrost udziału frakcji pylistych i elektryzowanie się recyklatu. Jest to

zjawisko niekorzystne z uwagi na ponowne wykorzystanie tego materiału we wtórnym przetwórstwie. Zwiększenie prędkości kątowej wirnika powoduje także większe tarcie ziaren wsadu wzajemnie o siebie, jak i o metalowe elementy komory roboczej, co powoduje w konsekwencji wzrost temperatury podczas realizacji procesu.



Rys. 5.10. Przebiegi zmian siły i momentu obrotowego zarejestrowane podczas cięcia z prędkością obwodową noży  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  wytłoczyny PP z udziałem 2% poroforów

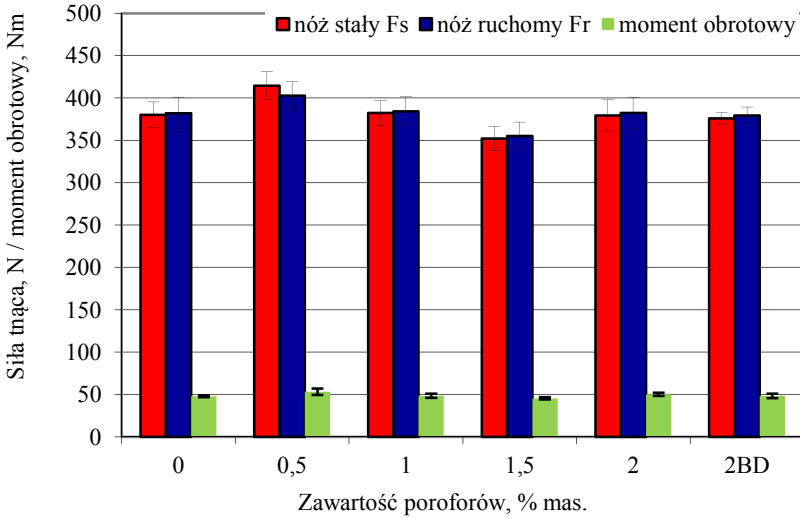
Z uwagi na dość niskie wartości temperatury mięknięcia dla PE czy PP, a zwłaszcza dla PVC, dobór prędkości cięcia materiału musi być kompromisem pomiędzy efektywnością jego rozdzielania a jakością otrzymanego recyklatu.

### 5.2.2. Cięcie próbek porowatego polietylenu małej gęstości

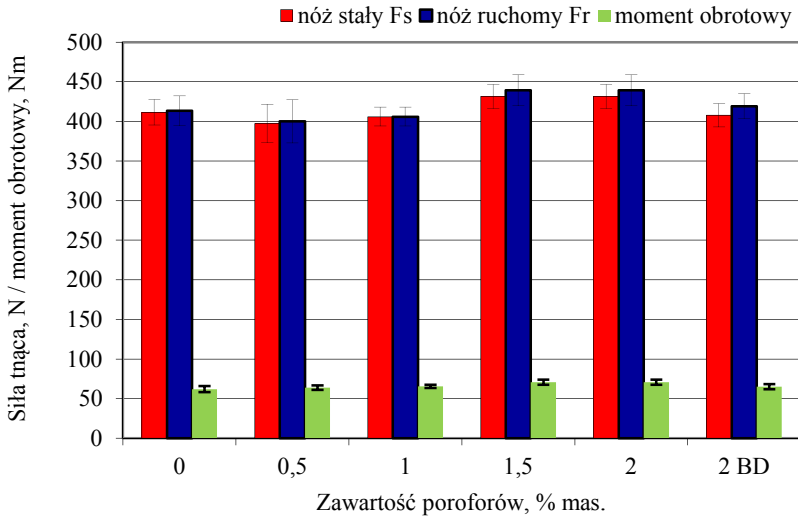
#### Próbki wtryskowe

Analiza poziomu wartości sił tnących oraz momentu siły wskazuje, że modyfikacja struktury polietylenu małej gęstości poroforami o endotermicznym rozkładzie nie wpływa istotnie na zmiany jego zachowania się podczas cięcia nożowego bez względu na wartość prędkości obwodowej w badanym zakresie (rys. 5.11). Traktując prędkość obwodową noży ruchomych, wynoszącą  $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  jako bazową do dalszych analiz, można zauważyć, że uzyskano dużą powtarzalność poszczególnych prób, a maksymalne wartości siły tnącej kształtują się na poziomie około 400 N. We wszystkich przypadkach cięcia stwierdzono występowanie charakterystycznych przebiegów zmian wartości siły tnącej na nożu ruchomym i nieruchomym z podwójnym maksimum wartości. W trakcie cięcia z prędkością obwodową wynoszącą  $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , po około 0,01 sekundy od zetknięcia się krawędzi tnących noży z materiałem obserwuje się wystąpienie lokalnego maksimum wartości siły, która wynosi około 75% największej wartości siły tnącej.

a)



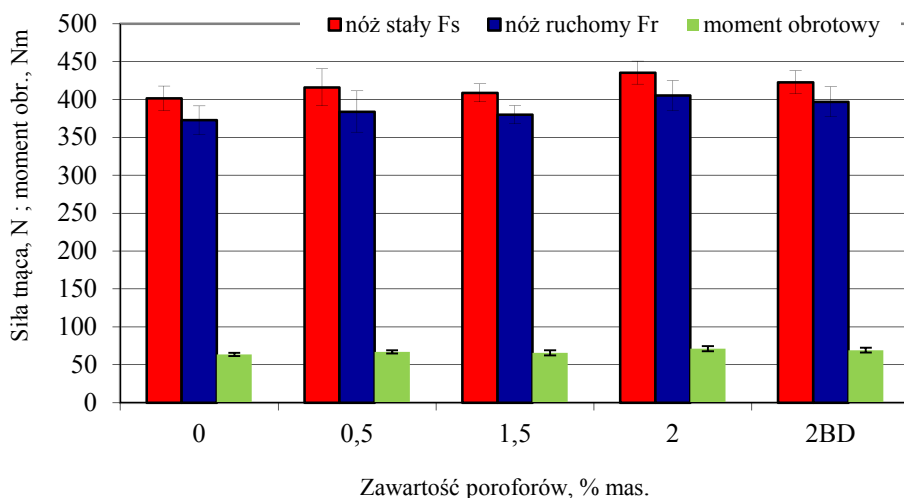
b)



Rys. 5.11. Zmiany siły tnącej na nożu stałym i ruchomym podczas cięcia próbek z PELD: a) z prędkością obwodową noży  $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , b) z prędkością obwodową noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; pozostałe parametry przy których realizowano cięcie: kąty ostrza  $\beta_r = 30^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , szczelina międzynóżowa  $0,06 \text{ mm}$ , pochYLENIE krawędzi tnących noży  $2\lambda = 6^\circ$

Dla cięcia realizowanego z prędkością  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  całkowity czas przecięcia próbek o grubości  $g = 4 \text{ mm}$  wynosił około  $0,03$  sekundy. Moment obrotowy kształtuje się na poziomie od  $60$  do  $70 \text{ Nm}$ , przy czym wyższe wartości dotyczą cięcia próbek z większym udziałem poroforów ( $62,1 \pm 4,0 \text{ Nm}$  dla litego PE LD oraz  $65,1 \pm 3,3 \text{ Nm}$  dla PELD z udziałem 2% poroforu). Badania zrealizowano przy większej wartości szczeliny międzynóżowej.

dzynozowej 0,5 mm, uzyskując podobne rezultaty, z tą różnicą, że maksymalna siła na nożu ruchomym była mniejsza niż na nieruchomym o około 30 N.



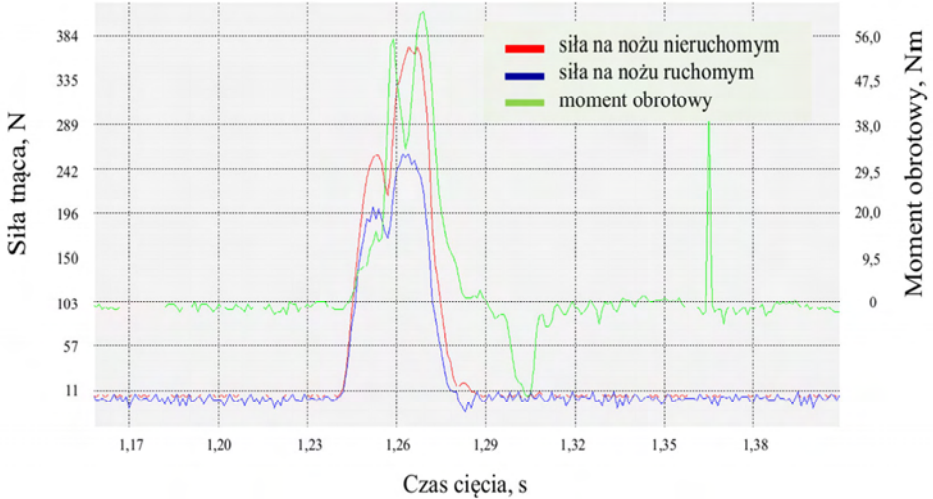
Rys. 5.12. Zmiany wartości maksymalnej siły tnącej na nożu stałym i ruchomym podczas cięcia próbek w szczelinie międzyżyzowej 0,5 mm i z prędkością obwodową  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Zmiana kąta pochylenia krawędzi tnących noży do wartości  $2\lambda = 13,5^\circ$  spowodowała istotnego obniżenie wartości siły tnącej i momentu obrotowego od siły cięcia (tab. 5.5). Różnice te są znaczące, zwłaszcza jeśli chodzi o wartość siły tnącej na nożu ruchomym (redukcja wartości prawie o połowę w stosunku do ustawienia bazowego  $2\lambda = 6^\circ$ ). Ważne, że zmiany te zostały zarejestrowane dla wszystkich próbek z wtryskowego PELD, przy czym największe wartości siły dotyczą przecinania polietylenu o największej zawartości poroforów. Próbkę te uzyskano w procesie wtryskiwania bez realizacji fazy docisku, zatem można stwierdzić, że są to próbki o największej intensywności wporowania poroforów. Przcinięcie polietylenu o strukturze porowatej wymaga większej energii. Moment obrotowy zmienia się od 55 do 60 Nm, a czas cięcia wynosi od 0,04 do 0,05 s.

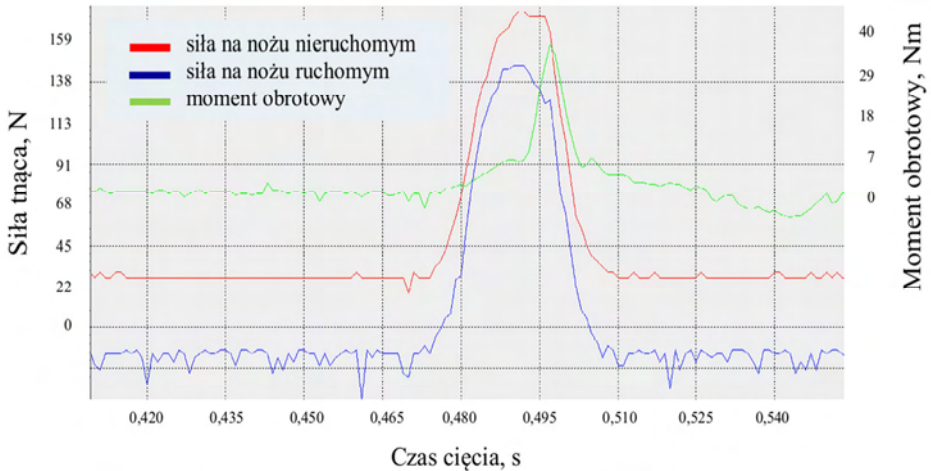
Zastosowanie noża ruchomego o kącie ostrza  $\beta_r = 30^\circ$  przy zachowaniu maksymalnego w zakresie zmienności kąta  $2\lambda = 13,5^\circ$ , spowodowało największe obniżenie wartości siły na nożu stałym i zwiększoną intensywność oddziaływania na materiał noża ruchomego (rys. 5.13, tab. 5.5). Zmniejszenie kąta ostrza spowodowało także obniżenie maksymalnego momentu obrotowego, a w zarejestrowanych przebiegach nie odnotowano charakterystycznego, podwójnego maksimum siły tnącej. Oznacza to, że nóż ruchomy w sposób ciągły zagłębiał się w materiale, bez wstępnej fazy deformowania przekroju. Zmiany te wskazują, że ta konfiguracja noży tnących jest korzystnym ustawieniem z punktu widzenia zużycia energii na pojedyncze przecięcie. Stwierdzono, że również w przypadku cięcia wyprasek z polietylenu porowatego w zbiorze analizowanych zmiennych występują korzystne kąty noży tnących, które w korelacji z nastawami procesowymi pozwalają na podział materiału z najmniejszym zużyciem energii. Analiza krzywych przecięcia porowatego PELD wskazuje ponadto na zbliżone wartości

siły na nożach tnących, przy zastosowaniu kąta ostrza noża ruchomego  $\beta_r = 30^\circ$  (rys. 5.13).

a)  $2\lambda = 13,5^\circ$ ;  $\beta_r = 60^\circ$ ;  $\beta_s = 60^\circ$



b)  $2\lambda = 13,5^\circ$ ;  $\beta_r = 30^\circ$ ;  $\beta_s = 60^\circ$

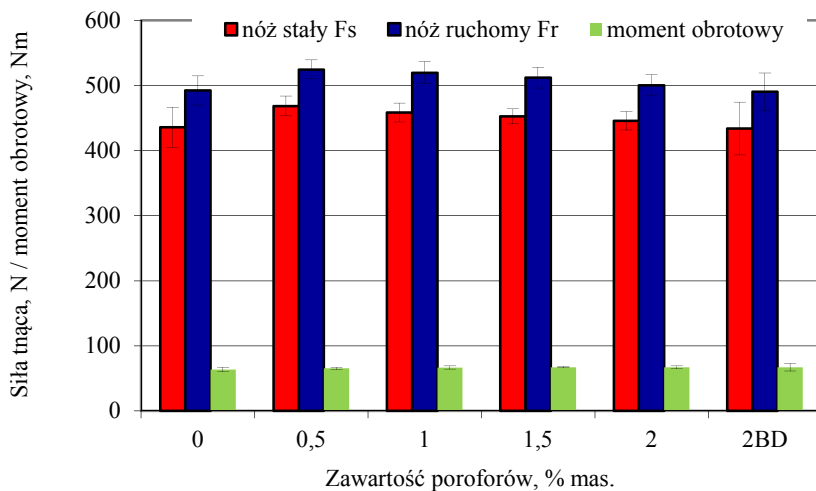


Rys.5.13. Porównanie przebiegów zmian siły i momentu obrotowego podczas cięcia próbek z PELD o zawartości poroforów 2% mas. przy pochyleniu krawędzi tnących noży  $2\lambda = 13,5^\circ$  i kątach ostrza: a)  $\beta_r = 60^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ ; b)  $\beta_r = 30^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ ; pozostałe parametry procesu: prędkość obwodowa  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , szczelina międzynożowa  $0,06 \text{ mm}$

Tabela 5.5. Wyniki badań cięcia wyprasek z PELD w zmiennych warunkach pochylenia krawędzi tnącej i przy zmiennej wartości kąta ostrza noża ruchomego

Warunki cięcia: szczelina międzynożowa 0,06 mm, prędkość obwodowa noży $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąty ostrzy noży: $\beta_s = 60^\circ$ , $\beta_r = 60^\circ$ , kąt pochylenia krawędzi $2\lambda = 13,5^\circ$				
Zawartość poroforów, %	Siła na nożu nieruchomym, N	Siła na nożu ruchomym, N	Moment obrotowy, Nm	Czas przecięcia, s
0	299,0±18,1	217,9±11,7	55,8±3,0	0,04
0,5	299,0±14,7	201,8±14,6	56,7±3,7	0,04
1	275,6±21,5	187,5±15,8	56,2±2,1	0,05
1,5	264,7±25,8	178,4±27,1	55,6±2,6	0,04
2	334,8±36,9	230,5±26,0	58,6±3,6	0,04
2 BD	363,8±15,8	247,2±11,7	60,7±2,0	0,05
Warunki cięcia: szczelina międzynożowa 0,06 mm, prędkość obwodowa noży $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąt ostrzy noży: $\beta_s = 60^\circ$ oraz $\beta_r = 30^\circ$ , kąt pochylenia krawędzi $2\lambda = 13,5^\circ$				
0	224,4±18,2	250,8±22,8	50,0±2,1	0,035
0,5	218,1±11,3	246,4±16,4	48,5±2,7	0,036
1	212,5±14,7	240,5±16,8	47,5±2,5	0,036
1,5	210,4±7,5	236,3±9,5	46,9±2,5	0,036
2	228,7±16,4	262,1±11,0	52,6±6,7	0,036
2 BD	228,7±11,3	263,0±15,1	51,4±2,4	0,036

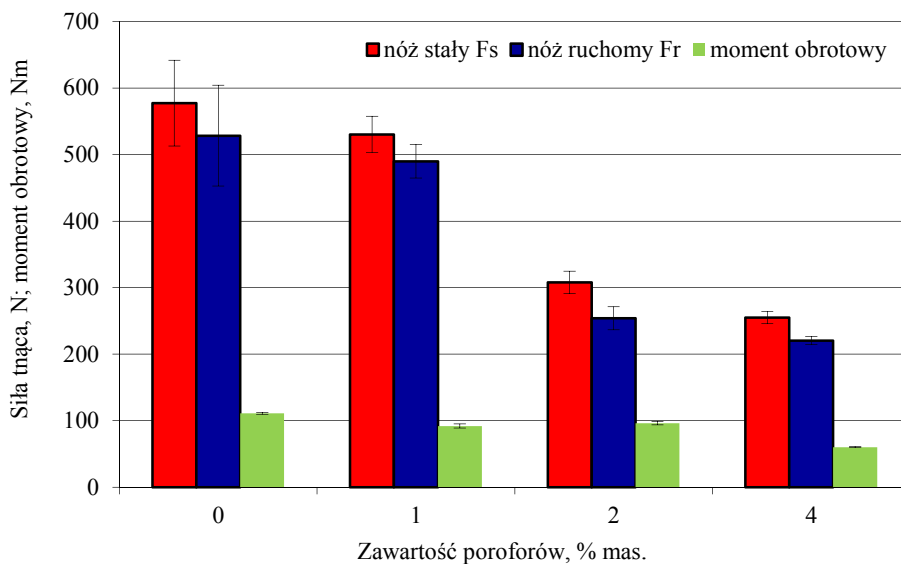
Największe wartości maksymalnej siły uzyskano po zastosowaniu noża ruchomego o kącie ostrza  $\beta_r = 45^\circ$ , co z uwagi na energię potrzebną do przecięcia materiału jest najbardziej niekorzystnym przypadkiem analizowanym w badaniach (rys. 5.14).



Rys. 5.14. Wpływ zawartości poroforów na wartość maksymalnej siły tnącej podczas cięcia PELD nożami ruchomymi o kącie  $\beta_r = 45^\circ$ ; parametry procesu: prędkość obwodowa noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąt ostrza  $\beta_s = 60^\circ$ , szczelina 0,06 mm, kąt pochylenia krawędzi tnących  $2\lambda = 13,5^\circ$

## Cięcie wytłocznin z PELD

Cięcie wytłocznin z PELD w szczelinie między nożami  $s = 0,06$  mm, przy zastosowaniu noży tnących o kątach ostrza  $\beta_r = 60^\circ$ ;  $\beta_s = 60^\circ$ , pochylonych względem siebie o kąt  $2\lambda = 6^\circ$  wskazuje na istotny wpływ struktury materiału na poziom wartości siły i momentu obrotowego (rys. 5.15). Podobnie jak w poprzednich przypadkach zauważa się spadek wartości siły tnącej wraz ze wzrostem ilości poroforów dozowanych podczas wytłaczania. Stwierdzono również wyższe wartości siły na nożu nieruchomym niż na ruchomym.

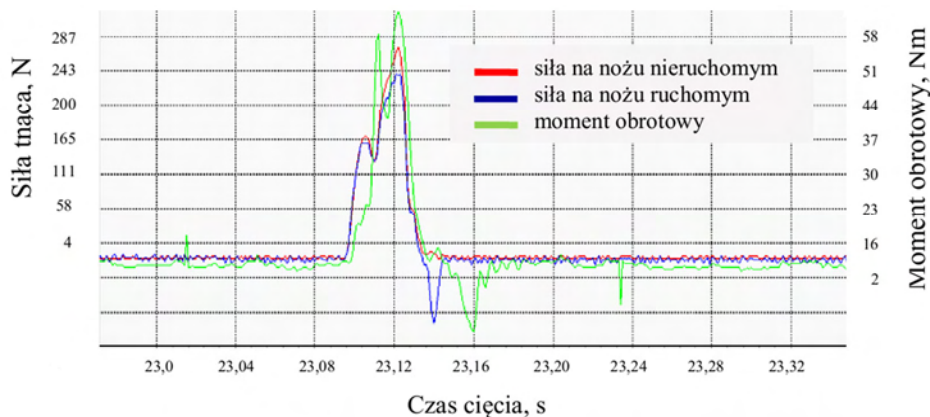


Rys. 5.15. Zmiany siły tnącej na nożu stałym i ruchomym podczas cięcia próbek z PELD z prędkością obwodową noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; pozostałe parametry: kąty ostrza  $\beta_r = 60^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , szczelina międzyżoźowa  $0,06$  mm, pochYLENIE krawędzi tnących noży  $2\lambda = 6^\circ$

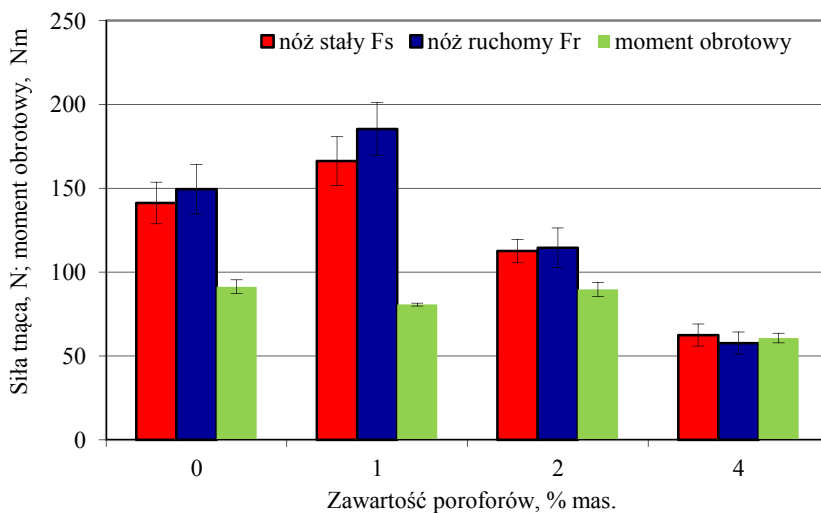
Zaobserwowano, że seria przecięć zarejestrowana w tych warunkach i przy zastosowaniu automatycznego podajnika daje bardzo dużą powtarzalność poziomu wartości zmian siły i momentu, zwłaszcza dla próbek porowatych. Czas przecięcia dla wszystkich rodzajów materiałów był podobny i wynosił  $0,05\text{-}0,06$  s. Przebieg zmian siły i momentu obrotowego podczas przecinania jest bardzo zbliżony do wcześniej rejestrowanych (rys. 5.16). Najistotniejsze i najbardziej korzystne wyniki uzyskano poprzez zmianę kąta ostrza noża ruchomego z  $60$  do  $30^\circ$ . Zanotowano kilkakrotny spadek wartości siły tnącej w stosunku do poprzedniego przypadku (rys. 5.17). Dla próbek z polietylenu litego i porowatego o najmniejszej zawartości poroforów większe wartości siły rejestrowano na nożu ruchomym. Wydaje się, że jest to wynikiem intensywniejszego wprowadzania krawędzi tnącej noża ruchomego w materiał. Mały kąt ostrza noża ruchomego sprzyja temu zjawisku, tym bardziej, że PELD jest materiałem o małej sztywności. Czas cięcia uległ dla wszystkich prób skróceniu do wartości  $0,04\pm 0,045$  s (rys. 5.18). Analiza procesu przecinania wytłoczyny porowatej PELD (rys. 5.16 i 5.18)



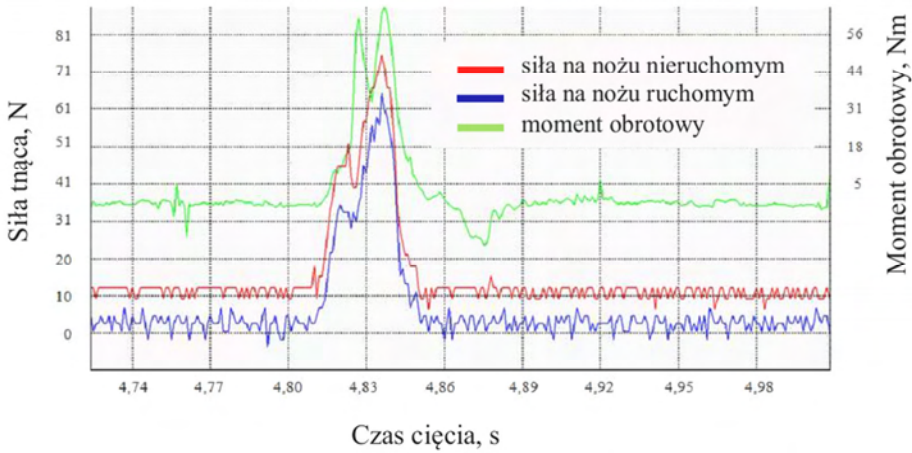
wskazuje na podobny charakter przebiegów zmian siły i momentu obrotowego pomimo zmiany kąta ostrza noża ruchomego.



Rys. 5.16. Przebieg zmian siły i momentu obrotowego podczas cięcia próbek z wycłoczyny z PELD o zawartości 4% mas. poroforów; parametry procesu cięcia: prędkość obwodowa noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąty ostrza  $\beta_r = 60^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , kąt pochylenia krawędzi tnących  $2\lambda = 6^\circ$ , szczelina międzynożowa  $0,06 \text{ mm}$

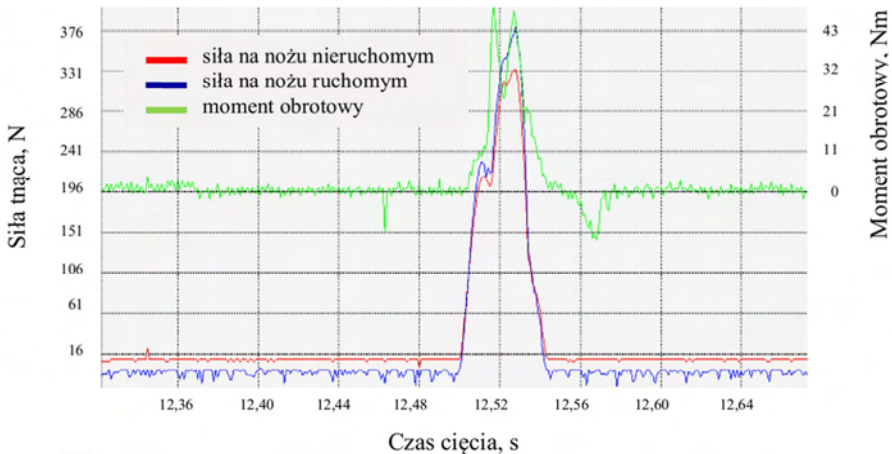


Rys. 5.17. Zmiany siły tnącej podczas cięcia próbek z PELD z użyciem noża ruchomego o kącie ostrza  $\beta_r = 30^\circ$ ; pozostałe parametry cięcia: prędkość obwodowa noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąty ostrza  $\beta_s = 60^\circ$ , kąt pochylenia krawędzi tnących  $2\lambda = 6^\circ$ , szczelina międzynożowa  $0,06 \text{ mm}$



Rys. 5.18. Przebiegi zmian siły i momentu obrotowego zarejestrowane podczas cięcia porowatej wtyłoczniny z PELD z prędkością obwodową noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  z udziałem 2% poroforów przy zastosowaniu noża ruchomego o kącie ostrza  $\beta_r = 30^\circ$ ; pozostałe parametry cięcia: kąt ostrza  $\beta_s = 60^\circ$ , szczelina międzynozowa  $0,06 \text{ mm}$ , pochylenie krawędzi tnących noży  $2\lambda = 6^\circ$

Wzrost kąta pochylenia krawędzi tnących do wartości  $2\lambda = 13,5^\circ$  nie spowodował istotnego obniżenia wartości siły tnącej i momentu obrotowego podczas cięcia (tab. 5.6 i rys. 5.19). Wartości siły tnącej na nożu ruchomym są wyższe przy cięciu ostrzami o kącie  $\beta_r = 30^\circ$ , przy czym im więcej środka porotwórczego, tym różnice są mniejsze.



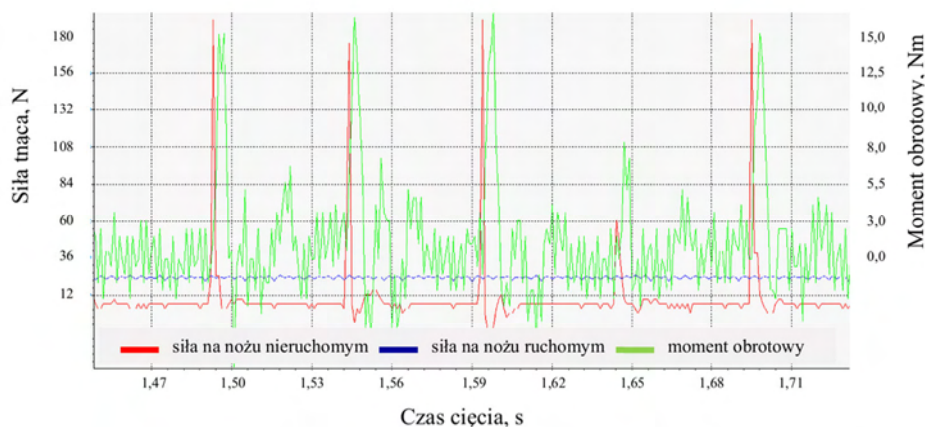
Rys. 5.19. Przykładowy przebieg zmian siły i momentu obrotowego podczas cięcia wtyłoczniny z PELD o zawartości 4% poroforu; parametry procesu: prędkość obwodowa noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąty ostrza  $\beta_r = 30^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , kąt pochylenia krawędzi tnących  $2\lambda = 13,5^\circ$ , szczelina międzynozowa  $0,06 \text{ mm}$

Tabela 5.6. Charakterystyka cięcia wytłoczyn z PELD, przy zmiennej wartości kąta ostrza noża ruchomego

Warunki cięcia: szczelina międzynożowa 0,06 mm, prędkość obwodowa noży ruchomych $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąty ostrzy noży: $\beta_s = 60^\circ$ oraz $\beta_r = 60^\circ$ , kąt pochylenia krawędzi $2\lambda = 13,5^\circ$				
Zawartość poroforów, % mas.	Siła na nożu nieruchomym, N	Siła na nożu ruchomym, N	Moment obrotowy, Nm	Czas przecięcia, s
0	663,0±15,2	528,5±75,9	111,1±1,3	0,06
1	647,4±8,3	490,8±21,9	86,0±2,5	0,057
2	662,3±101,7	425,9±127,2	112,5±11,0	0,057
4	434±4,3	329,5±7,1	62,5±1,8	0,06
Warunki cięcia: szczelina międzynożowa 0,06 mm, prędkość obwodowa noży ruchomych $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąty ostrzy noży: $\beta_s = 60^\circ$ oraz $\beta_r = 30^\circ$ , kąt pochylenia krawędzi $2\lambda = 13,5^\circ$				
0	617,4±17,9	762,8±23,6	64,9±3,6	0,049
1	512,8±21,8	594,8±24,2	62,0±3,0	0,04
2	544,6±22,9	657,5±28,1	66,4±1,6	0,04
4	298,6±7,0	350,4±9,9	44,4±2,5	0,041

Zmniejszenie kąta ostrza wpłynęło także na obniżenie maksymalnego momentu obrotowego, ale tylko dla materiału o największym udziale poroforów. Zarejestrowano przebiegi swoim charakterem przypominają przypadek cięcia wytłoczyny z PELD zrealizowany przy mniejszym kącie pochylenia krawędzi tnącej i kącie ostrza  $\beta_s = 30^\circ$ .

Wzrost prędkości obwodowej noży do wartości  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  spowodował zmianę w przebiegu krzywych siły cięcia i momentu obrotowego, jednocześnie można stwierdzić, że zastosowanie automatycznego systemu podawania materiału, przyczyniło się do dużej powtarzalności zarejestrowanych wykresów (rys. 5.20). Zmiany te polegają na bardzo szybkim narastaniu siły tnącej i przecięciu, trwającym od 0,04 dla litego polietylenu do 0,029 sekundy dla wytłoczyny PELD o zawartości poroforów 4% mas.



Rys. 5.20. Zmiany siły i momentu obrotowego podczas cięcia z prędkością obwodową noży  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  w PELD zawierającego 2% mas. poroforów; pozostałe parametry: kąty ostrzy  $\beta_r = 60^\circ$  i  $\beta_s = 60^\circ$ , kąt pochylenia  $2\lambda = 6^\circ$ , szczelina 0,06 mm

W przypadku cięcia PELD, wartości maksymalnej siły tnącej z zastosowaniem dużymi prędkościami są wyższe niż dla najkorzystniejszego wariantu cięcia, realizowanego z prędkością  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (tab. 5.7).

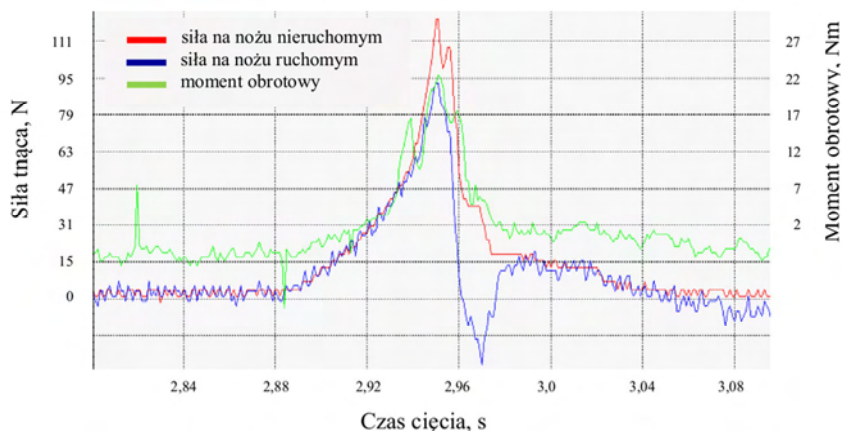
Tabela 5.7. Charakterystyka cięcia próbek wytłaczanych z polietylenu litego i porowatego z prędkościami obwodowymi noży  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  i  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Warunki cięcia: prędkość obwodowa noży ruchomych $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąt ostrza noża nieruchomego $\beta_s = 60^\circ$ , kąt ostrza noża ruchomego $\beta_r = 60^\circ$ , kąt pochylenia $2\lambda = 6^\circ$			
Zawartość poroforów, % mas.	Siła na nożu nieruchomym, N	Moment obrotowy, Nm	Czas przecięcia, s
0	$292,3 \pm 39,2$	$21,4 \pm 2,6$	0,0043
1	$168,1 \pm 17,7$	$15,7 \pm 0,7$	0,0039
2	$166,2 \pm 11,5$	$13,7 \pm 0,9$	0,0030
4	$105,6 \pm 10,8$	$9,5 \pm 0,2$	0,0027
Warunki cięcia: prędkość obwodowa noży ruchomych $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąt ostrza noża nieruchomego $\beta_s = 60^\circ$ , kąt ostrza noża ruchomego $\beta_r = 60^\circ$ , kąt pochylenia $2\lambda = 6^\circ$			
0	$371,1 \pm 77,1$	$13,1 \pm 1,2$	0,0044
1	$294,6 \pm 16,9$	$10,5 \pm 0,8$	0,0049
2	$264,6 \pm 29,5$	$8,3 \pm 0,4$	0,0049
4	$238,2 \pm 25,9$	$7,8 \pm 1,0$	0,0036

Dotyczy to zwłaszcza cięcia polietylenu porowatego o największym udziale poroforów. Zatem również w przypadku polietylenu dobór korzystnych nastaw procesowych jest zależny od stopnia porowatości wytworów.

### 5.2.3. Cięcie polietylenu modyfikowanego przez porowanie fizyczne

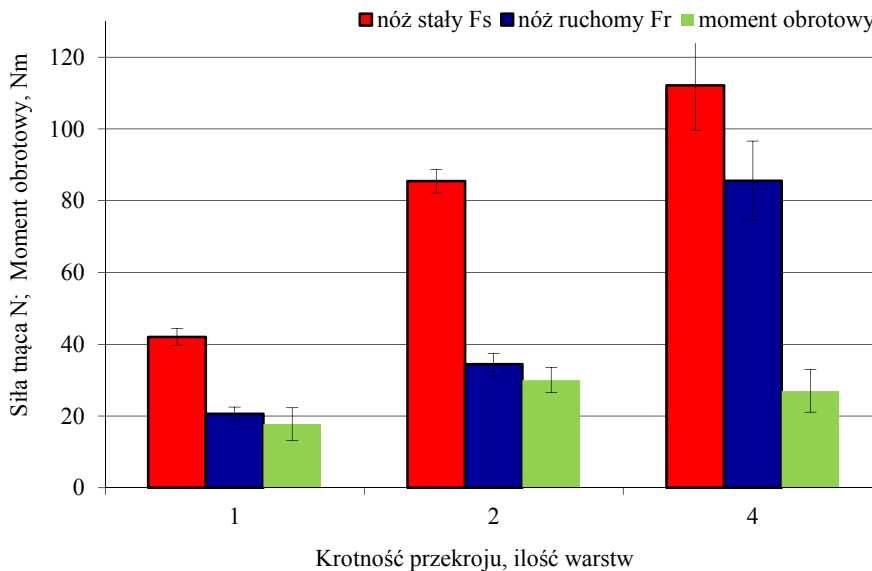
Cięcie polietylenu porowanego gazem obojętnym (xPE) przebiega inaczej niż w przypadku polietylenu modyfikowanego poroforami chemicznymi (rys. 5.21).



Rys. 5.21. Przebieg cięcia polietylenu porowanego fizycznie dla próbki o przekroju  $52 \times 16 \text{ mm}$

Zauważa się obniżenie wartości siły na nożu ruchomym w stosunku do noża stałego. Nie obserwuje się ponadto występowania dla tych materiałów lokalnego, dodatko-

wego maksimum w początkowej fazie przecinania materiału. We wszystkich przypadkach zauważa się tendencję do proporcjonalnego przyrostu siły cięcia w stosunku do wzrostu powierzchni przecinanego przekroju zarówno na nożu ruchomym, jak i nieruchomym, przy czym intensywniej pracuje podczas przecinania nóż stały (rys. 5.22).

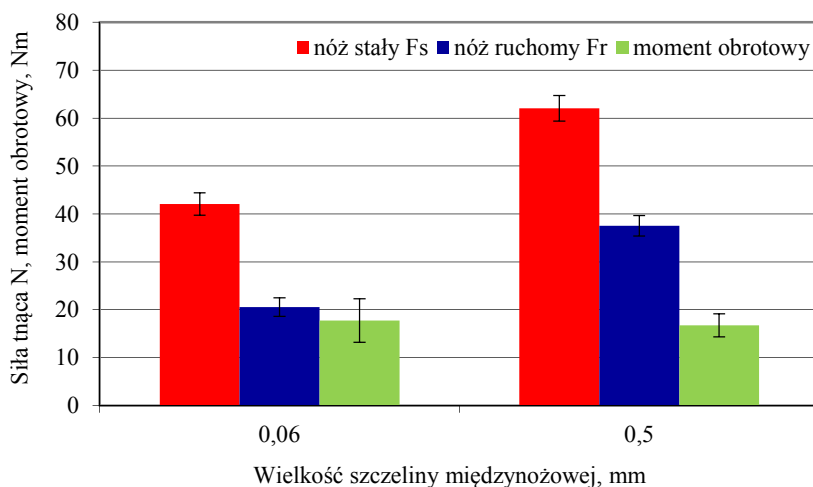


Rys. 5.22. Przykładowe wyniki cięcia xPE w zależności od wielkości przekroju, przy czym powierzchnia przekroju pojedynczej warstwy wynosi 52 x 4 mm; parametry cięcia: szczelina międzynożowa 0,06 mm, kąt pochylenia krawędzi tnących  $2\lambda = 6^\circ$ , prędkość obwodowa noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąty noży  $\beta_r$  i  $\beta_s = 60^\circ$

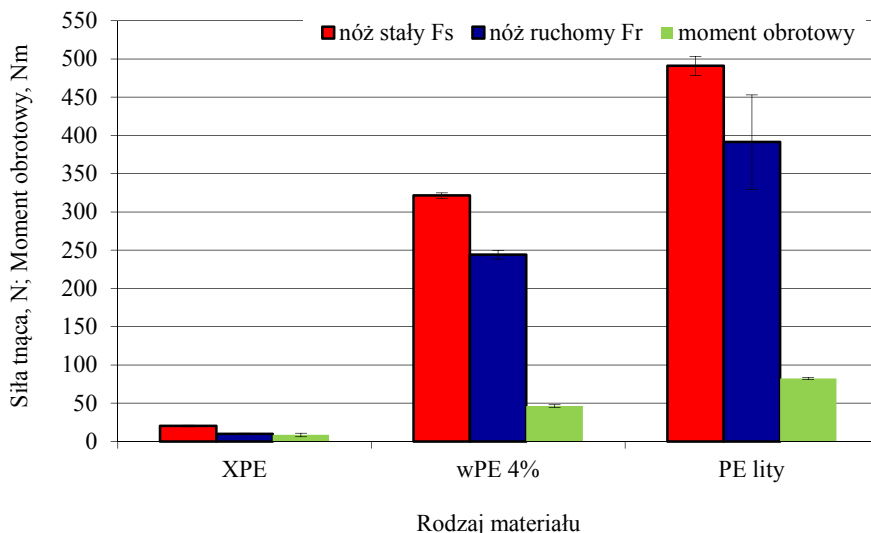
Stwierdzono, że w przypadku lekkich struktur porowatych stosowanie dużych prędkości do cięcia nie jest wskazane, choćby ze względu na poziom wartości siły tnącej, ale także ze względu na dłuższy czas cyrkulowania tego materiału w komorze roboczej, z uwagi na trudności z jego usuwaniem z komory roboczej pod wpływem siły odśrodkowej w trakcie rozdrabniania (tab. 5.8). Analiza wyników pozwala także zauważyć, że zastosowanie noża ruchomego o kącie ostrza  $\beta_r = 30^\circ$  podnosi efektywność cięcia. Wydaje się, że jest to wynikiem łatwiejszej inicjacji cięcia materiału przez nóż ruchomy, który z większą łatwością niż noże o większym kącie ostrza potrafi zagłębić się w porowatym, lekkim materiale. Zwiększenie szczeliny międzynożowej, zwłaszcza przy cięciu warstw xPE o najmniejszym z analizowanych przekrojów, istotnie obniża efekt quasi-przecięcia. Wydaje się, że oddziaływanie na lekki materiał krawędziami tnącymi oddalonymi od siebie na większą odległość powoduje zginanie i rozrywanie materiału. Efektem jest wzrost wypadkowej siły cięcia zarejestrowanej zarówno na nożu ruchomym, jak i nieruchomym (rys. 5.23).

Tabela 5.8. Wpływ stopnia porowatości materiału na wartość siły i momentu obrotowego podczas jego przecinania przy zachowaniu stałego przekroju cięcia

Wielkości pomiarowe	Warunki prowadzenia prób cięcia (szczelina międzynożowa 0,06 mm)				
	$V = 0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $2\lambda = 6^\circ$ ; $\beta_r \text{ i } \beta_s = 60^\circ$	$V = 0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $2\lambda = 6^\circ$ ; $\beta_r = 30^\circ \beta_s = 60^\circ$	$V = 0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $2\lambda = 13,5^\circ$ ; $\beta_r \text{ i } \beta_s = 60^\circ$	$V = 0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $2\lambda = 13,5^\circ$ ; $\beta_r = 30^\circ \beta_s = 60^\circ$	$V = 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; $2\lambda = 6^\circ$ ; $\beta_r \text{ i } \beta_s = 60^\circ$
xPE jedna warstwa o przekroju 52 x 4 mm					
Siła – nóż stały, N	42,1±2,3	24,0±3,1	39,5±3,1	48,5±5,1	58,6±2,2
Siła – nóż ruchomy, N	20,6±1,9	18,9±1,3	15,0±1,3	33,7±2,9	bez pomiaru
Moment obr., Nm	17,8±4,5	8,5±1,2	17,3±3,2	17,2±2,6	5,7±0,4
xPE warstwa o przekroju 52 x 8 mm					
Siła – nóż stały, N	85,4±3,2	63,8±3,1	55,5±3,7	72,6±2,5	92,5±5,0
Siła – nóż ruchomy, N	34,4±3,1	43,5±2,7	22,7±2,3	60,3±1,5	bez pomiaru
Moment obr., Nm	30,0±3,5	22,9±1,6	19,6±2,1	18,0±1,4	9,9±0,8
xPE warstwa o przekroju 52 x 16 mm					
Siła – nóż stały, N	112,2±12,5	110,6±1,6	129,0±2,5	101,6±4,7	151,0±8,6
Siła – nóż ruchomy, N	85,5±11,1	63,8±2,0	54,0±2,2	72,4±8,8	bez pomiaru
Moment obr., Nm	27,0±5,9	30,2±4,3	32,2±1,2	19,8±1,4	8,3±0,9

Rys. 5.23. Wpływ szczeliny międzynożowej na poziom siły i momentu obrotowego podczas cięcia xPE z następującymi nastawami: kąt pochylenia  $2\lambda = 6^\circ$ , prędkość obwodowa noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kąty noży  $\beta_r \text{ i } \beta_s = 60^\circ$

Dokonano także zbiorczego porównania wyników cięcia próbek z polietylenu o różnej zawartości porów gazowych (rys. 5.24). Porównanie to wykonano przez odniesienie wyników prób do jednakowego przekroju próbki o wartości  $100 \text{ mm}^2$ . Analiza danych zawartych na rysunku 5.24 wskazuje, że istnieje korelacja liniowa między wartością siły tnącej a stopniem porowatości struktury. Dotyczy to zarówno zmian wartości siły na nożu stałym jak i na ruchomym.



Rys. 5.24. Wpływ stopnia porowatości na wartość siły i momentu obrotowego podczas przecinania materiału pomiędzy nożami tnącymi przy zachowaniu stałego przekroju cięcia

Przecięcie polietylenu porowanego metodą fizyczną (xPE) odbywa się z bardzo małą wartością siły i momentu obrotowego, w porównaniu z litym PELD, a także w stosunku do wytłoczyny porowatej o zawartości poroforów 4% mas. Można zatem uznać, że ośrodek gazowy w strukturze materiału ułatwia jego podział na mniejsze elementy i może odbywać się przy mniejszych nakładach energetycznych.

## 6. BADANIA PODATNOŚCI NA ROZDRABNIANIE POLIOLEFIN POROWATYCH

### 6.1. WARUNKI REALIZACJI PRÓB ROZDRABNIANIA

Badania procesu rozdrabniania realizowano na podstawie programu badań, którego konstrukcja została oparta na zasadzie programu dynamicznego optymalizacyjnego sekwencyjnego PD/OS. Zmiennym czynnikiem była prędkość obwodowa noży ruchomych  $V$  – poziomy wartości 0,3; 3 oraz 6 m·s<sup>-1</sup>. Sita dobrano na podstawie kryterium zapewnienia takiego stopnia uziarnienia recyklatów, aby można było je ponownie wykorzystać bez dodatkowej operacji regranulowania we wtórnym procesie przetwórczym. Kierowano się ponadto zasadą, że każda redukcja średniego wymiaru ziaren recyklatów wiąże się z dodatkowymi nakładami energii na proces rozdrabniania. Z tych powodów zastosowanie w badaniach sit o średnicy otworów  $\varnothing$  9 mm było wyborem dokonany na podstawie oceny wyników badania wstępnego [129, 135, 140, 142, 145].

Stałe czynniki badań stanowiły:

1. Kąt pochylenia krawędzi tnących ostrzy noży stałych i ruchomych  $2\lambda$ , którego wartość przyjęto na poziomie 6°.
2. Kąty ostrza noży tnących – próby przeprowadzono przy użyciu noży o kątach:  $\beta_s = 60^\circ$  i  $\beta_r = 60^\circ$ .
3. Liczba noży stałych i ruchomych – w młynie zastosowano układ tnący z czterema nożami ruchomymi i sześcioma nożami stałymi.
4. Szczelina międzynożowa – 0,1 mm.
5. Stan noży – wszystkie sekwencje programu badań rozdrabniania realizowano przy zużyciu ostrzy odpowiadającym stanowi po naostrzeniu. Promień zaokrąglenia krawędzi tnącej noża wynosił 6,1±1,5 mm.
6. Materiał noży – stal narzędziowa 1.2063 do pracy na zimno.
7. Wymiary wirnika – średnica 200 mm, długość 160 mm.
8. Odległość krawędzi tnącej noży ruchomych od wewnętrznej powierzchni sit – odległość tę ustalono na około 0,1 mm.
9. Grubość sit –  $g = 3$  mm, średnica otworów sitowych  $\varnothing$  9 mm.
10. Sposób zasilania komory – na podstawie badań wstępnych starano się zapewnić taki sposób dozowania materiału, aby w jak największym stopniu symulować pracę ciągłą młyna. Nadawę dozowano do przestrzeni roboczej młynka w sposób jednostajny z natężeniem około 75±5 g·s<sup>-1</sup>.

Wynikowe czynniki badań stanowiły:

1. Rozkład uziarnienia  
Skład ziarnowy określano za pomocą analizy sitowej w przesiewaczu wibracyjnym. Konstrukcja analizatora umożliwia przeniesienie napędu o mocy 300 W z silnika poprzez przekładnię ślimakową na zaklinowany ze ślimacznicą wał, na którym umieszczono mimośród z przeciwwagą. Sita obracały się z prędkością obrotową 2,83 s<sup>-1</sup>. Do analiz użyto sit o otworach okrągłych. Zastosowano zestaw 8 sit, o nominalnym wymiarze średnicy otworów wynoszącym: 0,5; 2; 3,15; 5; 6; 7; 8; 9 mm. Czas przesiewania dobrano na podstawie badań wstępnych, których wyniki zamieszczono w tabeli 6.1. W celu ułatwienia omawiania wyników każdej z klas ziarnowych nadano odpowiednie oznaczenie literowe. Po przesianiu wydzielone frakcje ważono na wadze AM 500 firmy AXIS z dokładnością do 0,01 g.



Tabela 6.1. Określenie czasu przesiewania dla recyklatu wytłoczonego PELD o zaw. poroforu 4%

wPELD 4%					
Klasa ziarnowa	Oznaczenie	Fracja, %			
		Czas przesiewania, s			
mm		60	120	180	240
0,05-0,5	O	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5-2,0	A	0,50±0,06	0,63±0,03	0,70±0,05	0,71±0,04
2,0-3,15	B	3,48±0,14	4,22±0,18	4,90±0,11	5,10±0,11
3,15-5,0	C	8,59±0,06	9,81±0,19	10,28±0,04	10,40±0,15
5,0-6,0	D	12,07±0,35	13,99±0,19	14,70±0,13	14,70±0,20
6,0-7,0	E	28,58±0,07	29,60±0,57	30,63±0,21	30,40±0,32
7,0-8,0	F	23,40±0,10	22,65±0,29	21,65±0,37	21,50±0,20
8,0-9,0	G	21,81±0,75	18,24±0,28	16,05±0,26	16,00±0,68

Uzyskane wyniki odsiewów sitowych pozwoliły wyznaczyć udział poszczególnych frakcji  $X_i$  w badanym recyklocie, według wzoru:

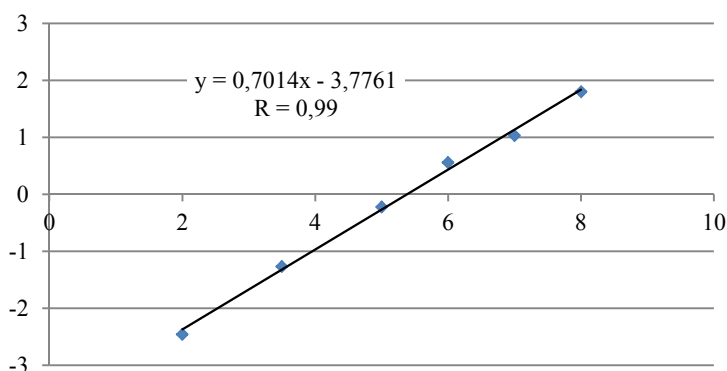
$$X_i = \frac{\Delta m_i}{m} \quad (6.1)$$

gdzie:

$\Delta m_i$  – masa odsiewu na i-tym sicie,

$m$  – całkowita masa próbki, g.

Sumę względną odsiewów  $H$  dla sita  $j$  obliczono ze wzoru 6.1, a następnie wyznaczono sumę względną przesiewów, co odpowiada funkcji sumy rozkładu  $Q_3(d_p)$ . W oparciu o rzeczywiste przebiegi funkcji sumy rozkładu i siatki ziarnowe dokonano opisu zbioru ziaren za pomocą funkcji dwuparametrowej (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Przykładowy wykres sumy rozkładów ziarnowych umieszczony na siatce rozkładu normalnego

Poszukiwano znanego rozkładu matematycznego, który z największym przybliżeniem opisuje uzyskane krzywe sumy rozkładu (na siatce ziarnowej krzywa

sumy rozkładu lub sumy względnego odsiewu powinna być prostą). Na podstawie wyznaczonych prostych określono charakterystyczne parametry rozkładu (w przypadku rozkładu normalnego: średnią wielkość ziaren  $d_{p50,3}$ , oraz odchylenie standardowe  $\sigma$ , charakteryzujące równomierność rozkładu) i sporządzono krzywe gęstości i sumy rozkładu.

## 2. Kształt i wymiar oraz stan powierzchni uzyskanych ziaren

Właściwości pojedynczych cząstek określono na stanowisku do cyfrowego pomiaru i analizy obrazu [1,59,121]. Układ pomiarowy składał się z następujących elementów:

- mikroskopu stereoskopowego o powiększeniu do 100 razy,
- kamery cyfrowej zamontowanej bezpośrednio w torze optycznym mikroskopu,
- programu MultiScan firmy Computer Scanning Systems, który pracował w środowisku Windows. Pakiet ten pozwalał na obróbkę uzyskanych obrazów, poprzez pomiary: odcinków (wymiary liniowe rzutu cząstki), długości linii krzywych oraz pola powierzchni wskazanego obszaru.

Zapisany w pamięci komputera obraz wybranych losowo ziaren poddano analizie poprzez określenie: wymiarów liniowych ( $l_{max}$  i  $l_{min}$ ), obwodu  $P$  oraz pola powierzchni  $S$  rzutu cząstek. Bezpośredni pomiar tych wielkości polegał na obserwacji obrazu rzutu ziarna w położeniu jej największej stabilności [1, 121]. W oparciu o uzyskane wyniki wyznaczono bezwymiarowe wielkości współczynników kształtu, stanowiących stosunek charakterystycznych wymiarów obrazu cząstek:

- współczynnik wydłużenia  $W_w$  jako stosunek maksymalnego i minimalnego wymiaru liniowego rzutu ziarna,
- współczynnik rozwinięcia powierzchni  $W_{rp}$  ze wzoru:

$$W_{rp} = \frac{P^2}{S} \quad (6.2)$$

gdzie:  $S$  stanowi powierzchnię rzutu ziarna a  $P$  jego obwód.

Wyznaczenie współczynników rozwinięcia powierzchni pozwoliło na odniesienie ich wartości do hipotetycznej cząstki kulistej o tej samej powierzchni (dla cząstki kulistej  $W_{rp}$  jest stałe i wynosi  $4\pi$ ) [1, 12]. Określanie cech geometrycznych cząstek dokonano dla klas ziarnowych, których udział masowy był największy. Liczebność próby ustalona na podstawie badania wstępnego, w oparciu o uzyskane odchylenie i założony 5-procentowy błąd pomiarowy, wynosiła od 100 do 200 ziaren.

## 3. Jednostkowe zużycie energii procesu rozdrabniania

W pomiarach zastosowano metodykę opisaną w pracach [36, 64, 120], zgodnie z którą podstawą do wyznaczenia energii zużytej na rozdrobnienie była rejestracja zmian momentu obrotowego w czasie rozdrabniania. Charakterystykę procesu wyznaczono na podstawie wartości średniej z trzech powtórzeń próby i odniesiono do masy materiału rozdrobnionej w trakcie rejestracji momentu obrotowego.

#### 4. Wydajność procesu rozdrabniania

Wyznaczono na podstawie pomiaru czasu rozdrabniania określonej masy. Pomiar rozpoczynał się w warunkach ustabilizowanego rozdrabniania przy maksymalnym wypełnieniu materiałem komory roboczej młyna, co rejestrowano w sposób ciągły.

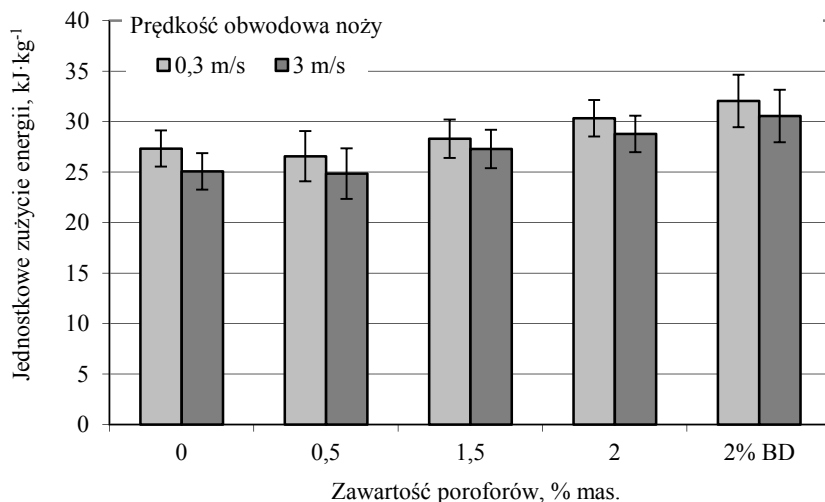
#### 5. Temperatura procesu

Zmiany cieplne układu charakteryzowano przez pomiar temperatury w komorze urządzenia rozdrabniającego (na sicie) i w obszarze nieruchomego noża tnącego. Dzięki możliwości cyfrowego pomiaru sygnałów napięciowych z czujników, realizowano ciągłą rejestrację temperatury, co umożliwiło wyznaczenie największych jej wartości w czasie.

## 6.2. BADANIE ROZDRABNIANIA POLIETYLENU MAŁEJ GĘSTOŚCI PRZY ZMIENNYM UDZIALE POROFORÓW

### 6.2.1. Rozdrabnianie wyprasek wtryskowych

Jednostkowe zużycie energii na rozdrobienie porowatego polietylenu jest w stosunku do innych materiałów na niskim poziomie i wynosi od około 25 do 32  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  (rys. 6.2). Można zauważyć, że wraz ze wzrostem ilości poroforów i zmniejszeniem prędkości obwodowej noży ruchomych podatność materiału na rozdrabnianie w młynie nożowym pogorszyła się.

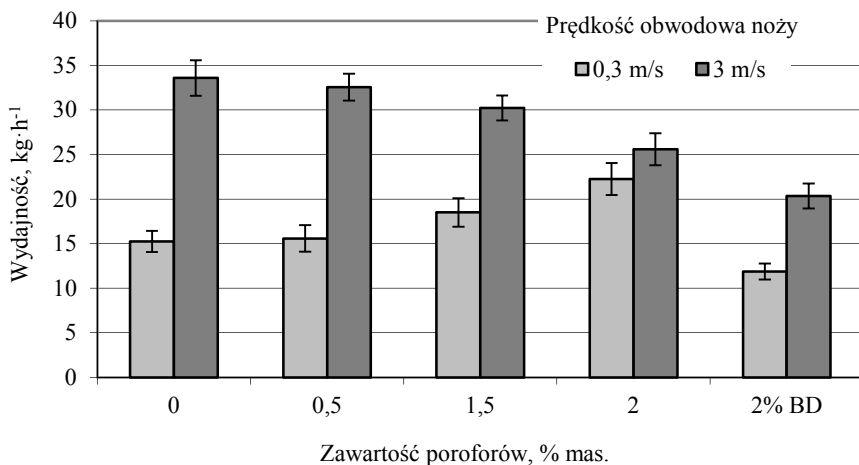


Rys. 6.2. Jednostkowe zużycie energii podczas rozdrabniania porowatego PELD przy minimalnej szczelinie międzynożowej

Ważną przesłanką potwierdzającą tę obserwację jest istotny spadek wydajności dla polietylenu o zawartości 2% mas. poroforów, uzyskanego przez wtryskiwanie z wyłączeniem fazy docisku (oznaczenie PELD 2% BD). Dla prędkości obwodowej

noży  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , spadek wydajności w stosunku do litego polietylenu (wydajność około  $15 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ) wyniósł ponad 20%. Zwiększenie prędkości obrotowej wirnika spowodowało istotne podniesienie wydajności.

Analizując wyniki zamieszczone na rysunku 6.3 można zauważyć, że przyrost masy recyklatu w czasie maleje wraz ze wzrostem zawartości poroforów w wypraskach, przy czym najistotniejsze zmiany można zaobserwować dla wyprasek o największej zawartości poroforów. Wydaje się, że pojawienie się fazy gazowej w PELD utrudnia jego rozdzielanie, gdyż pory mogą stanowić w objętości ciętego materiału obszary zapobiegające samoistnej propagacji pęknięcia, inicjowanej przez współpracujące ze sobą noże tnące ruchome i nieruchome. Można zatem uznać, że w przypadku polietylenu pory gazowe wzmacniają udział fazy elastycznej w materiale. W efekcie rozdrobnienie wyprasek z polietylenu porowatego jest mniej efektywne. Pomimo większych nakładów energetycznych wydajność procesu jest znacznie niższa w stosunku do litego PELD, co świadczy o większych trudnościach z podziałem struktury polietylenowo-gazowej na mniejsze objętości.



Rys. 6.3. Wydajność rozdrabniania porowatego PELD w postaci próbek wtryskowych

W wyniku rozdrobnienia porowatego polietylenu w młynie nożowym z użyciem sit  $\emptyset 9\text{mm}$  uzyskano recyklaty, o rozkładzie ziarnowym przedstawionym w tabeli 6.2. W oparciu o wyniki analiz sitowych przyjęto, że najbardziej adekwatnym do rozkładów rzeczywistych ziaren jest rozkład normalny. Parametry dopasowania przedstawia tabela 6.3, a sporządzone krzywe gęstości  $q_3(d_p)$  i rozkładu  $Q_3(dp)$  rysunek 6.4.

Stwierdzono, że wraz ze wzrostem ilości porów w strukturze zmniejsza się wartość średnicy medialnej  $d_{50,3}$ , przy zbliżonej wartości rozrzutu uziarnienia (tab. 6.3). Dla wszystkich analizowanych rozkładów ziarnowych przeciętna wielkość ziarna otrzymanych recyklatów wynosi poniżej 5 mm, co jest korzystne z uwagi na przetwórstwo wtórne. Można także zauważyć, że uzyskane produkty rozdrobnienia charakteryzują się bardzo małym udziałem frakcji o najmniejszej wielkości ziarna (klasa ziarnowa O i A) (tab. 6.2).

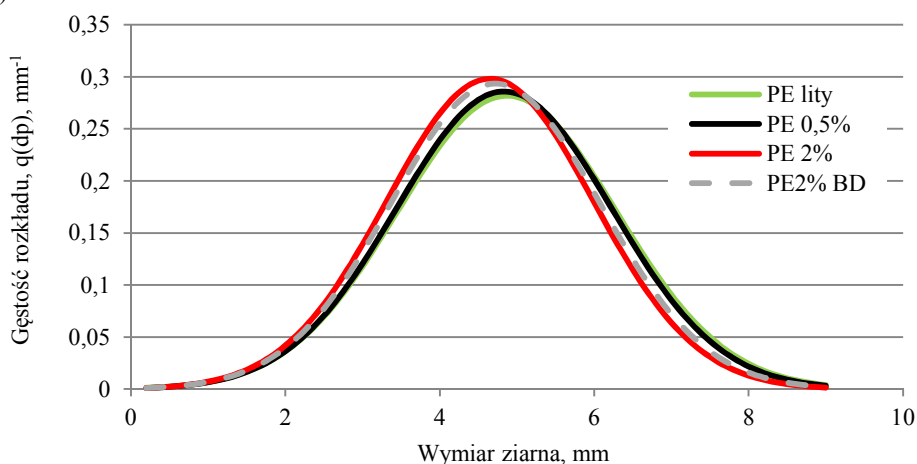
Tabela 6.2. Rozkład uziarnienia dla wyprasek z polietylenu o różnej zawartości poroforów, rozdrobionych z użyciem sit  $\phi$  9 mm

Klasa ziarnowa mm	PELD lity		PELD 0,5%		PELD 2%		PELD 2% BD	
	frakcja % mas.	suma przesiew % mas	frakcja % mas.	suma przesiew % mas	frakcja % mas.	suma przesiew % mas	frakcja % mas.	suma przesiew % mas
O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A	2,00±0,04	0,00	1,90±0,04	0,00	2,10±0,51	0,00	1,90±0,16	0,00
B	15,31±0,48	2,00	16,20±0,45	1,90	19,00±0,85	2,10	18,00±0,18	1,90
C	38,56±0,29	17,31	39,20±0,31	18,10	41,50±0,64	21,10	40,10±0,13	19,90
D	21,05±0,93	55,87	21,00±0,92	57,30	19,90±1,45	62,60	21,20±0,21	60,00
E	16,59±0,18	76,93	15,60±0,16	78,30	13,50±0,58	82,50	14,00±0,31	81,20
F	6,48±0,39	93,52	6,10±0,35	93,90	4,00±0,56	96,00	4,80±0,28	95,20
G	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0

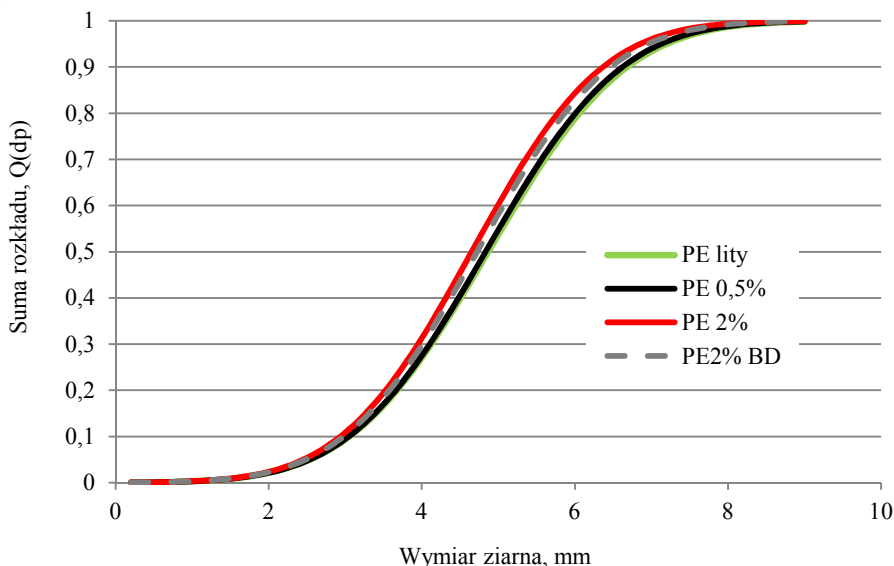
Tabela 6.3. Parametry i stopień dopasowania rzeczywistych krzywych sumy rozkładu  $Q_3(d_p)$ , przedstawionych na siatkach rozkładu normalnego

Zawartość poroforu, %	Polietylen małej gęstości, PELD				
	$m_c$	$b_c$	R	$d_{50,3}$	$\sigma_c$
0	0,7065	3,439	0,99	4,87	1,42
0,5	0,7168	3,464	0,99	4,83	1,40
2,0	0,7474	3,477	0,99	4,65	1,34
2,0 BD	0,7357	3,473	0,99	4,72	1,36

a)



b)



Rys. 6.4. Wpływ stopnia porowatości na skład ziarnowy recyklatów z wyprasek PELD rozdrobionych w młynie nożowym na sicie  $\varnothing$  9mm: a) krzywe gęstości rozkładu, b) krzywe sumy rozkładu

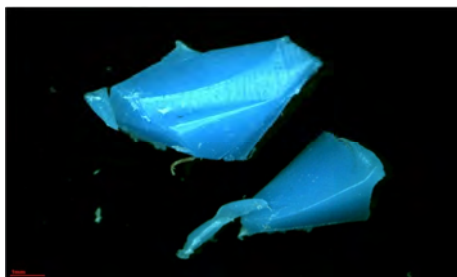
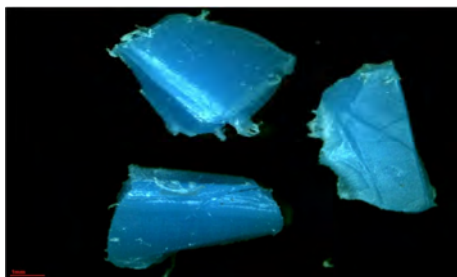
Przeprowadzona analiza obrazu wskazuje przede wszystkim na podobny charakter oddziaływań na ziarno w obszarze szczeliny międzynożowej, o czym świadczą podobne wartości współczynnika wydłużenia i rozwinięcia powierzchni dla próbek o różnym stopniu porowatości struktury (tab. 6.4). Wyjątkiem jest recyklat PELD o zawartości poroforów w ilości 2% mas., dla którego dominują ziarna o mniejszej powierzchni i obwodzie, ale o zbliżonym do pozostałych kształcie i proporcji pomiędzy wymiarami liniowymi (tab. 6.4).

Tabela 6.4. Wpływ zawartości poroforów na cechy geometryczne ziaren otrzymanych przez rozdrobienie próbek wtryskowych PELD

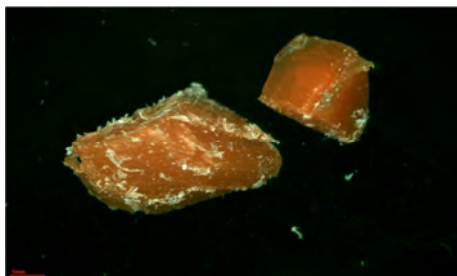
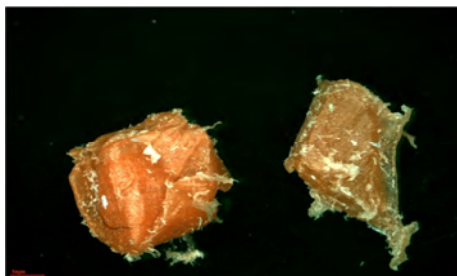
Rodzaj próbek	Powierzchnia S mm <sup>2</sup>	Obwód, P mm	$l_{\max}$ mm	$l_{\min}$ mm	$W_w$	$W_{tp}$
PELD 0%	17,93±9,0	21,16±5,6	6,66±1,6	4,62±1,3	1,44	25,0
PELD 0,5%	17,79±7,8	21,50±5,3	6,38±1,5	4,73±1,2	1,35	26,0
PELD 1,5%	18,03±7,6	21,50±5,7	6,36±1,5	4,74±1,2	1,34	25,6
PELD 2%	13,30±7,7	18,60±6,2	5,65±1,6	3,99±1,2	1,42	26,0
PELD 2% BD	17,38±9,8	21,16±6,8	6,51±2,0	4,54±1,2	1,43	25,8

Potwierdzeniem uzyskanych wartości określających cechy geometryczne ziaren są ich obrazy, zarejestrowane przy użyciu mikroskopu stereoskopowego (rys. 6.5).

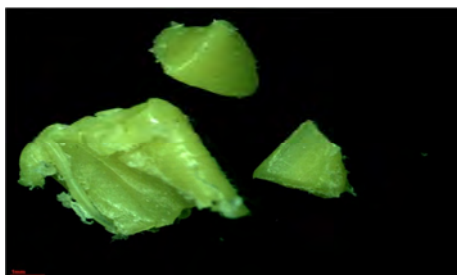
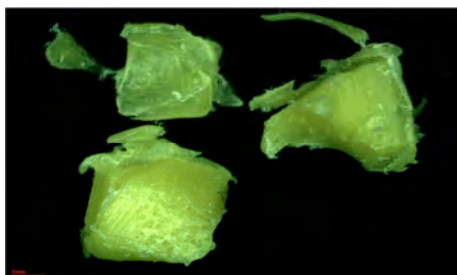
a) PELD o litej strukturze pozbawionej porów



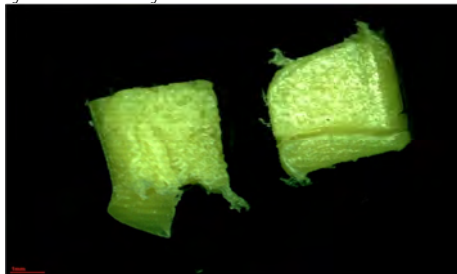
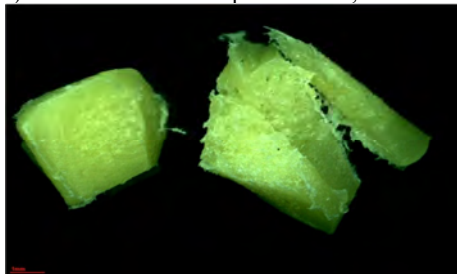
b) PELD o zawartości poroforów 1,5% mas.



c) PELD o zawartości poroforów 2,0% mas.



d) PELD o zawartości poroforów 2,0% mas – otrzymane bez fazy docisku



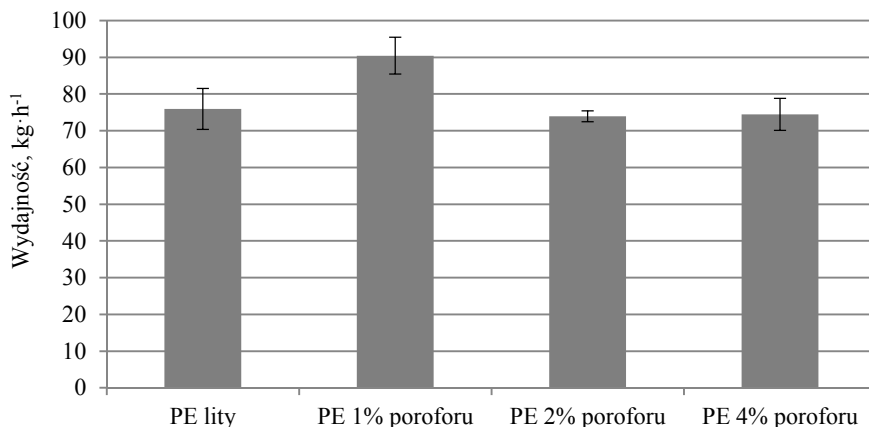
Rys. 6.5. Obrazy projekcyjne ziaren PELD o różnej zawartości poroforów, otrzymane przez rozdrobnienie w młynie nożowym z wykorzystaniem sit  $\varnothing$  9 mm – powiększenie optyczne x8

W zbiorze tym dominują ziarna o płaskich powierzchniach, otrzymane przez przecięcie materiału w odpowiedniej, minimalnej szczelinie między współpracującymi krawędziami tnącymi noży ruchomych i nieruchomych. Dodanie poroforów spowodowało

nieznaczne postrzępienie krawędzi przecięcia ziaren, ale nadal większość stanowi zbiór cząstek o płaskich płaszczyznach przecięcia. Przegląd ziaren zarejestrowanych przez system do analizy obrazu pozwala także dostrzec zmiany w strukturze próbek polietylenu porowatego, zwłaszcza przy największym stopniu napełnienia poroforem (rys. 6,5 d). W świetle odbitym widać szereg porów w części rdzeniowej i litą warstwę wierzchnią.

### 6.2.2. Rozdrabnianie próbek wytłaczanych

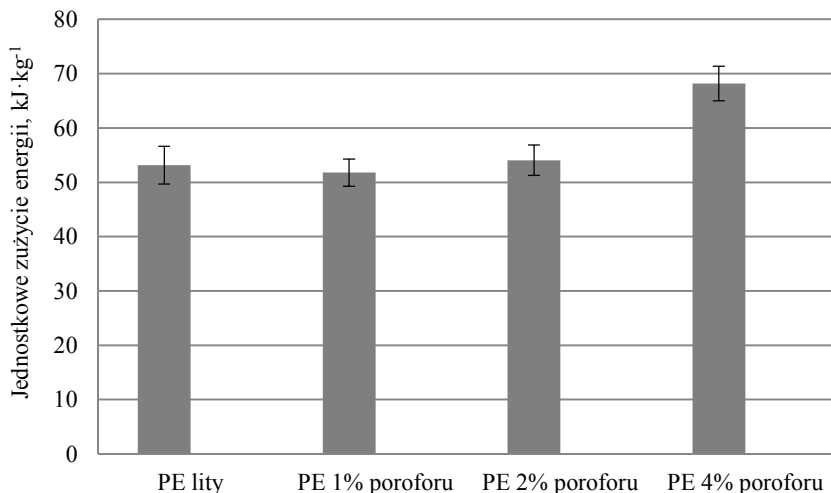
W przypadku PELD wytłaczanego o znacznie większym udziale fazy gazowej stwierdzono, że proces rozdrabniania przebiega znacznie bardziej efektywnie niż dla wyprasek. Świadczy o tym istotny wzrost wydajności dla procesu zrealizowanego z prędkością obwodową noży  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (rys. 6.6). Wydaje się, że podatność polietylenu na rozdrabnianie jest także funkcją intensywności wyporowania poroforów w strukturze. Nie ulega bowiem wątpliwości, że ilość powstałej fazy gazowej w procesie wytłaczania jest znacznie wyższa, ponieważ wytwarzano wytłoczyny o znacznej grubości, których krzepnięcie przebiegało w dłuższym czasie niż wyprasek.



Rys. 6.6. Wpływ zawartości poroforów na wydajność procesu rozdrabniania wytłoczyn PELD z prędkością obwodową noży  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Wzrostowi intensywności porowania towarzyszy większe zapotrzebowanie energii do rozdrobnienia tych materiałów. Analiza wyników zawartych na rysunku 6.7 wskazuje, że jednostkowe zużycie energii na rozdrobnienie wytłoczyn jest dwukrotnie wyższe niż dla próbek uzyskanych z polietylenu metodą wtryskiwania. Podobnie jak dla wyprasek, największe zapotrzebowanie energetyczne charakteryzuje proces rozdrabniania wytłoczyn z polietylenu o największej zawartości poroforów. Wydaje się, że powodem większego zużycia energii jest występowanie dodatkowego odkształcania licznych porów w płaszczyźnie przecinania, a także dodatkowego absorbowania energii w strukturze polimerowo-gazowej materiału, wynikającej z oddziaływania na niego ruchomych noży tnących. Porównując otrzymane rezultaty dla polietylenu można zatem stwierdzić, że wydajność odniesiona do jednostkowego zużycia energii jest podobna dla wszystkich analizowanych przypadków bez względu na postać wsadową materiału.





Rys. 6.7. Wpływ zawartości poroforów na jednostkowe zużycie energii podczas rozdrabniania wyłoczyn PELD z prędkością obwodową noży  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

W wyniku rozdrobnienia porowatych wyłoczyn z polietylenu w młynie nożowym z użyciem sit  $\varnothing 9 \text{ mm}$  uzyskano recyklaty, o rozkładzie ziarnowym zawartym w tabeli 6.5.

Tabela 6.5. Rozkład uziarnienia dla wytworów z wytłaczanego polietylenu wPE o różnej zawartości poroforów, rozdrobnionych z użyciem sit  $\varnothing 9 \text{ mm}$

Zawartość poroforów, mm								
Klasa ziarnowa mm	wPELD lity		wPELD 1%		wPELD 2%		wPELD 4%	
	frakcja % mas.	suma przesiew % mas	frakcja % mas.	suma przesiew % mas	frakcja % mas.	suma przesiew % mas	frakcja % mas.	suma przesiew % mas
O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A	0,10±0,04	0,00	0,10±0,04	0,00	0,50±0,04	0,00	0,70±0,29	0,00
B	12,30±1,56	0,10	8,90±0,45	0,10	10,50±0,18	0,50	9,50±2,20	0,70
C	32,60±0,11	12,40	29,00±0,31	9,00	32,20±0,04	11,00	31,00±1,00	10,20
D	16,20±0,88	45,00	13,20±0,92	38,00	27,40±0,18	43,20	29,90±0,73	41,20
E	23,30±0,35	61,20	28,80±0,16	51,20	12,40±1,56	70,60	13,80±3,49	71,10
F	9,70±0,53	84,50	12,50±0,35	80,00	10,80±1,24	83,00	11,50±0,07	84,80
G	5,80±0,28	94,20	7,50±0,35	92,50	6,20±0,39	93,80	3,60±0,67	96,40
H	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0

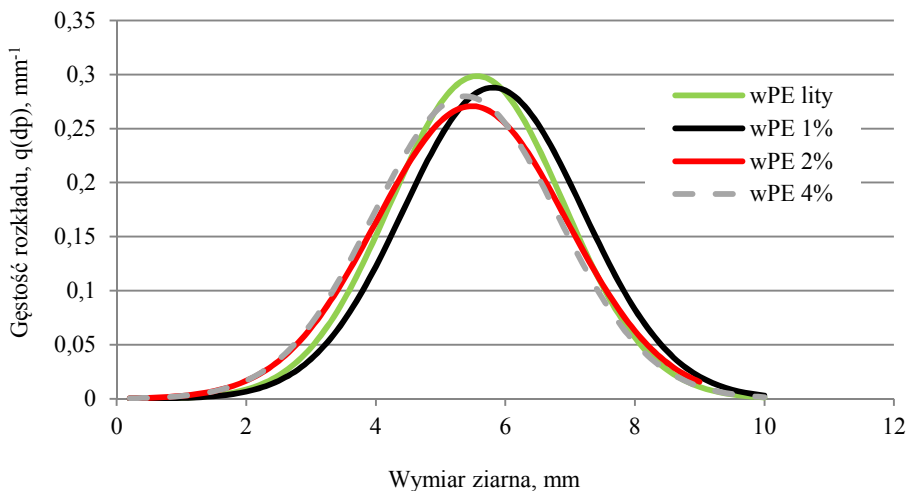
Na podstawie wyników analiz sitowych (tab. 6.5) i siatek ziarnowych rozkładów dwuparametrowych przyjęto, że najbardziej adekwatnym do rozkładów rzeczywistych ziaren jest w tym przypadku także rozkład normalny. Parametry dopasowania przedstawia tabela 6,6, a sporządzone krzywe gęstości  $q_3(d_p)$  i rozkładu  $Q_3(d_p)$  rysunek 6,8. W oparciu o test Kołmogorowa nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, że rozkład masowy uziarnienia ma dystrybuantę rozkładu normalnego.

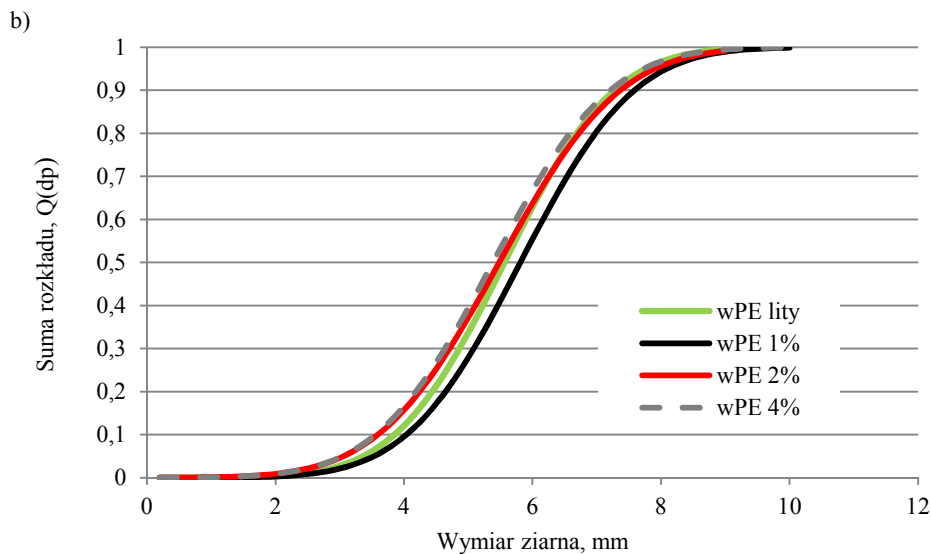
Tabela 6.6. Parametry i stopień dopasowania krzywych sumy rozkładu  $Q_3(d_p)$  dla recyklatów PELD, przedstawionych na siatkach rozkładu normalnego

Rodzaj tworzywa, zawartość poroforów	Polietylen małej gęstości, wPELD				
	$m_c$	$b_c$	R	$d_{50,3}$	$\sigma_c$
wPELD, 0%	0,7485	4,1642	0,98	5,56	1,34
wPELD, 1%	0,7218	4,1953	0,99	5,81	1,39
wPELD, 2%	0,6788	3,7212	0,99	5,48	1,47
wPELD, 4%	0,7014	3,7761	0,99	5,38	1,43

Stwierdzono, że wraz ze wzrostem zawartości poroforów zmniejsza się wartość średnicy medialnej  $d_{50,3}$ , przy czym dla wszystkich przypadków wartość przeciętnej wielkości ziarna jest istotnie wyższa niż dla recyklatów otrzymanych z wyprasek PELD (por. tabela 6.3). Jednocześnie stwierdzono, że wraz ze wzrostem ilości fazy gazowej w strukturze wytłocznin recyklaty otrzymane przez rozdrobnienie w młynie nożowym charakteryzują się wzrostem rozrzutu uziarnienia. Dla wszystkich analizowanych rozkładów ziarnowych przeciętna wielkość ziarna otrzymanych recyklatów wynosi powyżej 5 mm, co w porównaniu z wynikami analiz sitowych dla rozdrobnionych wyprasek jest mniej korzystne z punktu widzenia wtórnego przetwórstwa. Uzyskane materiały charakteryzują się bardzo małym udziałem frakcji o najmniejszym wymiarze ziarna (klasa ziarnowa O i A) (tab. 6.5). W oparciu o wyznaczone parametry rozkładu uziarnienia sporządzono krzywe sumy  $Q_3(d_p)$  i gęstości rozkładu  $q_3(d_p)$  (rys. 6.8).

a)





Rys. 6.8. Wpływ stopnia porowatości na skład ziarnowy wytłoczniny z PELD rozdrobionych w młynie nożowym na sicie  $\varnothing$  9mm: a) krzywe gęstości rozkładu, b) krzywe sumy rozkładu

Przeprowadzona analiza obrazu dla wszystkich recyklatów otrzymanych z wytłoczniny PELD wskazuje przede wszystkim na nieistotny wpływ zawartości poroforów na postać geometryczną otrzymanych ziaren recyklatów, o czym świadczą wartości współczynnika rozwinięcia powierzchni (tab. 6.7). Wraz ze wzrostem ilości porów w strukturze wytworów z polietylenu współczynnik kształtu  $W_{rp}$  nie zmienia się istotnie. Należy jednak zaznaczyć, że recyklaty wPELD 4% charakteryzują się najmniejszymi wymiarami, powierzchnią i obwodem, a obydwie analizowane współczynniki wydłużenia i rozwinięcia powierzchni mają najniższe wartości. Pomimo tego, relacje pomiędzy wymiarami liniowymi a kształtem ziaren we wszystkich przypadkach są podobne.

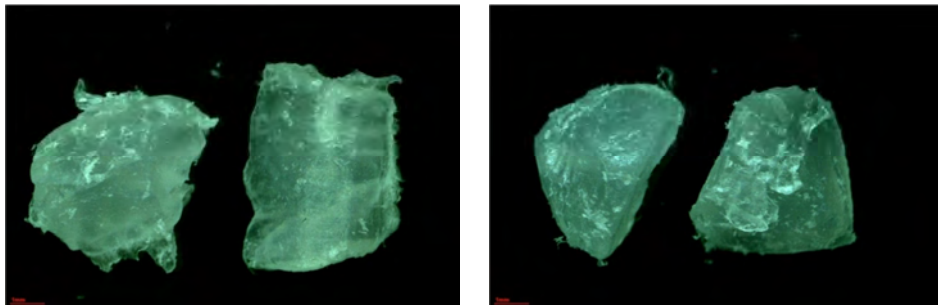
Tabela 6.7. Wpływ zawartości poroforów na cechy geometryczne ziaren otrzymanych recyklatów PELD otrzymanych przez rozdrobienie wytłoczniny polietylenowych w młynie nożowym z wykorzystaniem sit  $\varnothing$  9mm

Rodzaj próbek	Powierzchnia S mm <sup>2</sup>	Obwód, P mm	$l_{max}$ mm	$l_{min}$ mm	$W_w$	$W_{rp}$
wPELD 0%	22,16±12,5	23,40±7,4	7,06±1,9	4,94±1,6	1,43	24,7
wPELD 1%	20,62±9,7	22,88±5,9	6,96±1,7	4,90±1,3	1,42	25,4
wPELD 2%	21,70±11,3	24,03±7,2	6,97±1,8	4,98±1,5	1,40	26,6
wPELD 4%	15,14±8,9	19,05±5,8	5,75±1,7	4,14±1,3	1,39	24,0

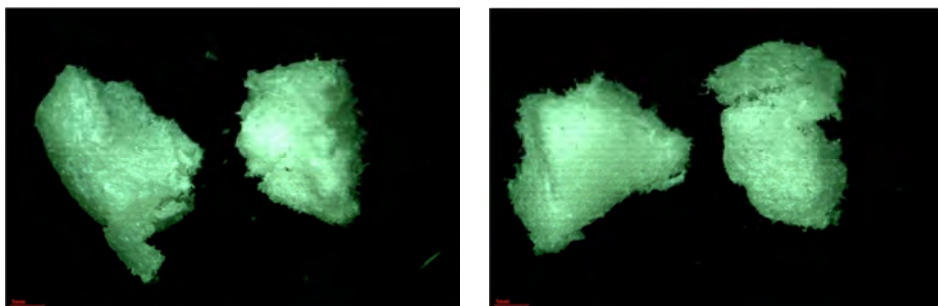
W analizowanym zbiorze dominują ziarna o płaskich powierzchniach, które są wynikiem przecięcia materiału na skutek oddziaływania na materiał wsadowy noży

tnących ruchomych i nieruchomych (rys. 6.9). Dodanie poroforów spowodowało postrzępienie krawędzi przecięcia ziaren, wynikające z dużej ilości porów, zlokalizowanych także w bliskiej odległości od warstwy wierzchniej. W porównaniu z próbkami wtryskowymi, recyklaty otrzymane przez rozdrobnienie wytłaczanego polietylenu zawierają większą ilość porów, co także wpływa na zmianę barwy obrazu powierzchni przecięcia w świetle odbitym, zarejestrowanego w układzie optycznym. Na podstawie obrazów można stwierdzić, że w tym przypadku dominującą przyczyną podziału materiału jest cięcie.

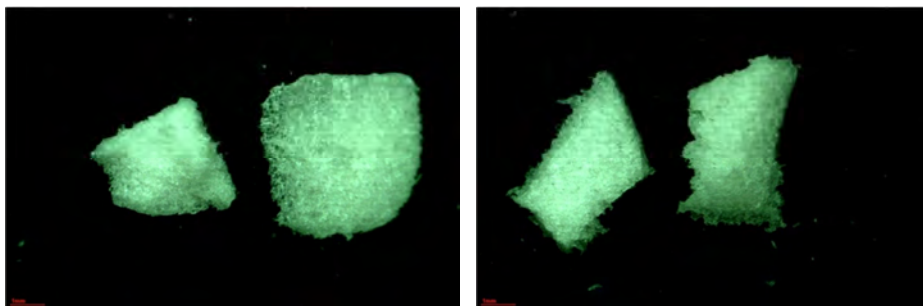
a) wytłoczyna PELED o litej strukturze, pozbawionej porów



b) wytłoczyna PELED o zawartości poroforów 2,0% mas.



c) wytłoczyna PELED o zawartości poroforów 4,0% mas.



Rys. 6.9. Obrazy projekcyjne ziaren polietylenu o różnej zawartości poroforów; recyklaty otrzymano przez rozdrobnienie w młynie nożowym z wykorzystaniem sit  $\varnothing$  9 mm – powiększenie optyczne x8

Podobnie jak w przypadku wyprasek z PELD można dostrzec istotny wpływ zawartości poroforów na stan powierzchni przecięcia. W świetle odbitym widać znacznie większą ilość porów o większych wymiarach w części rdzeniowej. Obliczone współczynniki rozwinięcia powierzchni dla wszystkich recyklatów porowatych są w przybliżeniu 2-krotnie większe niż dla kształtu kulistego, dla którego  $W_{\text{p}}$  wynosi  $4\pi$ .

### 6.3. BADANIA ROZDRABNIANIA POLIPROPYLENU PRZY ZMIENNYM UDZIALE POROFORÓW

#### 6.3.1. Rozdrabnianie wyprasek wtryskowych

W wyniku rozdrabniania porowatych próbek z polipropylenu w młynie nożowym z użyciem sit  $\phi$  9mm uzyskano recyklaty o rozkładzie ziarnowym przedstawionym w tabeli 6.8. W oparciu o wyniki analiz sitowych i siatki ziarnowe rozkładów dwuparametrowych przyjęto, że najbardziej adekwatnym do rozkładów rzeczywistych ziaren jest rozkład normalny. Parametry dopasowania przedstawiono w tabeli 6.9, a sporządzone krzywe gęstości  $q_3(d_p)$  i rozkładu  $Q_3(dp)$  przedstawiono na rysunku 6.10.

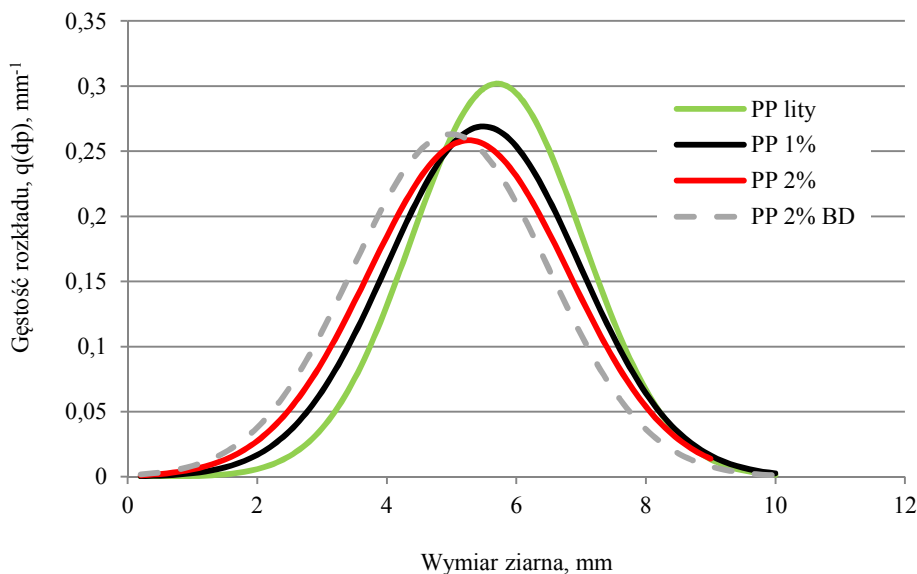
Tabela 6.8. Rozkład uziarnienia dla wyprasek z polipropylenu o różnej zawartości poroforów, rozdzielonych z użyciem sit  $\phi$  9mm

Zawartość poroforów, mm								
Klasa ziarnowa mm	PP lity		PP 1%		PP 2%		PP 2% BD	
	frakcja % mas.	suma przesiew % mas	frakcja % mas.	suma przesiew % mas	frakcja % mas.	suma przesiew % mas	frakcja % mas.	suma przesiew %mas
O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A	0,10±0,14	0,00	0,30±0,08	0,00	2,10±0,28	0,00	2,10±0,35	0,00
B	12,50±1,26	0,10	11,90±0,59	0,30	16,90±0,59	2,10	16,70±1,63	2,10
C	33,60±0,31	12,60	32,20±0,86	12,20	29,60±1,37	19,00	34,00±0,21	18,80
D	16,20±0,58	46,10	16,70±0,49	44,40	15,10±1,14	48,60	19,30±0,65	52,70
E	23,30±0,45	62,30	23,60±0,85	61,30	22,90±0,08	63,70	20,20±1,07	72,00
F	9,70±0,34	85,60	9,30±0,17	84,90	9,20±0,21	96,60	5,00±1,50	92,20
G	4,70±0,18	95,30	5,80±0,16	94,20	4,20±0,24	95,80	2,80±0,22	97,20
H	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0

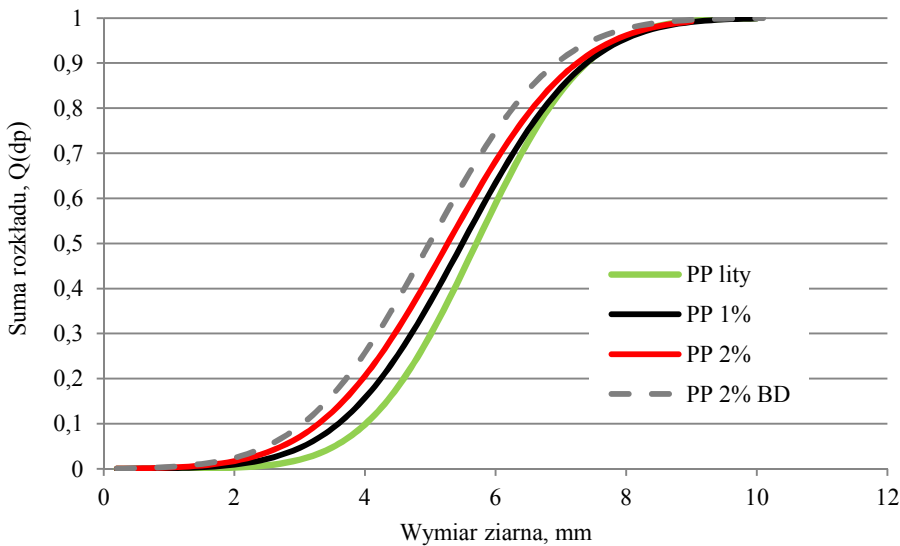
Tabela 6.9. Parametry i stopień dopasowania rzeczywistych krzywych sumy rozkładu  $Q_3(d_p)$  dla PP, przedstawionych na siatkach rozkładu normalnego

Zawartość poroforów, %	Polipropylen				
	$m_c$	$b_c$	R	$d_{50,3}$	$\sigma_c$
0	0,7567	4,3169	0,99	5,70	1,32
0,5	0,6744	3,7032	0,99	5,49	1,48
2,0	0,6477	3,4114	0,99	5,27	1,54
2,0 BD	0,6593	3,2875	0,99	4,99	1,52

a)



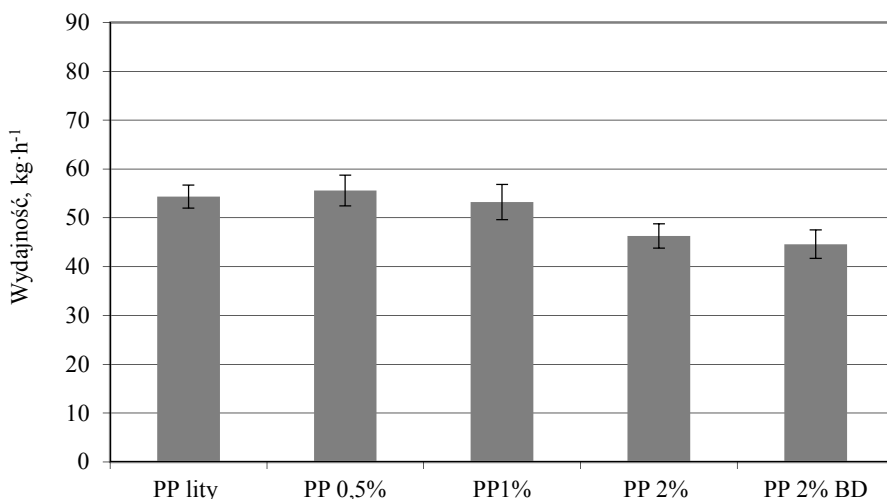
b)



Rys. 6.10. Wpływ stopnia porowatości na skład ziarnowy wyprasek z PP, rozdrobnionych w młynie nożowym z użyciem sit  $\varnothing$  9mm: a) krzywe gęstości rozkładu, b) krzywe sumy rozkładu

Na podstawie wyznaczonych krzywych sumy rozkładu (rys. 6.10b) można stwierdzić, że wraz ze wzrostem zawartości poroforów zmniejsza się stopień rozdrobnienia recyklatów. Jednocześnie, pojawienie się fazy gazowej w polipropylenie powoduje

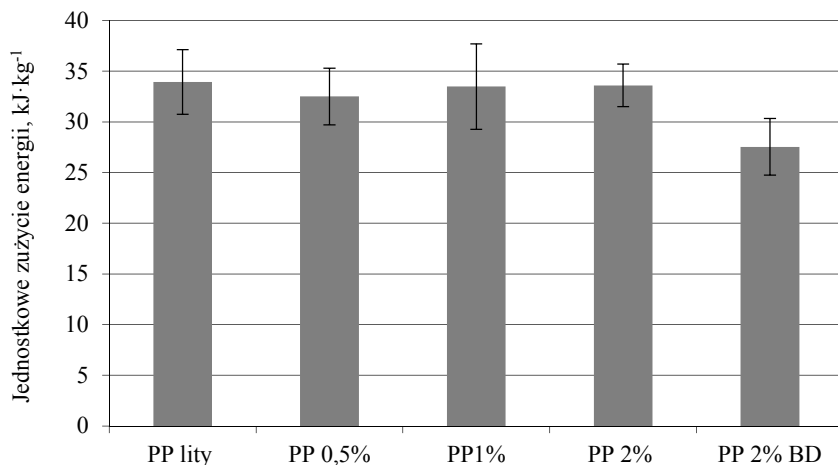
większy rozrzut frakcji, o czym świadczą wartości odchylenia standardowego rozkładów (tab. 6.9), a także krzywe gęstości rozkładów, które dla struktur porowatych są spłaszczone w stosunku do recyklatów litego polipropylenu (rys. 6.10a). Jest to pośredni dowód na zmianę warunków podziału nadawy z PP porowatego, dla którego pory gazowe udział pęknięcia w podziale materiału. O zmianie warunków podziału PP z udziałem fazy gazowej świadczy także istotny spadek wydajności procesu rozdrabniania dla próbek z największą zawartością poroforów (rys. 6.11 – PP 2% i 2% BD).



Rys. 6.11. Wydajność procesu rozdrabniania wyprasek z polipropylenu o różnym stopniu porowatości struktury; próby przeprowadzono z prędkością obwodową noży ruchomych  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  oraz przy zastosowaniu sit o średnicy otworów  $\varnothing 9 \text{ mm}$

Wydaje się, że w tych przypadkach faza gazowa podwyższa udarową odporność kompozytu polipropylenowo-gazowego i obniża jego podatność na rozdzielanie, zwłaszcza w przypadku oddziaływania na materiał jednego z noży tnących i tarcia wsadu wzajemnie o siebie i metalowe elementy komory roboczej. Wynika to z faktu, że faza gazowa wzmacnia w polipropylenie znaczenie fazy elastycznej. Obniżeniu wydajności towarzyszy także istotny spadek jednostkowego zużycia energii potrzebnej na rozdrobnienie dla próbek z udziałem 2% poroforu uzyskanych w procesie wtryskiwania zrealizowanym bez docisku ( $27 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) (rys. 6.12).

W pozostałych przypadkach stwierdzono podobne wyniki dla tego czynnika wyściowego badań, uzyskując wartości w zakresie od 33 do  $34 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Jest to stosunkowo niewielki poziom energii potrzebnej do rozdrobnienia materiału do stopnia uziarnienia wystarczającego do ponownego wykorzystania we wtórnym przetwórstwie metodą wtryskiwania. Przeprowadzona analiza obrazu wskazuje na podobny charakter oddziaływań na ziarno w obszarze szczeliny międzynożowej we wszystkich przypadkach, o czym świadczą zbliżone wartości współczynnika wydłużenia i rozwinięcia powierzchni dla próbek o różnym stopniu porowatości struktury (tab. 6.10).



Rys. 6.12. Jednostkowe zużycie energii procesu rozdrabniania wyprasek z polipropylenu o różnym stopniu porowatości struktury; próby przeprowadzono z prędkością obwodową noży ruchomych  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  oraz przy zastosowaniu sit o średnicy otworów  $\varnothing 9 \text{ mm}$

W stosunku do PELD recyklaty PP mają mniejszy obwód, wyższą wartość współczynnika wydłużenia (o około 13%), a wartość współczynnika kształtu jest mniejsza o około 15%. Wydaje się, że podstawowe znaczenie w tym przypadku odgrywa różnica sztywności i podatności na pękanie obu materiałów. Polipropylen, jako bardziej kruchy niż PELD, ulega dodatkowemu rozdrobnieniu wskutek uderowego oddziaływania noży ruchomych. Z tego powodu ziarna recyklatów PP są mniej regularne, a jednocześnie ich obwód jest bliższy standardowym kształtom owalnym niż cząstki polietylenu. Pomimo tego recyklat ten w pełni nadaje się do ponownego przetworstwa metodą wtryskiwania. Większa ilość porów w strukturze wpływa na wzrost obu współczynników, co świadczy o zwiększonym udziale ziaren nieregularnych.

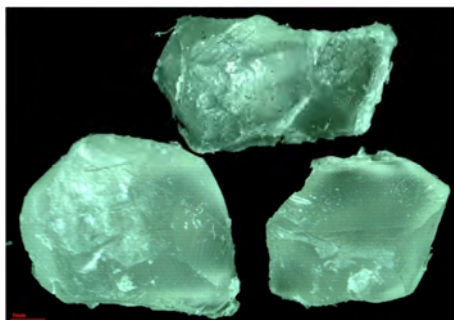
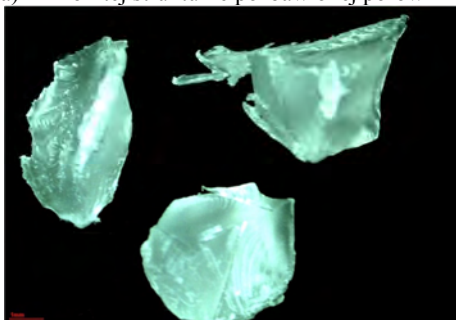
Tabela 6.10. Wpływ zawartości poroforów na cechy geometryczne ziaren recyklatów PP otrzymanych przez rozdrobnienie z wykorzystaniem sit  $\varnothing 9 \text{ mm}$

Rodzaj próbek	Powierzchnia S mm <sup>2</sup>	Obwód, P mm	$l_{\max}$ mm	$l_{\min}$ mm	$W_w$	$W_{rp}$
PP 0%	17,14±9,1	19,03±5,4	6,13±1,6	3,75±1,2	1,63	21,1
PP 0,5%	17,43±11,9	19,18±6,7	6,22±2,1	3,70±1,2	1,68	21,1
PP 1,0%	17,82±8,4	19,91±5,6	6,42±1,6	3,86±1,0	1,67	22,2
PP 2,0%	14,43±8,2	17,68±5,6	5,81±1,8	3,36±1,0	1,73	21,7

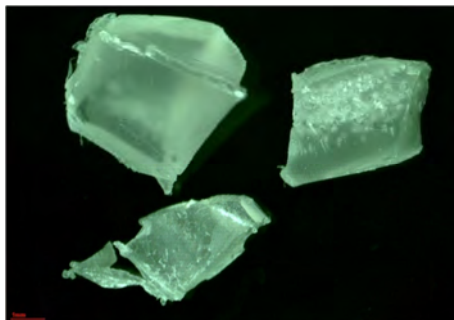
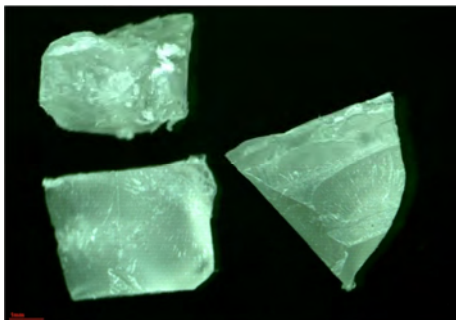
Potwierdzeniem ilościowego opisu cech geometrycznych ziaren są ich obrazy, zarejestrowane przez mikroskop. W zbiorze tym dominują ziarna o płaskich powierzchniach, które są wynikiem przecięcia materiału w odpowiedniej, minimalnej szczelinie między współpracującymi krawędziami tnącymi noży ruchomych i nieruchomych (rys. 6.13). Dodanie poroforów spowodowało nieznaczne postrzępienie krawędzi przecięcia ziaren, ale nadal większość stanowi zbiór cząstek o płaskich płaszczyznach przecięcia.



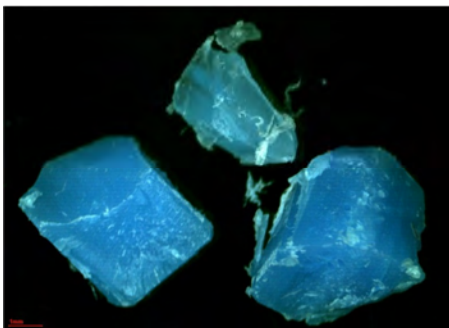
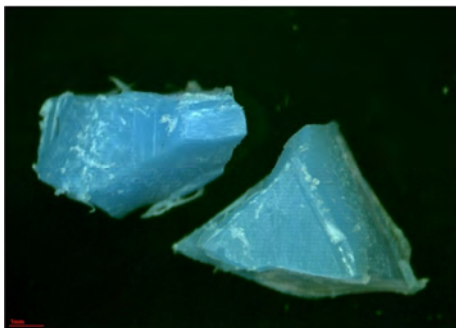
a) PP o litej strukturze pozbawionej porów



b) PP o zawartości poroforów 2,0% mas.



c) PP o zawartości poroforów 2,0% mas. – otrzymany bez fazy docisku

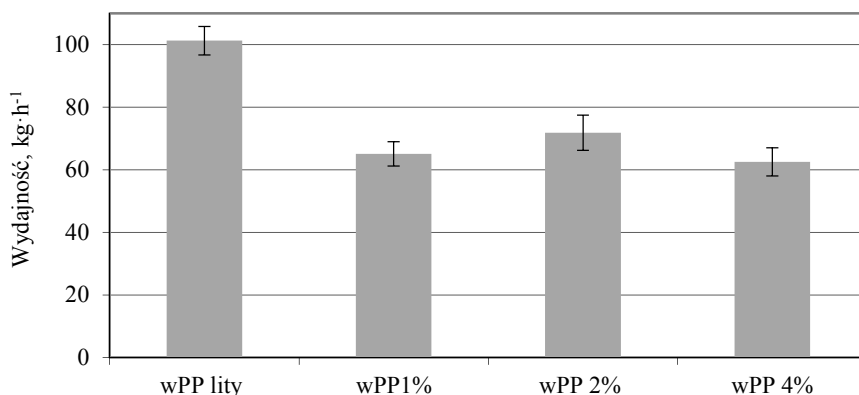


Rys. 6.13. Obrazy projekcyjne ziaren PP o różnej zawartości poroforów, otrzymane przez rozdrobnienie w młynie nożowym z wykorzystaniem sit  $\varnothing$  9 mm – pow. optyczne  $\times 8$

Analiza obrazów ziaren pozwala także dostrzec zmiany w strukturze próbek porowatego PP, zwłaszcza przy największym stopniu napełnienia poroforem (rys. 6.13 b, c). W świetle odbitym widać wiele porów w części rdzeniowej.

### 6.3.2. Rozdrabnianie próbek wytłaczanych

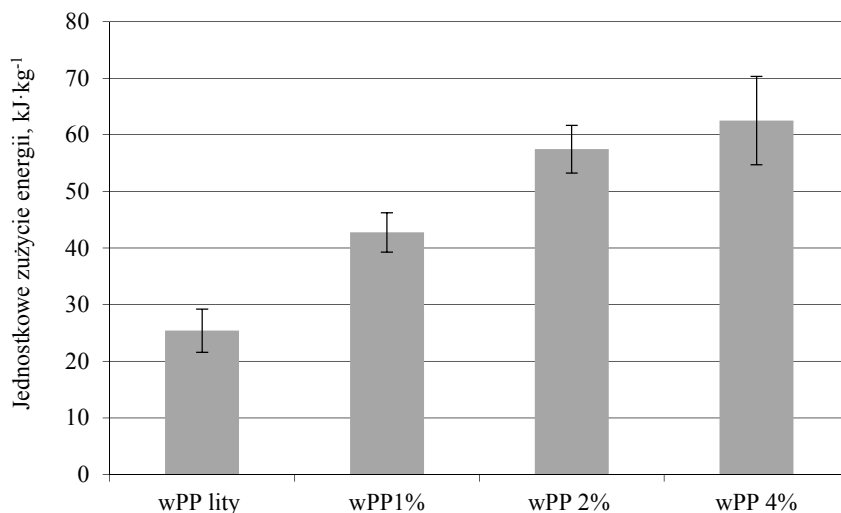
Wydajność procesu rozdrabniania wytłocznin z polipropylenu jest uzależniona od postaci geometrycznej odpadów i zawartości porów gazowych. Wytwory o strukturze litej poddają się najbardziej efektywnemu rozdrabnianiu, a uzyskana wydajność procesu jest w przybliżeniu dwa razy wyższa niż wyprasek porowatych. Najmniejsza zawartość poroforów istotnie zmniejsza wydajność rozdrabniania o 40%, a to oznacza zauważalny dla wytłocznin wpływ porów na efektywność tego procesu (rys. 6.14).



Rys. 6.14. Wpływ zawartości poroforów na wydajność procesu rozdrabniania wytłocznin z PP; próby przeprowadzono przy zastosowaniu sit o średnicy otworów  $\varnothing$  9 mm

Mniejszą podatność na rozdrabnianie struktur polipropylenowo-gazowych potwierdzają wyniki zużycia energii na rozdrobienie w odniesieniu do masy (rys. 6.15). Podział materiału o największej zawartości poroforów (wPP 4%) jest najbardziej energochłonny spośród wszystkich wariantów materiałowych polipropylenu porowatego i generuje zapotrzebowanie energetyczne na poziomie ponad  $60 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Jest to prawie 2-krotnie wyższa wartość w porównaniu z wypraskami wtryskowymi z PP. Ta zasadnicza zmiana wynika z różnic w udziale porów gazowych w strukturze próbek wytłaczanych i wtryskiwanych. W procesie wytłaczania PP porofory mają znacznie lepsze warunki do pełnego rozkładu w trakcie kształtowania wytłoczyny, ponieważ oddziaływanie na tworzywo ciepła potrzebnego do inicjacji powstawania i rozrostu porów trwa znacznie dłużej niż w cyklicznym procesie wtryskiwania. Próbki wytłaczane miały ponadto znacznie większą grubość niż wypraski, co przedłużyło oddziaływanie ciepła na porofory znajdujące się w stopionym tworzywie. To spowodowało redukcję gęstości wytłocznin o ponad 60% w stosunku do litego PP (dla próbek wPP 4%). Z tego powodu prawdopodobieństwo trafienia lekkiego materiału wsadowego znajdującego się w komorze roboczej młyna pomiędzy współpracujące ze sobą krawędzie tnące noży jest mniejsze, utrudnione faktem szybkiego odrzucania cząstek nadawy na ścianki komory roboczej siłą odśrodkową, będącą wynikiem pracy wirnika.

W wyniku rozdrobienia porowatych wytłocznin z polipropylenu w młynie nożowym z użyciem sit  $\varnothing$  9 mm uzyskano recyklaty o rozkładzie ziarnowym przedstawionym w tabeli 6.11.



Rys. 6.15. Jednostkowe zużycie energii procesu rozdrabniania wytłocznin z polipropylenu o różnym stopniu porowatości struktury. Próby przeprowadzono z prędkością obwodową noży  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  oraz przy zastosowaniu sit o średnicy otworów  $\varnothing 9 \text{ mm}$

Tabela 6.11. Rozkład uziarnienia dla wytłocznin z polipropylenu o różnej zawartości poroforów, rozdronionych z użyciem sit  $\varnothing 9 \text{ mm}$

Zawartość poroforów, mm								
Klasa ziarnowa mm	wPP lity		wPP 1%		wPP 2%		wPP 4%	
	frakcja % mas.	suma przesiew % mas	frakcja % mas.	suma przesiew % mas	frakcja % mas.	suma przesiew % mas	frakcja % mas.	suma przesiew % mas
O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A	0,10±0,04	0,00	0,40±0,09	0,00	2,10±0,77	0,00	2,70±0,29	0,00
B	12,50±1,56	0,10	17,80±2,37	0,40	14,10±0,30	2,10	15,10±2,20	2,70
C	33,60±0,11	12,60	31,00±0,80	18,20	33,50±1,57	16,20	34,50±1,01	17,80
D	16,20±0,88	46,10	14,60±0,58	49,20	18,10±1,26	49,70	24,50±0,73	52,30
E	23,30±0,35	62,30	22,90±1,43	63,80	24,40±1,23	67,80	13,50±3,49	76,80
F	9,70±0,53	85,60	9,10±1,22	86,70	5,90±1,44	92,20	8,50±0,07	90,30
G	4,70±0,28	95,30	4,20±2,34	95,80	1,90±0,34	98,10	1,20±0,67	98,80
H	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0	0,00	100,0

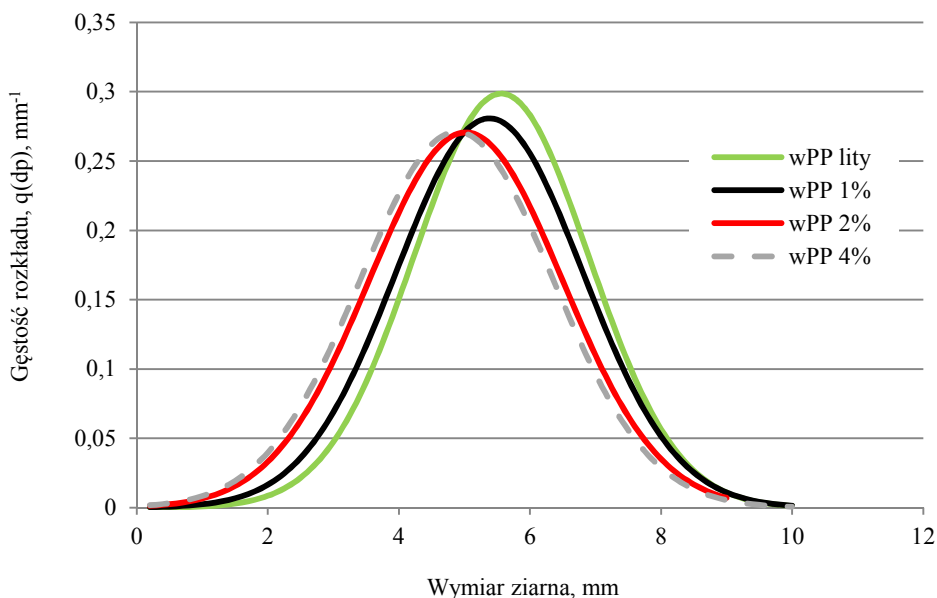
Parametry dopasowania przedstawia tabela 6.12, a sporządzone krzywe gęstości  $q_3(d_p)$  i rozkładu  $Q_3(dp)$  rysunek 6.16. Największą frakcją w rozkładzie uziarnienia wytłocznin z polipropylenu, podobnie jak dla próbek wtryskowych, jest zbiór ziaren o wymiarach od 3,5 do 5 mm (klasa ziarnowa C), stanowiący około 33% całkowitej masy recyklatu. Dodając do tego udział ziaren w klasie ziarnowej od 2 do 3,5 mm (frakcja A), około 50% masy recyklatów wPP mieści się zakresie od 2 do 5 mm. Na podstawie wyników analiz sitowych i siatek ziarnowych rozkładów dwuparametrowych

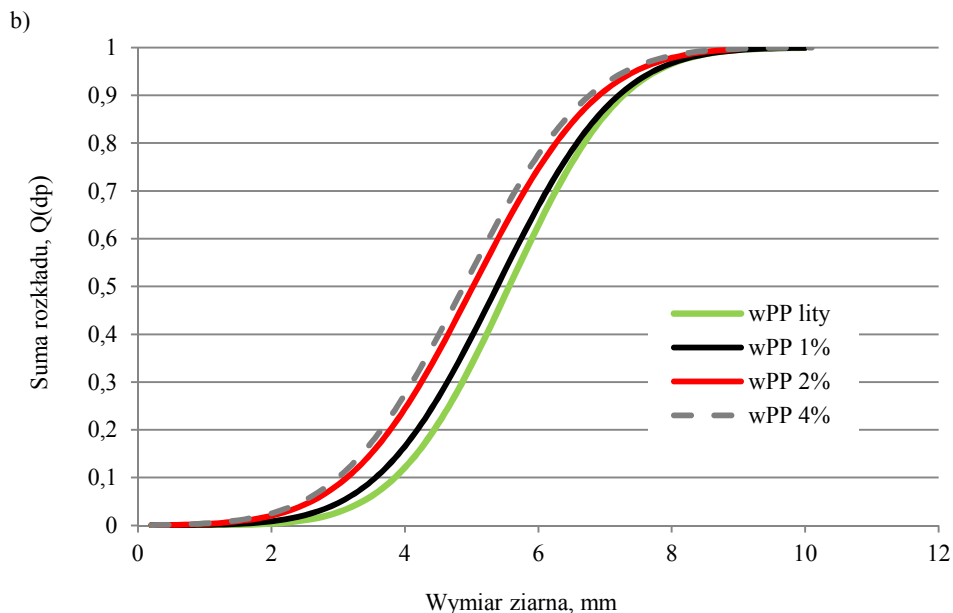
przyjęto, że najbardziej adekwatnym do rozkładów rzeczywistych ziaren jest rozkład normalny. Uzyskane krzywe sumy rozkładu (rys. 6.16b) wskazują, że wraz ze wzrostem zawartości poroforów zmniejsza się stopień rozdrobnienia recyklatów z polipropylenu. Wartość średnicy medialnej  $d_{p50}$  dla recyklatów wPP 4% jest mniejsza o 10% w stosunku do  $d_{p50}$  dla recyklatu polipropylenu litego. Jednocześnie pojawienie się fazy gazowej w PP powoduje większy rozrzut frakcji, o czym świadczy wartość odchylenia standardowego rozkładów (tab. 6.12), a także krzywe gęstości rozkładu, które dla struktur porowatych są spłaszczone w stosunku do polipropylenu litego (rys. 6.16a). Jest to pośredni dowód na zmianę warunków rozdrabniania polipropylenu porowatego, dla którego pory gazowe obniżają udział pęknięcia w podziale materiału.

Tabela 6.12. Parametry i stopień dopasowania rzeczywistych krzywych sumy rozkładu  $Q_3(d_p)$ , przedstawionych na siatkach rozkładu normalnego

Zawartość poroforów, %	Polipropylen				
	$m_c$	$b_c$	R	$d_{50,3}$	$\sigma_c$
wPP 0%	0,7485	4,1642	0,98	5,56	1,34
wPP 1%	0,7038	3,788	0,99	5,38	1,42
wPP 2%	0,6784	3,4069	0,99	5,02	1,47
wPP 4%	0,6795	3,3185	0,99	4,88	1,47

a)





Rys. 6.16. Wpływ udziału poroforów na skład ziarnowy recyklatów wytłoczyn PP: a) krzywe gęstości rozkładu, b) krzywe sumy rozkładu

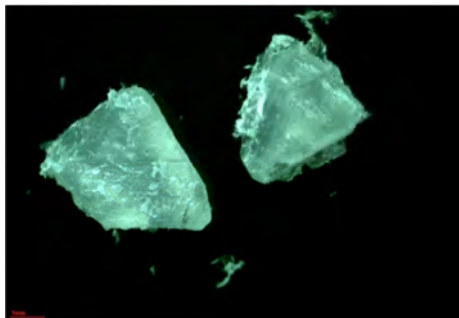
Przeprowadzona analiza obrazu dla wszystkich recyklatów otrzymanych z wytłoczyn PP wskazuje przede wszystkim na nieistotny wpływ stopnia porowatości na wartości współczynnika wydłużenia (tab. 6.13). Wraz ze wzrostem ilości porów w strukturze materiału wartość wskaźnika kształtu  $W_{rp}$  ulega nieznacznemu zmniejszeniu. Podobnie jak w przypadku wPELD, recyklaty wPP 4% charakteryzują się najmniejszymi wymiarami i obwodem, a obydwa analizowane współczynniki wydłużenia i rozwinięcia powierzchni przyjmują dla tych recyklatów najniższe wartości. W porównaniu z rozdrobnionym wPELD wszystkie recyklaty porowatego polipropylenu mają wyższe wartości współczynnika wydłużenia i niższe wartości współczynnika rozwinięcia powierzchni.

Tabela 6.13. Wpływ zawartości poroforów na cechy geometryczne ziaren recyklatów otrzymanych przez rozdrobnienie wytłoczyn PP przy użyciu sit  $\phi$  9 mm

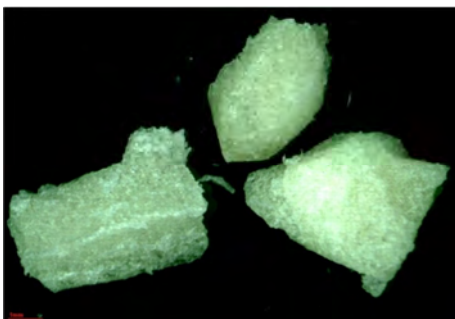
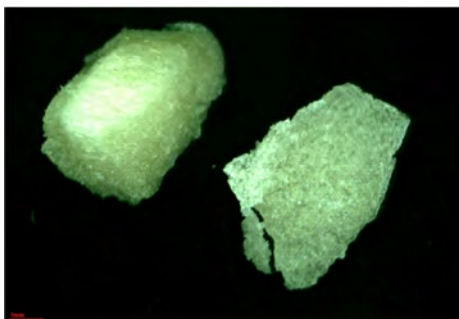
Rodzaj próbek	Powierzchnia S mm <sup>2</sup>	Obwód, P mm	$l_{max}$ mm	$l_{min}$ mm	$W_w$	$W_{rp}$
wPP 0%	20,13±9,6	20,88±5,4	6,68±1,9	4,21±1,1	1,59	21,7
wPP 1%	18,91±9,3	20,48±5,3	6,47±1,6	3,96±1,1	1,64	22,2
wPP 2%	17,44±10,0	19,20±5,5	6,27±1,8	3,68±1,1	1,70	21,1
wPP 4%	17,68±9,5	18,80±4,9	6,19±1,7	3,91±1,1	1,58	20,0

W analizowanym zbiorze dominują ziarna o płaskich powierzchniach, które są wynikiem przecięcia materiału na skutek oddziaływania na materiał wsadowy noży tnących ruchomych i nieruchomych (rys. 6.17).

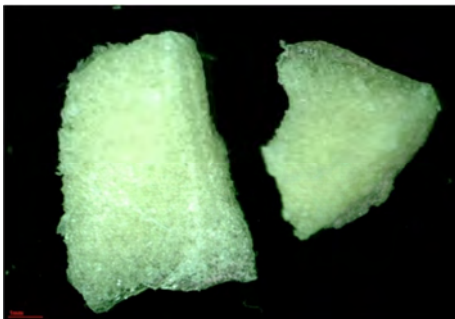
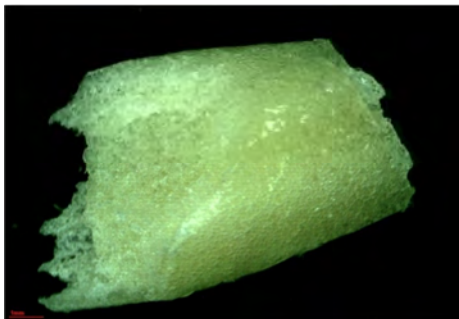
a) wytłoczyna PP o litej strukturze, pozbawionej porów



b) wytłoczyna PP o zawartości poroforów 2,0% mas.



c) wytłoczyna PP o zawartości poroforów 4,0% mas.



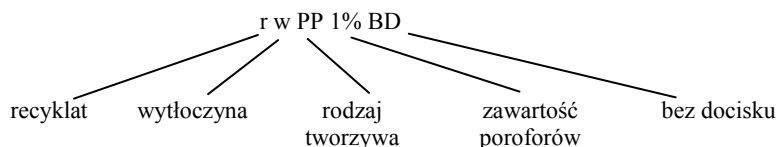
Rys. 6.17. Obrazy projekcyjne ziaren recyklatów wPP o różnej zawartości poroforów; materiał otrzymano z wykorzystaniem sit  $\phi$  9 mm – pow. optyczne  $\times 8$

Dodanie poroforów spowodowało postrzępienie krawędzi przecięcia ziaren, wynikające z dużej ilości porów, zlokalizowanych także w bliskiej odległości od warstwy wierzchniej. W porównaniu z próbkami wtryskowymi, recyklaty powstałe na bazie wytłaczanego polipropylenu zawierają większą ilość porów, co także przekłada się na zmianę barwy powierzchni przecięcia w świetle odbitym mikroskopu. Jednak i w tym przypadku dominuje cięcie w procesie rozdrabniania polietylenu porowatego. Można dostrzec istotny wpływ zawartości poroforów na stan powierzchni przecięcia. W świetle odbitym widać liczniejsze pory o większych wymiarach w części rdzeniowej materiału. Pomimo zmiany struktury tworzywa modyfikowanego poroforem, nie stwierdzono istotnego wpływu tego czynnika na kształt uzyskanych ziaren.

## 7. WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE WYTWORÓW OTRZYMANYCH Z RECYKLATÓW POROWATYCH

### 7.1. STANOWISKA DO WTRYSKIWIANIA I WYTŁACZANIA RECYKLATÓW

Do uzyskania wytworów użyto recyklatów otrzymanych w wyniku rozdrobniania, które ze względu na większą czytelność i wnioskowanie oznaczono według schematu przedstawionego na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Schemat oznaczania recyklatów zastosowany w badaniach

Do leja zasypowego wtryskarki wprowadzono rozdrobnione materiały porowate bez oddzielania frakcji pylistej oraz największych ziaren. Celem było zweryfikowanie znaczenia krzywych rozkładu uziarnienia w kolejnym przetwórstwie. Przykładowe obrazy materiału wejściowego przedstawiono na rysunku 7.2.



Rys. 7.2. Obraz recyklatów: a) polietylen o strukturze litej, b) polietylen porowaty

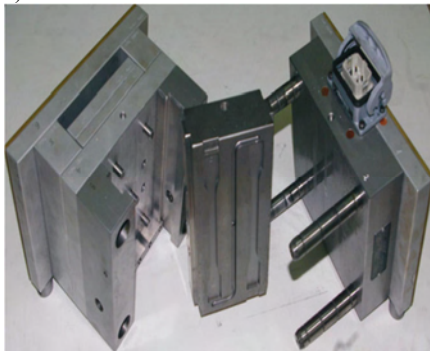
Do wytworzenia wyprasek wykorzystano wszystkie otrzymane w procesie rozdrabniania rodzaje recyklatów, również te uzyskane z porowatych i litych materiałów wytłoczonych. Uznano bowiem, że faza gazowa pozostająca w rozdrobnionych materiałach w postaci porów zamkniętych ułatwi płynięcie tworzywa we wtórnym procesie wtryskiwania. Do wykonania próbek z porowatych recyklatów tworzyw termoplastycznych PEŁD i PP zastosowano wtryskarkę laboratoryjną Battenfeld 350 Plus o sile zamknięcia 350 kN (rys. 7.3a). Jako narzędzia przetwórczego użyto modułowej, laboratoryjnej formy badawczej wyposażonej w dwa gniazda formujące i system przepływowy, gorąco kanałowy firmy HASCO (rys. 7.3b). Dzięki temu zaistniała możliwość dodatkowego sterowania temperaturą tworzywa wpływającego do gniazda formy [143].



a)



b)



Rys. 7.3. Stanowisko do wykonania próbek z recyklatów porowatych: a) wtryskarka Battenfeld 350 Plus, b) modułowa forma 2-gniazdowa do wytwarzania próbek badawczych z systemem gorąco kanałowym (UTP Bydgoszcz)

Wybrane rodzaje recyklatów przetworzono metodą wytłaczania, wykorzystując do tego celu plastograf Brabendera w firmie PROLAB we Włocławku (rys. 7.4). W ten sposób nie tylko otrzymano nowe wytłoczyny, ale także oznaczono wytłaczalność wykorzystanych recyklatów. Badanie przeprowadzono w wytłaczarce jednoślismakowej firmy Brabender o średnicy ślimaka  $\varnothing 19$  mm i stopniu sprężania 3:1, wyposażonej w trzy strefy grzewcze i głowicę o wymiarach ustnika  $20 \times 3$  mm. Uzyskiwano wytłocznę w postaci wstęgi, której wymiary przekroju były wypadkową relacji prędkości wytłaczania i prędkości odciążu. W trakcie badań zmieniano prędkość obrotową ślimaka oraz temperaturę w głowicy i w poszczególnych strefach układu uplastyczniającego, co skutkowało zmianą ciśnienia przetwarzania. Otrzymało dzięki temu znacznie szerszy obraz dotyczący przetwarzalności recyklatów porowatych, zwłaszcza w obszarze oceny wpływu stopnia rozdrobnienia na ich podatność do wtórnego porowania i tworzenia wtórnej struktury porowatej.

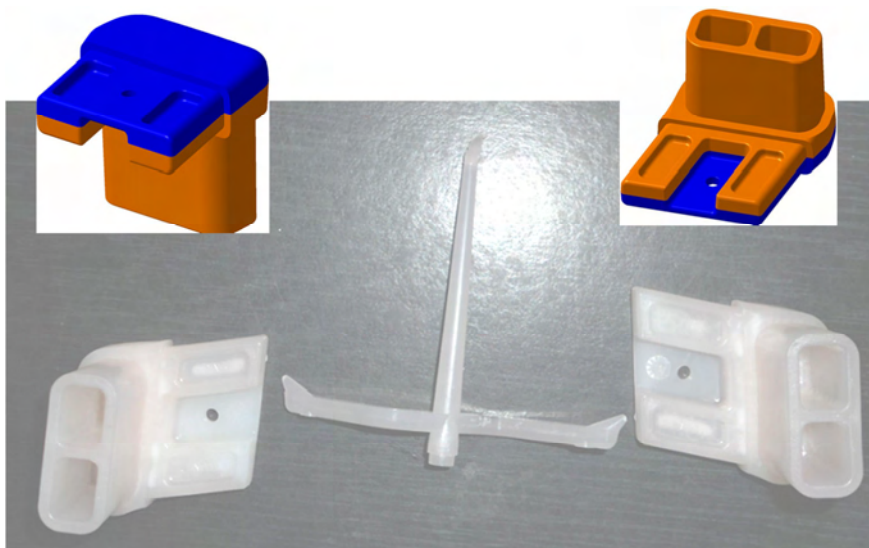


Rys. 7.4. Plastograf Brabendera użyty do wytłaczania recyklatów porowatych – Prolab Włocławek



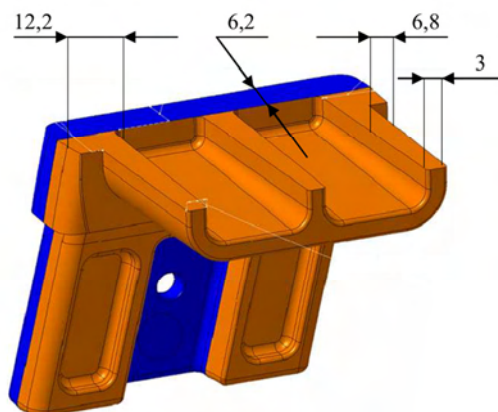
Poza wytworzeniem wstęgi tworzywa wtórnego, zarejestrowano zmiany momentu obrotowego i ciśnienia na wejściu do głowicy wylączarskiej w czasie rzeczywistym.

W celu weryfikacji wyników uzyskanych w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono dodatkowy eksperyment w firmie Graform w Bydgoszczy. Badanie polegało na ponownym wykorzystaniu recyklatów porowatego i litego polipropylenu w procesie wtryskiwania, z użyciem formy przemysłowej. Kryterium doboru odpowiedniego narzędzia przetwórczego było uzyskanie wypraski grubościennej, zawierającej elementy wzmacniające o zmiennej grubości ścianki. Podatność takich wyprasek na wystąpienie typowych błędów technologicznych wynikających z anizotropii skurczowej (zapadnięcia i deformacje) rośnie wraz ze zwiększaniem grubości ich ścianek. Założeniem tej części eksperymentu było zbadanie jakości wytworów uzyskanych z porowatych recyklatów w odniesieniu do dotychczas prowadzonej produkcji przy wykorzystaniu litego, oryginalnego granulatu. Spodziewano się, że pozostające w recyklicie pory gazowe i nie przereagowane porofory osłabiają lub zlikwidują występujące na powierzchni wyprasek zapadnięcia. Użyto formy 2-gniazdowej, w której produkowano seryjnie dla branży motoryzacyjnej wytwory grubościenne pokazane na rysunku 7.5.



Rys. 7.5. Model i wypraski rzeczywiste wykorzystane w badaniach weryfikujących

Wypraski wykonywane w cyklu produkcyjnym z poliamidu 6 lub z polipropylenu miały objętość  $22,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  i zmienną grubość ścian w zakresie od 3 do 12,2 mm (rys. 7.6). Pod względem technologiczności konstrukcji wytwór miał szereg niekorzystnych cech geometrycznych, przede wszystkim zróżnicowanie grubości ścianek, co w konsekwencji prowadziło do anizotropii skurczowej i wad powierzchniowych. Liczne zapadnięcia na powierzchni oraz niejednorodność wymiarowa wyprasek były przyczyną nadmiernej ilości wytworów, nie spełniających wymogów kontroli jakości. W celu uniknięcia pogorszenia jakości tych elementów wydłużono czas trwania fazy docisku, a tym samym zwiększeniu uległ czas cyklu, co spowodowało zmniejszenie wydajności procesu ich wytwarzania.



Rys. 7.6. Przekrój wypraski z uwzględnieniem zmiennej grubości ścianek

Do wykonania wtórnych prób wtryskowych wykorzystano hydrauliczną wtryskarkę Krauss Maffei 50 CX (rys. 7.7) o sile zamykania 500 kN.



Rys. 7.7. Widok hali technologicznej wraz z modelem użytej wtryskarki Krauss Maffei 50 CX, na której przeprowadzono eksperyment w warunkach przemysłowych (Graform Bydgoszcz)

Zapewniono ponadto kontrolowalne warunki chłodzenia formy wtryskowej za pomocą układu termostatującego Temprow plusC firmy Wittmann Battenfeld. Przed procesem wtryskiwania recyklaty suszono w temperaturze 40°C w suszarce CKT 25 firmy KOCH. Celem tego zabiegu było wyeliminowanie z recyklatów wilgoci powierzchniowej, która mogła się pojawić w materiale w trakcie jego transportu i przechowywania. Pomimo że tworzywa poliolefinowe są hydrofobowe, uznano, że w celu poprawnego przeprowadzenia eksperymentu należy wyeliminować wszelkie czynniki zakłócające późniejsze wnioskowanie.

## 7.2. PARAMETRY PROCESÓW PRZETWÓRSTWA RECYKLATÓW

### 7.2.1. Proces wtryskiwania

#### **Przetwórstwo recyklatów PELD pochodzących z rozdrobnienia próbek wtryskiwanych i wytłaczanych**

Jeden z rodzajów recyklatów o zawartości 2% mas. poroforu wykonano bez zastosowania fazy docisku (oznaczenie rPELD 2% BD). Proces wtryskiwania realizowano przy innych parametrach dla recyklatów pochodzących z próbek wtryskiwanych i wytłaczanych. Dla materiału pochodzącego z wyprasek uzyskanych w pierwotnym przetwórstwie, nastawy procesu wtryskiwania wtórnego wynosiły: a) temperatura uplastyczniania w poszczególnych strefach wtryskarki: w dyszy – 180°C, strefa III – 180°C, strefa II – 180°C, strefa I – 175°C; b) ciśnienie wtryskiwania – 80 MPa, c) ciśnienie docisku – 67 MPa, d) czas wtrysku – 6 s, e) czas docisku – 35 s, f) czas chłodzenia – 40 s.

Dla recyklatów otrzymanych z wyłoczyn porowatych, proces wtórnego wtryskiwania zrealizowano przy następujących parametrach: a) temperatura uplastyczniania w poszczególnych strefach wtryskarki: w dyszy – 190°C, strefa III – 195°C, strefa II – 195°C, strefa I – 190°C; b) ciśnienie wtryskiwania – 75 MPa, c) ciśnienie docisku – 60 MPa, d) czas wtrysku – 6 s, e) czas docisku – 35 s, f) czas chłodzenia – 65 s.

Dla próbek kształtowanych bez docisku ciśnienie wtryskiwania wyniosło 75 MPa, a pozostałe nastawy były takie same jak opisane powyżej.

#### **Przetwórstwo recyklatów z polipropylenu, otrzymanych przez rozdrobnienie próbek wtryskiwanych i wytłaczanych**

Dla wszystkich recyklatów polipropylenowych zastosowano te same parametry procesu wtryskiwania: a) temperatura uplastyczniania w poszczególnych strefach wtryskarki: dysza – 245°C, strefa III – 240°C, strefa II – 240°C, strefa I – 230°C; b) ciśnienie wtryskiwania – 86 MPa, c) ciśnienie docisku – 90 MPa (pierwszy stopień) i 92 MPa (drugi stopień), d) czas wtrysku – 2,5 s, e) czas docisku – 30 s (15 s+15 s), f) czas chłodzenia – 60 s.

#### **Przetwórstwo recyklatów otrzymanych z rozdrobnienia wytworów PELD porowanych fizycznie**

Przetworzono dwa recyklaty, będące produktem rozdrobnienia wytworów o strukturze gazowo-polimerowej ukształtowanych w procesie wytłaczania PELD przez porowanie gazem. Z uwagi na małą wartość gęstości nasypowej największe trudności w tym przypadku sprawiało dozowanie recyklatu do układu uplastyczniającego. Zastosowano ręczny sposób sterowania fazą dozowania. Aby zminimalizować rozrzut resztkowej pozostałości stopionego tworzywa na czole ślimaka (tzw. poduszka resztkowa) zastosowano przeciwcisnienie 5 MPa. Pozostałe parametry procesu ustalono na następującym poziomie: a) temperatura uplastyczniania w poszczególnych strefach wtryskarki: dysza – 245°C, strefa III – 245°C, strefa II – 245°C, strefa I – 245°C; b) ciśnienie wtryskiwania – 88 MPa, c) ciśnienie docisku – 88 MPa, d) czas wtrysku – 6 s, e) czas docisku – 25 s, f) czas chłodzenia – 65 s. Przyjęte rozwiązania dla tej grupy materiałów należy traktować jako propozycję wstępną, wymagającą rozwinięcia w dalszych pracach nad zagospodarowaniem termoplastów odpadowych o bardzo małej gęstości. Założono, że wiedza zdobyta w zakresie recyklingu mechanicznego tworzyw porowatych jest wystarczająca do

przeprowadzenia procesu recykulacji odpadów termoplastów porowatych o gęstości poniżej  $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , w wyniku którego można otrzymać pełnowartościowy wytwór.

### 7.2.2. Proces wytłaczania

Badania wytłaczania realizowano przy zmiennej prędkości obrotowej ślimaka wynoszącej: 45, 60, 120  $\text{obr} \cdot \text{min}^{-1}$  oraz zmiennym rozkładzie temperatury w strefie uplastyczniania (tab. 7.1).

Tabela 7.1. Parametry wytłaczania stosowane w trakcie badań

Rodzaj tworzywa	Nr próby	Rodzaj próbki	Prędkość obrotowa ślimaka, $\text{obr} \cdot \text{min}^{-1}$	Temperatury uplastyczniania			Temperatura głowicy, $^{\circ}\text{C}$
				I strefa, $^{\circ}\text{C}$	II strefa, $^{\circ}\text{C}$	III strefa, $^{\circ}\text{C}$	
PELD	1	rwPELD 0%	45	99	175	175	150
	2	rwPELD 0%	60	99	175	175	150
	3	rwPELD 0%	120	99	175	175	150
	4	rwPELD 2%	45	99	175	175	150
	5	rwPELD 2%	60	99	175	175	150
	6	rwPELD 2%	120	99	175	175	150
	7	rwPELD 4%	45	99	175	175	150
	8	rwPELD 4%	60	99	175	175	150
	9	rwPELD 4%	120	99	175	175	150
	10	rwPELD 4%	45	200	200	200	205
	11	rwPELD 4%	120	200	200	200	205
PP	12	rwPP 2%	45	230	230	230	235
	13	rwPP 2%	120	230	230	230	235

Do badań wykorzystano recyklaty porowatych tworzyw poliolefinowych o największym udziale fazy gazowej. Przyjęte parametry wynikały z przeprowadzonej analizy własnej i próby optymalizacji warunków przetwórczych ze względu na uzyskanie materiału o dużej gęstości. Na tej podstawie opracowano program badań, w którym wielkościami zmiennymi procesu wytłaczania recyklatów porowatych była temperatura uplastyczniania i prędkość obrotowa ślimaka w układzie uplastyczniającym.

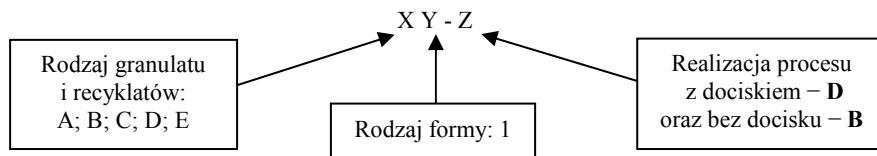
### 7.2.3. Parametry procesu wtryskiwania zrealizowanego w warunkach przemysłowych

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem polipropylenu, zarówno pochodzącego z recyklingu jak i oryginalnego tworzywa pod nazwą handlową BC 612 WG firmy Borealis. Temperaturę termostatowania formy wtryskowej ustalono na poziomie  $18^{\circ}\text{C}$ , a pozostałe nastawy procesowe przedstawiono w tabeli 7.2. Podobnie jak w próbach laboratoryjnych, zrealizowano także próby wtryskiwania bez docisku, co wynikało z przekonania, że wyeliminowanie ciśnienia zewnętrznego z gniazda formy w trakcie krzepnięcia stopu tworzywa pozwoli na intensywniejsze wyporowanie poroforów zawartych w recyklatach, które nie zostały uwolnione podczas pierwszej obróbki termicznej w trakcie wytwarzania próbek do cięcia i rozdrabniania. Dla wytworów grubościennych procesy te powinny zachodzić z większą intensywnością.

Tabela 7.2. Parametry procesu wtryskiwania przyjęte w próbach wtórnego wtryskiwania polipropylenu

Rodzaj parametru	Forma do produkcji wypraski grubościennnej
Profil temperaturowy uplastyczniania, °C	215-210-210-205-205
Ciśnienie wtryskiwania, MPa	120
Droga wtryskiwania, mm	20-100-1
Pozycja przełączenia, mm	20
Ciśnienie docisku, MPa	100
Czas docisku, s	12
Czas chłodzenia, s	25
Wielkość poduszki resztkowej, mm	6,2
Czas plastyfikacji, s	14,3

Dla wyprasek uzyskanych w warunkach przemysłowych zmodernizowano przyjęty w rozdziale 4 sposób oznaczania (rys. 7.8).



Rys. 7.8. Sposób oznaczania próbek otrzymanych z materiałów wtórnych

Pierwsza litera oznacza rodzaj materiału, z jakiego wykonano próbki, cyfra – rodzaj formy, natomiast litera B – wypraskę wykonaną bez użycia fazy docisku, a D – z realizacją fazy docisku. Oznaczenie materiałów użytych do badań było następujące: A – PP oryginalny firmy Borealis, B – recyklat litego PP Moplen HP 548 R, C – recyklat PP zawierający 2% mas. poroforów Hydrocerol CF 40, D – recyklat wPP 0%, E – recyklat wPP 2% – zawiera środek porujący Expancel 095 MBX 120.

### 7.3. STANOWISKA BADAWCZE DO OCENY WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH WYTWORÓW OTRZYMANYCH Z RECYKLATÓW

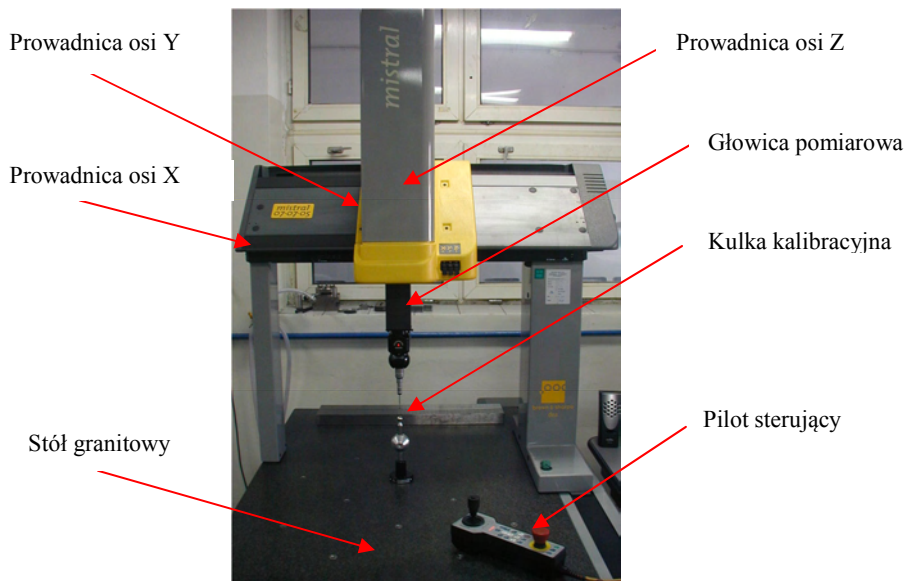
Badania materiałowe przeprowadzono z wykorzystaniem aparatury badawczej, będącej na wyposażeniu Zakładu Przetwórstwa i Recyklingu Tworzyw WIM UTP w Bydgoszczy oraz w Zakładzie Technologii Polimerów WTiCh UTP w Bydgoszczy.

Zakres badań obejmował:

- oznaczenie gęstości,
- określenie stopnia krystaliczności,
- oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie i modułu Younga w próbie statycznego rozciągania,
- wykonanie prób oznaczania udarności metodą Charpy'ego oraz w próbie udarowego rozciągania,
- oznaczenia twardości metodami wciskania kulki i Shore'a.

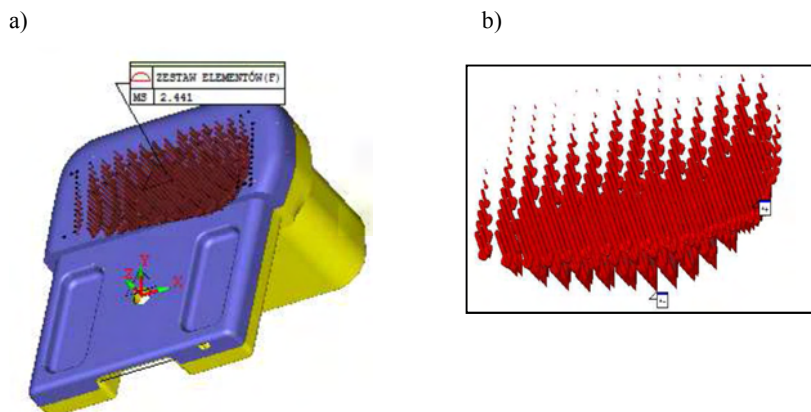
Badania materiałowe dotyczące laboratoryjnych próbek wtryskowych zrealizowano zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 4 niniejszej pracy, przy wykorzystaniu tych samych stanowisk badawczych i w oparciu o zaproponowaną w rozdziale 4 metodykę. Dotyczy to także badania gęstości i twardości, dla których miejsca pobrania próbek czy też miejsca przyłożenia kulki pomiarowej w próbie twardości były zgodne z rysunkami 4.3 i 4.8 zawartymi w rozdziale 4.

Dodatkowo, wypraski uzyskane z tworzyw wtórnych w warunkach eksperymentu przemysłowego poddano badaniom struktury i stanu powierzchni przy użyciu urządzeń pomiarowych firmy Graform z Bydgoszczy. Pomiary liniowe przeprowadzono na maszynie współrzędnościowej Mistral do pomiarów 3D z dokładnością do 0,001 mm (rys. 7.9).



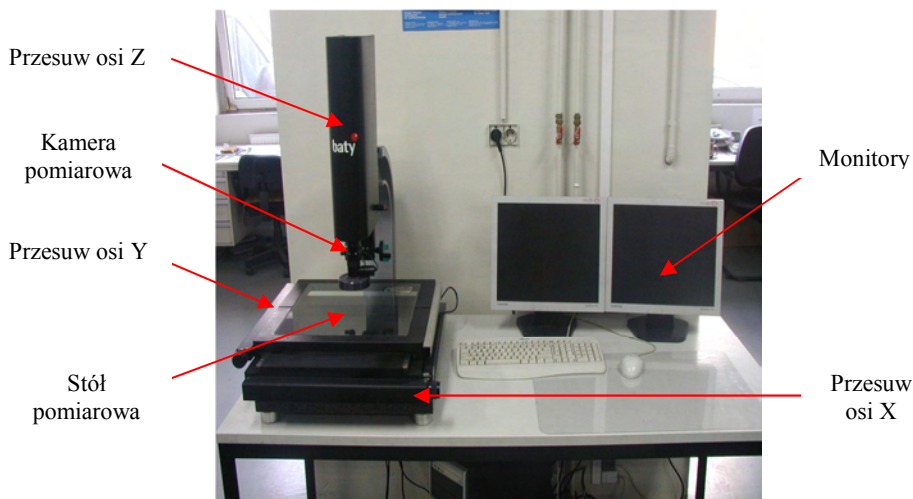
Rys. 7.9. Maszyna pomiarowa Mistral (Graform Bydgoszcz)

Z użyciem maszyny pomiarowej Mistral wykonano pomiary wielkości zapadnięć wyprasek. Wyniki przedstawiono graficznie w postaci dwóch rodzajów rysunków. Wartość zapadnięć na powierzchni wypraski w ujęciu przestrzennym przedstawia rysunku 7.10a. Wartość odchyłek, będących różnicą pomiędzy pomiarami przeprowadzonymi w danym punkcie na powierzchni rzeczywistej wypraski a idealnie płaską powierzchnią utworzoną w modelu 3D, przedstawiono graficznie w postaci strzałek. Daje to w efekcie rozkład wielkości zapadnięć na całej powierzchni wytworu (rys. 7.10b).



Rys. 7.10. Przykładowe wyniki pomiarów deformacji powierzchniowej wypraski, zrealizowane na maszynie współrzędnościowej Mistral 3D: a) wielkość zapadnięcia, b) rozkład wartości zapadnięcia na powierzchni wypraski odniesiony do modelu 3D

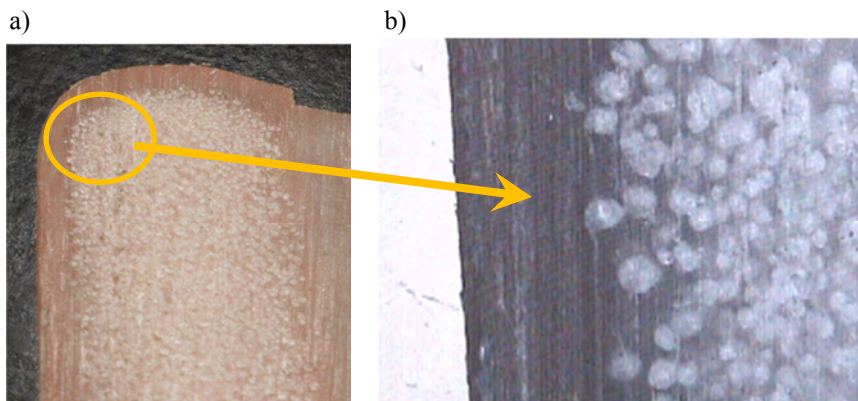
Intensywność koloru czerwonego jest tym większa, im istotniejsza jest różnica pomiędzy wskazaniem rzeczywistym a powierzchnią odniesienia w modelu 3D. W ten sposób można także oszacować wielkość skurczu przetwórczego. Siatka pomiarowa użyta do wykonania pomiarów wynosiła 3 mm. W badaniach wyprasek wykonanych w warunkach przemysłowych użyto także mikroskopu pomiarowego Venture xl 3030 3d z oprogramowaniem Aberlink 3D (rys. 7.11).



Rys. 7.11. Stanowisko pomiarowe Venture xl 3030 3D (Graform Bydgoszcz)

Stanowisko pomiarowe posłużyło do zarejestrowania i analizy obrazów strukturalnych wyprasek wykonanych z polipropylenu. Powiększenie użyte do wykonania i analizy obrazów struktury wynosiło 40 razy. Na rysunku 7.12 przedstawiono porównanie rzeczywistego wyglądu wypraski w warunkach obserwacji okiem nieuzbrojonym z obrazem struktury, uzyskany dzięki zastosowaniu mikroskopu pomiarowego.





Rys. 7.12. Przykładowe obrazy przekroju porowatej wypraski grubościennnej: a) obraz rzeczywisty, b) struktura wycinka przekroju zarejestrowana przy pomocy mikroskopu pomiarowego pow. optyczne x40

Do pomiaru masy i określania gęstości wyprasek wtórnych i wycieków otrzymanych w plastografii Brabendera użyto wagi laboratoryjnej Mettler Toledo XS205 wraz z przystawką do pomiaru gęstości. Z wycieków, uzyskanej w ustabilizowanych warunkach przetwórczych (stała wartość momentu obrotowego i ciśnienia), wybierano pięć odcinków pomiarowych i oznaczano ich gęstość oraz cechy wytrzymałościowe.

#### 7.4. WYNIKI BADAŃ MATERIAŁOWYCH DLA WYPRASEK OTRZYMANYCH Z RECYKLATÓW

##### 7.4.1. Gęstość

Podsumowanie otrzymanych wartości gęstości próbek wtryskowych wykonanych z recyklatów polietylenu i polipropylenu przedstawiono w tabelach 7.3 i 7.4. Analiza wyników zamieszczonych w tabeli 7.3. wskazuje, że dla recyklatów otrzymanych z porowatych wyprasek tworzyw poliolefinowych wtórne przetwórstwo metodą wtryskiwania likwiduje większość elementów struktury porowatej, powstałej w pierwotnym przetwórstwie wskutek rozkładu poroforów. Przeprowadzone dla próbek rPELD 1,5% próby wtryskiwania z wyłączoną fazą docisku wskazują, że istnieje możliwość sterowania ilością porów, które potencjalnie mogą pozostać w wytworze wtórnym. Stwierdzono ponadto, że wypraski te były pozbawione typowych wad, jakie można zaobserwować na powierzchni wytworów otrzymanych w cyklu wtryskowym bez działającego prawidłowo docisku. Można zatem uznać, że pory gazowe i nieprzereagowane porofory zachowują się we wtórnym przetwórstwie jak ciśnienie docisku, ale działające na warstwę wierzchnią od wewnątrz, powodując powstanie wytworów bez zapadnięć na powierzchni.



Tabela 7.3. Gęstość wyprasek otrzymanych z porowatych recyklatów wyprasek

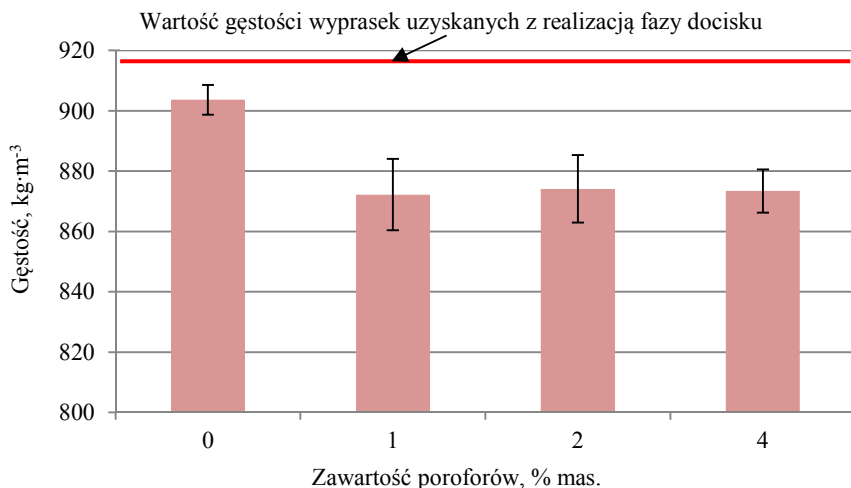
Rodzaj tworzywa	Rodzaj próbki, ilość porofora	Gęstość materiału, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ Punkty pomiarowe (oznaczenie zgodnie z rys. 4.3, rozdział 4)			Gęstość średnia, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
		A	B	C	
rPELD	rPELD 0%	912±1	913±2	911±1	911±2
	rPELD 0,5%	915±2	912±3	912±2	913±2
	rPELD 0,5% BD	912±1	914±1	914±2	913±1
	rPELD 1,5%	914±3	911±2	913±1	913±3
	rPELD 1,5% BD	882±3	888±2	878±1	883±10
	rPELD 2%	911±2	912±2	911±1	911±2
	rPELD 2% BD	915±1	916±2	915±2	915±2
rPP	rPP 0%	904±3	901±2	897±3	901±7
	rPP 1%	904±2	904±1	898±4	902±6
	rPP 2%	906±2	905±2	905±5	905±3
	rPP 2% BD	903±2	902±4	896±3	900±7

Tabela 7.4. Gęstość wyprasek uzyskanych z recyklatów wytłocznyn

Rodzaj tworzywa	Rodzaj próbki, ilość poroforów	Gęstość średnia, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
rwPELD	rwPELD 0%	914±14
	rwPELD 1%	916±16
	rPELD 2%	916±16
	rPELD 4%	917±15
	rxPELD	922±10
	rwPELD 0% BD	904±5
	rwPELD 1% BD	872±12
	rPELD 2% BD	874±11
	rPELD 4% BD	873±7
rwPP	rwPP 0%	899±1
	rwPP 1%	897±3
	rwPP 2%	894±5
	rwPP 4%	891±3

Potwierdzeniem takiego zachowania się materiału porowatego są wyniki gęstości dla wyprasek uzyskanych z recyklatów wytłocznyn PELD. Na podstawie zamieszczonych w rozdziale 4 wyników wiadomo, że były to materiały o znacznie zredukowanej gęstości w stosunku do litego PELD. Po rozdrobnieniu, które odbyło się przez cięcie, większość z tych licznych porów zachowała się w ziarnach recyklatów. Jednak w trakcie wtórnego przetwórstwa struktura ta została zniszczona, głównie przez oddziaływanie na stopiony materiał zewnętrznego, wysokiego ciśnienia faz wtrysku i docisku. Wyłączenie ciśnienia docisku spowodowało efekt wtórnego porowania, o czym świad-

czy wartość gęstości (rys. 7.13). Struktura porowata została zachowana w rdzeniu wyprasek i zapobiegła powstaniu zapadnięcia na powierzchni. W standardowym wtryskiwaniu poliolefin niemodyfikowanych, dla takiej grubości próbek, wyłączenie fazy docisku spowodowałoby powstanie zapadnięć na skutek skurczu pierwotnego tych tworzyw.



Rys. 7.13. Gęstość wyprasek wtryskowych uzyskanych z recyklatów wytłocznyn PELD

Jednocześnie można zauważyć, że recyklaty lekkich tworzyw piankowych, wytworzonych przez porowanie fizyczne (rxPE) udało się ponownie przetworzyć standardową metodą wtryskiwania. Uzyskano wypraski o wartości gęstości wskazującej na intensywne zagęszczenie ich struktury do poziomu charakterystycznego dla tworzywa litego. W przypadku rxPE uzyskano wypraski o gęstości około 30-krotnie większej niż materiał wejściowy. Może to oznaczać możliwość zagospodarowania lekkich struktur porowatych, wykorzystując do tego celu wtryskarki o zmodyfikowanych konstrukcjach układów uplastyczniającego i zasypowego. W tych przypadkach istotnym czynnikiem pozwalającym na uzyskanie tak dużego zagęszczenia makrocząsteczek było oddziaływanie wysokiego ciśnienia wtrysku i docisku oraz zrealizowanie specjalnego programu dozowania recyklatów do układu uplastyczniającego.

#### 7.4.2. Zawartość fazy krystalicznej

Oszacowane w badaniu DSC wartości stopnia krystaliczności zestawiono w tabeli 7.5. Temperatura topnienia ( $T_i$ ) (II przebieg) badanych materiałów nieznacznie ulega zmianie i wynosi ok. 105°C. Jedynie w przypadku próbki oznaczonej symbolem rxPE, temperatura topnienia jest wyższa – 113,7°C. Dla tej próbki również temperatura krystalizacji  $T_k$  jest wyższa i wynosi 98°C. W przypadku pozostałych badanych materiałów  $T_k$  wzrasta w porównaniu z materiałem niemodyfikowanym. W odniesieniu do próbki niemodyfikowanej ( $T_k = 87,2^\circ\text{C}$ ) największy wzrost wartości  $T_k$  (o 3,4°C) zaobserwowano dla próbki rPE 2%.

Stwierdzono niewielkie zmiany w udziale fazy krystalicznej. Dla PELD niemodyfikowanego i jego recyklatu zawartość fazy krystalicznej wynosi ok. 26% (uwzględniając, że entalpia topnienia materiału o 100% krystaliczności wynosi 290 J·g<sup>-1</sup>). Próbką

rxPE jest materiałem o innych właściwościach cieplnych niż wyjściowy PELD. Jego temperatura topnienia i krystalizacji jest znacząco wyższa niż niemodyfikowanego polietylenu małej gęstości, a ponadto w strukturze większy udział ma faza krystaliczna.

Tabela 7.5. Zestawienie wyników badań DSC dla próbek uzyskanych z recyklatów PELD

Nazwa próbki	I przebieg				II przebieg			
	$T_t$ (°C)	A (J·g <sup>-1</sup> )	$T_k$ (°C)	K (100%- 290 J·g <sup>-1</sup> )	$T_t$ (°C)	A (J·g <sup>-1</sup> )	$T_k$ (°C)	K (100%- 290 J·g <sup>-1</sup> )
rPE 0%	106,2	76,38	88,7	26,3	104,5	77,33	88,6	26,7
rPE 0,5%	107,2	74,94	89,6	25,8	105	77,16	89,6	26,6
rPE 1,5%	107,2	77,58	88,9	26,8	104,8	78,16	88,9	27,0
rPE 2%	106,2	81,29	90,6	28,0	105	76,51	90,8	26,4
rPE 2% BD	106,3	74,67	89,8	25,7	105,1	73,79	89,8	25,4
rxPE	116,3	96,98	98	33,4	113,7	94,4	98,1	32,6

Zestawienie wyników stopnia krystaliczności wytworów z recyklatów PP przedstawiono w tabeli 7.6. Recyrkulowany polipropylen ma niższą temperaturę topnienia i krystalizacji niż pierwotny PP (por. tab. 4.5), co związane może być z procesem recyklingu. Proces rozdrabniania mógł spowodować zmniejszenie ciężaru cząsteczkowego polimeru z jednoczesnym rozgałęzieniem jego łańcucha. Także zawartość fazy krystalicznej w recyklicie litego PP jest niższa niż w pierwotnym PP. Dodatek poroforów w ilości 2% (próbka oznaczona rPP 2% BD) spowodował niewielki wzrost temperatury topnienia i krystalizacji recyklatu w stosunku do próbki niemodyfikowanej. Zawartość fazy krystalicznej w modyfikowanych próbkach jest nieznacznie mniejsza niż w próbce PP otrzymanej z oryginalnego granulatu (por. tab. 4.5). Wyniki oznaczania stopnia krystaliczności wytlóczyn z rwPE zawarto w tabeli 7.7.

Tabela 7.6. Zestawienie wyników badań dla próbek otrzymanych z recyklatów PP

Nazwa próbki	I przebieg				II przebieg			
	$T_t$ (°C)	A (J·g <sup>-1</sup> )	$T_k$ (°C)	K (100%- 290 J·g <sup>-1</sup> )	$T_t$ (°C)	A (J·g <sup>-1</sup> )	$T_k$ (°C)	K (100%- 290 J·g <sup>-1</sup> )
rPP 0%	166,7	78,55	117,3	39,7	163,3	83,85	117,2	42,3
rPP 2%BD	166,3	83,13	122,1	42,0	164,7	89,46	122,2	45,2

Tabela 7.7. Zestawienie wyników badań dla próbek otrzymanych z recyklatów wytłocznin PELD

Nazwa próbki	I przebieg				II przebieg			
	$T_i$ (°C)	A (J·g <sup>-1</sup> )	$T_k$ (°C)	K (100%-290 J·g <sup>-1</sup> )	$T_i$ (°C)	A (J·g <sup>-1</sup> )	$T_k$ (°C)	K (100%-290 J·g <sup>-1</sup> )
rwPE 0%	113,2	99,95	97,1	34,5	113,2	96,57	97,2	33,0
rwPE 4%	112,9	95,47	98,2	32,9	112,2	98,73	98,2	33,7

Dla próbek wytłaczanych oznaczonych rwPE 4%  $T_i$  jest niższa niż w przypadku materiału podstawowego. Stopień krystaliczności wyprasek uzyskanych z wytłocznin porowatego PELD jest wyższy niż litego materiału i jego recyklatów.

### 7.4.3. Wytrzymałość na rozciąganie

Wyniki uzyskane dla próbek wykonanych z recyklatów wtryskowych polietylenu małej gęstości przedstawiono w tabeli 7.8. Stwierdzono, że wtórne przetwórstwo metodą wtryskiwania rozdrobnionych, porowatych wyprasek pozwala na uzyskanie materiału o zbliżonych do litego, pierwotnego tworzywa właściwościach wytrzymałościowych.

Jednocześnie można zauważyć, że wraz ze wzrostem zawartości poroforów wytworzonych w pierwotnym procesie przetwórczym wytwory uzyskane z tych materiałów charakteryzują się wyższą wartością współczynnika sprężystości wzdłużnej i mniejszą odkształcalnością. Dotyczy to zwłaszcza próbek uzyskanych z recyklatów rPELD 2%. Oznacza to, że ponowne przetwórstwo recyklatów tworzyw o największym udziale poroforów powoduje zauważalne zmiany właściwości wytrzymałościowych. Stwierdzono także, że wartość  $R_m$  jest większa niż dla próbek przygotowanych do procesu cięcia (por. tab. 4.7).

Tabela 7.8. Wpływ zawartości poroforów na właściwości wytrzymałościowe wyprasek otrzymanych z recyklatów porowatych wyprasek PELD

Rodzaj materiału	Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Moduł Younga, MPa	Odształcenie względne, %
rPELD 0%	9,13±0,1	89,8±2,1	123,3±9,8
rPELD 0,5%	9,04±0,1	90,2±0,8	127,7±4,1
rPELD 1%	9,03±0,1	90,1±0,5	125,8±5,2
rPELD 1,5%	9,03±0,1	90,3±2,8	124,6±6,5
rPELD 2%	8,93±0,1	99,9±4,0	108,6±3,7
rPELD 2% BD	8,67±0,1	95,5±1,7	118,5±9,7

Charakter przebiegu krzywych wytrzymałościowych  $\sigma(\epsilon)$  jest bardzo podobny dla wszystkich próbek i nie różni się od przebiegów  $\sigma(\epsilon)$  zarejestrowanych dla próbek modyfikowanych poroforami (por. rys. 4.12).

Zagospodarowanie rozdrobnionych, porowatych wytłocznin z PELD we wtórnym procesie wtryskiwania okazało się interesującą propozycją ponownego wykorzystania odpadów. To przekonanie opiera się na analizie wyników otrzymanych w próbie statycznego rozciągania (tab. 7.9) Zarówno wytrzymałość  $R_m$ , jak i moduł Younga jest na znacznie wyższym poziomie w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla rPELD (por.

tab. 7.8.). Po wtórnym przetwórstwie otrzymano próbki o podobnych wartościach  $R_m$  i modułu Younga bez względu na zawartość fazy gazowej w recyklatkach. Zatem można uznać, że oddziaływanie na materiał wysokiego ciśnienia, sił ścinających i wysokiej temperatury spowodowało likwidację większości porów i wzmocnienie cech mechanicznych nowego materiału.

Tabela 7.9. Wpływ zawartości poroforów na właściwości wytrzymałościowe wyprasek otrzymanych z recyklatów porowatych wytłoczyn PELD

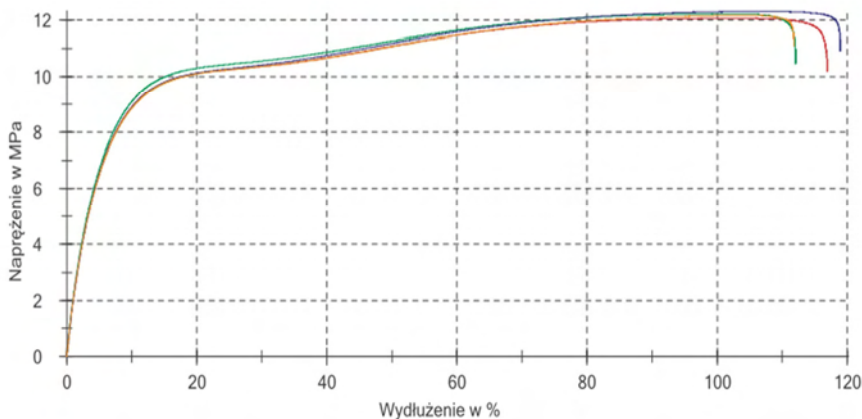
Rodzaj materiału	Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Moduł Younga, MPa	Odształcenie względne, %
rwPELD 0%	12,0±0,1	176±5,0	99,6±9,6
rwPELD 1%	12,3±0,1	170±2,8	105,5±2,0
rwPELD 2%	12,2±0,1	173±6,1	102,7±3,6
rwPELD 4%	11,9±0,3	176±5,8	95,3±1,4

W procesie wtryskiwania z wyłączoną fazą docisku otrzymano wypraski o zbliżonych, w porównaniu z próbkami uzyskanymi z dociskiem, właściwościach. Zaobserwowano istotny wzrost współczynnika sprężystości wzdłużnej, niewielkie spadki wytrzymałości na rozciąganie i odształcenia względnego (tab. 7.10). Wydaje się, że jest to konsekwencją pozostania w próbkach wtryskowych niewielkiej ilości porów gazowych w części rdzeniowej, co powoduje efekt usztywnienia ścianki wytworu. Pomimo wyłączenia oddziaływania docisku, uzyskane próbki były pozbawione zapadnięć powierzchni, co świadczy o przejściu przez fazę gazową roli docisku. Pomimo tylko krótkotrwałego oddziaływania wysokiego ciśnienia w fazie wtrysku, wypraski z recyklatów wytłoczyn porowatych mają lepsze właściwości wytrzymałościowe w stosunku do wytworów wykonanych z rozdrobnionych, porowatych elementów wtryskowych (por. tab. 7.8). Wydaje się, że jest to wynikiem właściwości pierwotnego tworzywa polimerowego.

Tabela 7.10. Wpływ zawartości poroforów na właściwości wytrzymałościowe wyprasek otrzymanych z recyklatów porowatych wytłoczyn PELD

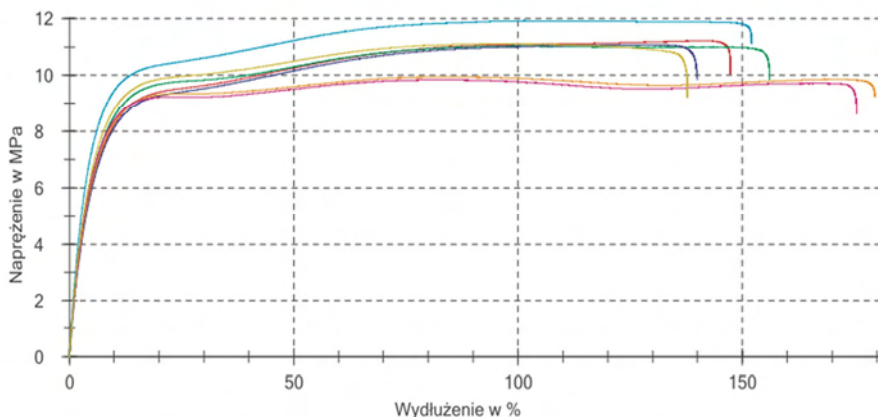
Rodzaj materiału	Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Moduł sprężystości, MPa	Odształcenie względne, %
rwPELD 0%	11,5±0,1	187±1,1	93,7±0,8
rwPELD 1%	11,2±0,1	180±1,7	92,8±3,7
rwPELD 2%	11,1±0,1	180±4,5	95,2±4,9
rwPELD 4%	10,7±0,1	184±0,3	92,8±2,0

Dla wszystkich analizowanych przypadków, przebiegi zmian krzywych naprężenie-odkształcenie w próbie statycznego rozciągania były podobne. Przykładowy wykres dla próbek rwPELD 2% przedstawiono na rysunku 7.14.



Rys. 7.14. Przykładowe przebiegi zmian napężenia w funkcji odkształcenia w próbie statycznego rozciągania materiału wtórnego otrzymanego z recyklatów rPELD 2%; kolorem zaznaczono poszczególne próby pomiarowe

Najbardziej interesujące wydają się wyniki dla próbek uzyskanych metodą wtryskiwania z recyklatów porowatego fizycznie rxPE. Z tworzywa charakteryzującego się gęstością około  $77 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , po odpowiednim rozdrobieniu i ponownej przeróbce we wtryskarce, uzyskano wytwory o wytrzymałości na rozciąganie  $10,9 \pm 0,7 \text{ MPa}$ , module Younga  $173 \pm 15,7 \text{ MPa}$  i odkształceniu względnym  $105,2 \pm 22,3\%$ . Wyniki te nie różnią się istotnie od pozostałych próbek wtryskowych uzyskanych z recyklatów. Oddziaływanie wysokiej temperatury i ciśnienia w fazie wtrysku i docisku, a także przedłużenie czasu uplastyczniania spowodowało likwidację większości porów zawartych w rxPE. Uzyskane przebiegi  $\sigma(\epsilon)$  przedstawiono na rysunku 7.15.



Rys. 7.15. Przebieg zmian napężenia podczas rozciągania próbek wtryskowych uzyskanych z recyklatów xPE o strukturze gazowo-polimerowej; kolorem zaznaczono poszczególne przebiegi prób

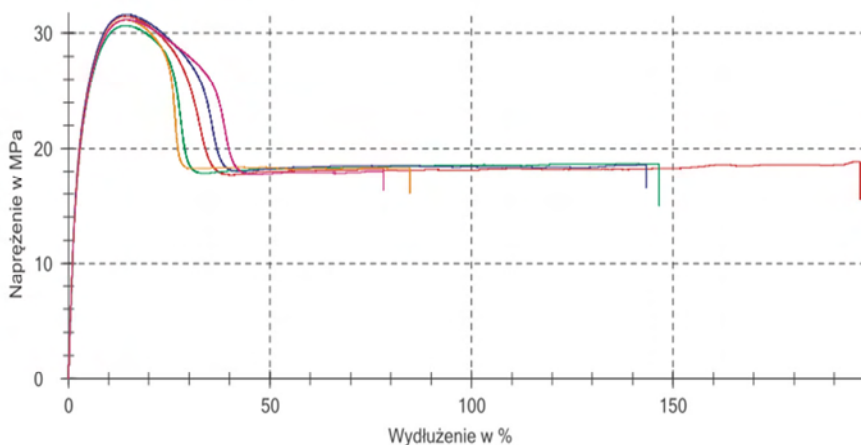
Wytrzymałość na rozciąganie próbek otrzymanych w procesie wtryskiwania recyklatów wyprasek porowatych z polipropylenu jest około 10% niższa od wartości  $R_m$  dla wytworów porowatych uzyskanych w pierwotnym przetwórstwie polipropylenu (por. tab. 4.8 i 7.11). Jednak odmiennie do nich, wytwory uzyskane z recyklatów o dużej zawartości poroforów charakteryzują się wyższą wytrzymałością i większym modułem Younga (tab. 7.11).

Tabela 7.11. Właściwości wytrzymałościowe wyprasek otrzymanych z recyklatów porowatego polipropylenu o różnej zawartości poroforów

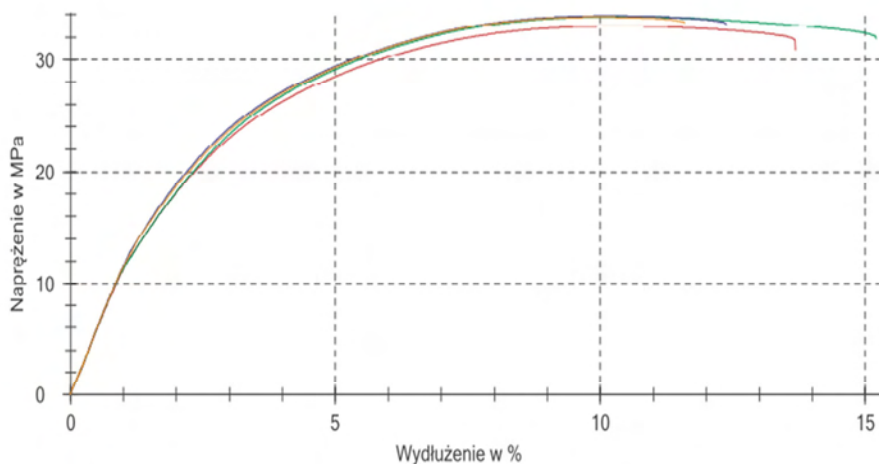
Rodzaj materiału	Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Moduł Younga, MPa	Odkształcenie względne, %
rPP 0%	31,2±0,4	901±13,7	9,5±0,2
rPP 1%	31,7±1,1	980±32	12,5±0,1
rPP 2%	32,5±0,3	991±8,8	12,7±0,1
rPP 2% BD	33,6±0,4	1110±9,4	10,2±0,1

Stwierdzono także zmianę w charakterze przebiegów krzywych zarejestrowanych w próbie statycznego rozciągania (rys. 7.16). Dla wyprasek wytworzonych z recyklatów polipropylenu litego uzyskano typowe wykresy rozciągania, charakterystyczne dla tworzyw częściowo krystalicznych. Dodanie do polipropylenu poroforu w ilości 2% mas. w pierwotnym przetwórstwie spowodowało, że po ponownym przetworzeniu materiał ten ma charakterystykę rozciągania zbliżoną do próbek z rPELD (rys. 7.16b). Obserwowanemu, zwłaszcza dla rPP 2% BD, wzrostowi sztywności i  $R_m$ , towarzyszy niewielki spadek elastyczności, jednak w charakterze zmian uzyskane przebiegi  $\sigma(\epsilon)$  przypominają zachowanie tworzyw o właściwościach wysokoelastycznych. Zatem ta szczątkowo występująca w strukturze polipropylenu faza gazowa może istotnie wpływać na uzyskane właściwości polipropylenu wtórnego.

a)

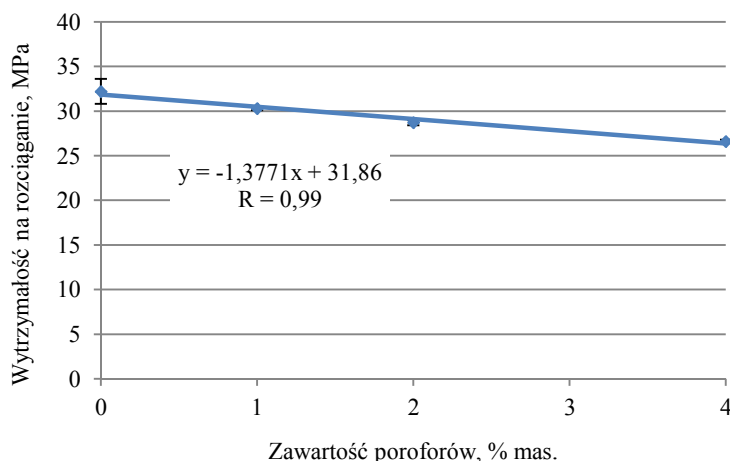


b)



Rys. 7.16. Wpływ zawartości porów na przebieg próby statycznego rozciągania próbek otrzymanych z recyklatów porowatych wyprasek PP: a) przebieg dla rPP 0%, b) rPP 2% BD; kolorem zaznaczono przebiegi poszczególnych prób

Podobne w charakterze zależności  $\sigma(\epsilon)$  uzyskano dla wytworów otrzymanych we wtórnym przetwórstwie z rozdrobnionych wytłoczyn polipropylenów porowatych. Jednak w tym przypadku stopień wypełnienia struktury porami gazowymi, jaki miał miejsce w pierwotnym przetwórstwie, istotnie wpłynął na właściwości wytrzymałościowe wyprasek wtórnych. Wraz z większym udziałem poroforów w PP spada wytrzymałość na rozciąganie i współczynnik sprężystości wzdłużnej (rys. 7.17 i tab. 7.12).



Rys. 7.17. Zmiany wytrzymałości na rozciąganie w wytworach z polipropylenu uzyskanych z recyklatów wytłoczyn porowatych



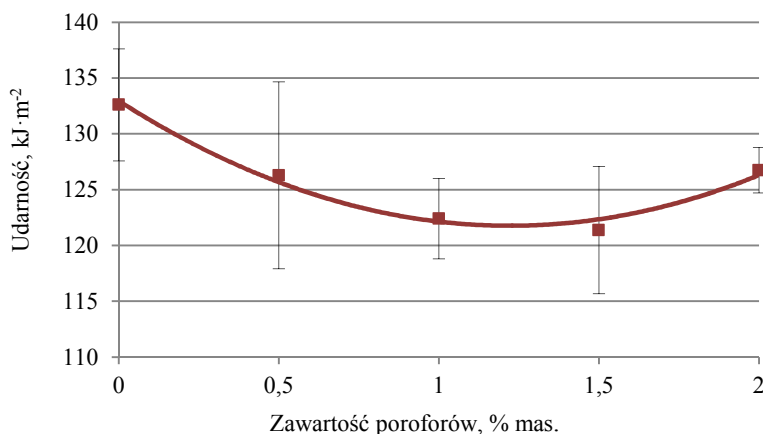
Tabela 7.12. Właściwości wytrzymałościowe wyprasek otrzymanych z recyklatów porowatego, wPP o różnej zawartości poroforów

Rodzaj materiału	Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Moduł Younga, MPa	Odształcenie względne, %
rwPP 0%	32,2±1,4	951±78,4	11,9±0,2
rwPP 1%	30,3±0,2	868±3,6	14,0±0,3
rwPP 2%	28,7±0,3	823±20,4	14,0±0,1
rwPP 4%	26,6±0,2	809±8,9	12,9±0,2

Charakter tych zmian można opisać funkcją liniową. Pozostające w strukturze pory osłabiają wytrzymałość nowych wyprasek. Jednak w porównaniu z cechami wytrzymałościowymi próbek wPP (por. tab. 4.10), wtórne wtryskiwanie, będące ostatnim etapem recyklingu mechanicznego wPP, ma mimo wszystko pozytywny wpływ na uzyskane właściwości, które nie odbiegają znacząco od wytworów wytworzonych z oryginalnych granulatów. Zatem w przypadku wytłocznin poliolefinowych o strukturze porowatej istnieje możliwość ich ponownego wykorzystania w standardowych urządzeniach do przetwórstwa tworzyw polimerowych.

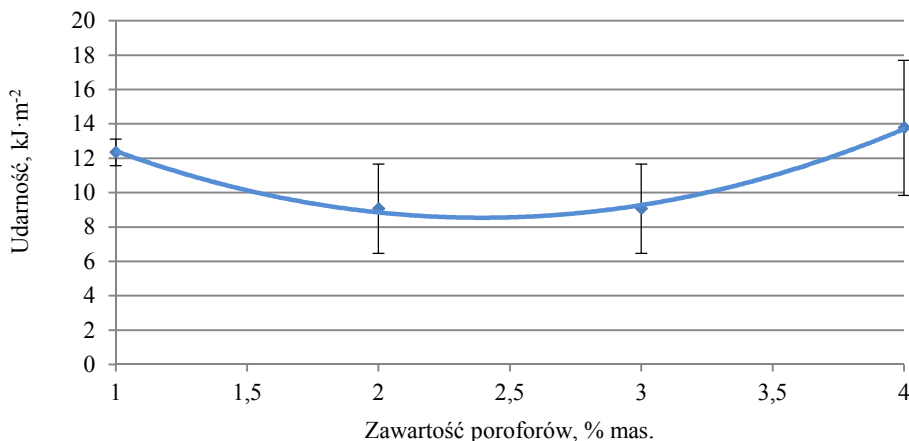
#### 7.4.4. Udarność

Oddziaływanie na próbki obciążeniem udarowym odbywało się w sposób różny, w zależności od rodzaju tworzywa. Oznaczenie udarności dla elastycznego PELD metodą udarowego rozciągania, natomiast do badania PP wykorzystano metodę Charpy'ego. Wykonane we wtórnym przetwórstwie metodą wtryskiwania próbki z recyklatów PELD wykazują nieznacznie mniejszą udarność w porównaniu z litym polietylenem (rys. 7.18). Odporność na udarowe rozrywanie zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości poroforów do poziomu wartości 1,5% mas., by następnie istotnie wzrosnąć dla próbek wykonanych z recyklatów o największej porowatości. Dla recyklatów rPE 2% BD wartość udarności oszacowano na poziomie 122,9±3,9 kJ·m<sup>-2</sup>.



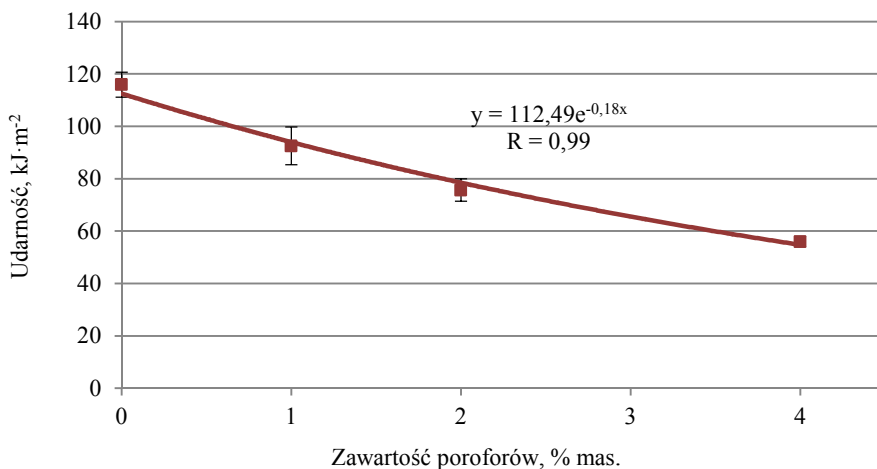
Rys. 7.18. Wpływ zawartości poroforów na zdolność próbek z recyklatów polietylenu małej gęstości do pochłaniania energii podczas udarowego rozrywania

W przypadku próbek z recyklatów porowatego polipropylenu udarność jest na podobnym poziomie bez względu na wcześniejszą zawartość środków porotwórczych (rys. 7.19).



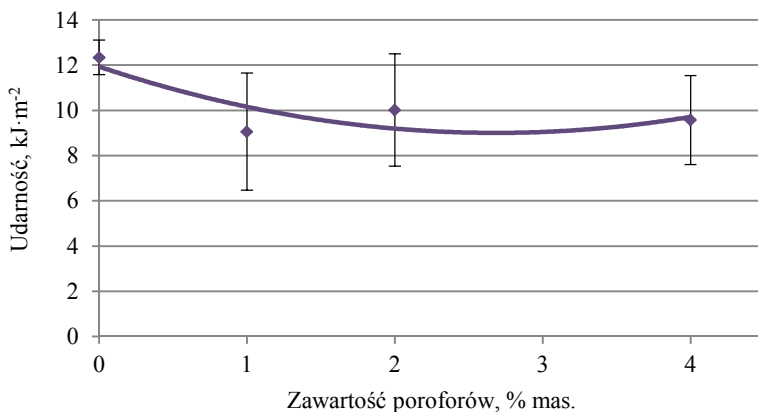
Rys. 7.19. Wpływ zawartości poroforów na zdolność próbek z recyklatów polipropylenu do pochłaniania energii podczas udarowego rozciągania

W przypadku wyprasek uzyskanych z recyklatów wycłoczyn wPELD stwierdzono wykładniczą zależność pomiędzy odpornością na udarowe rozrywanie a zawartością poroforów użytych w pierwotnym przetwórstwie (rys. 7.20). Dla próbek z PP, osłabienie ich odporności na dynamicznie przyłożone obciążenie jest mniej zauważalne w porównaniu z PELD (rys. 7.21).



Rys. 7.20. Wpływ zawartości poroforów na zdolność próbek z recyklatów wycłoczyn PELD do pochłaniania energii podczas udarowego rozrywania

Największe zmiany udarności odnotowano dla próbek uzyskanych z recyklatów wPELD. Wydaje się, że jest to spowodowane dużą ilością porów pozostających w rdzeniu wyprasek, które podczas oddziaływania rozciągającego obciążenia udarowego zachowują się jak karby strukturalne. W przypadku PP udarność dla wszystkich próbek pozostaje na podobnym poziomie.

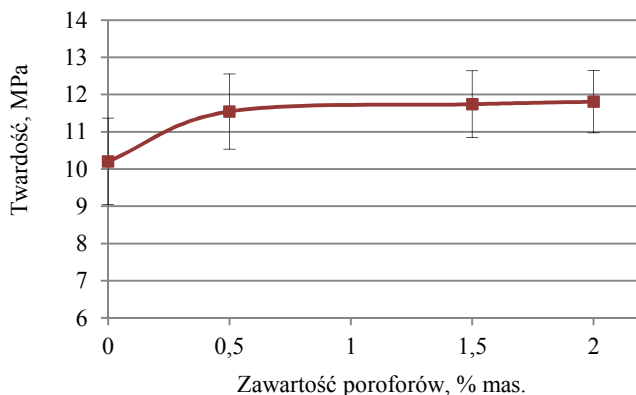


Rys. 7.21. Wpływ zawartości poroforów na zdolność próbek z recyklatów wytłoczonego polipropylenu do pochłaniania energii podczas udarowego rozrywania

Różnice w wartościach udarności dla obu tworzyw poliolefinowych nie wynikają z ich właściwości i dysproporcji w ilości pozostających w ich strukturze porów, ale są wynikiem zastosowania dla obu materiałów różnych sposobów badania udarności i są miarą czułości tych metod w odniesieniu do badanych rodzajów tworzywa.

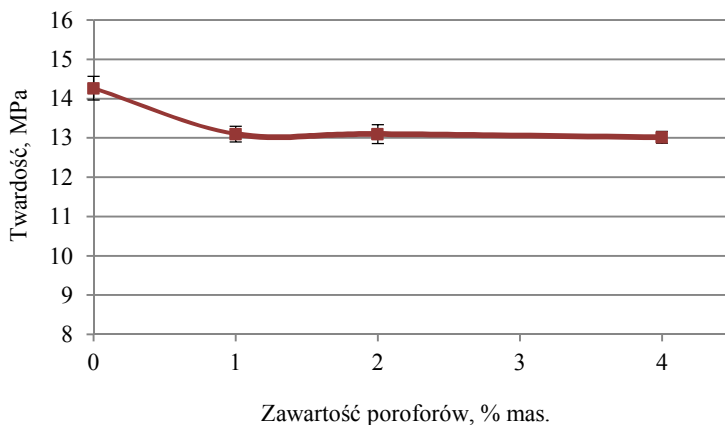
#### 7.4.5. Twardość

Twardość wyprasek otrzymanych z recyklatów polietylenu małej gęstości zmienia się w przedziale 10-12 MPa, przy czym istotny wzrost w stosunku do litego PELD ma miejsce już dla wytworów z recyklatów o zawartości poroforów 0,5% mas. (rys. 7.22).



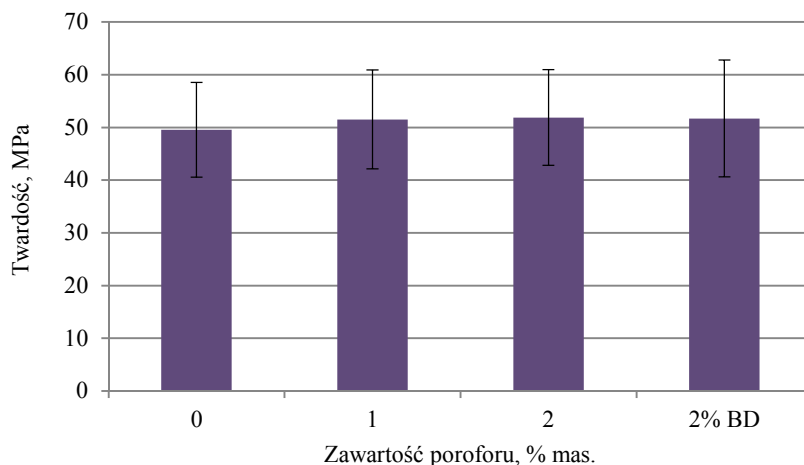
Rys. 7.22. Twardość wyprasek wtryskowych wykonanych z recyklatów rPELD

Wartość statystyki  $t_{\alpha}=3,03$  jest większa wobec wartości krytycznej  $t_{0,05; 8} = 2,179$ . Podobny w zakresie zmian jest wpływ ilości poroforów w pierwotnym przetwórstwie na twardość wyprasek uzyskanych z recyklatów wytłoczyn PELED. Porównując zawarte na rysunku 7.22 wyniki z wartościami twardości dla wytłoczyn przeznaczonych do cięcia, można zaobserwować wyraźne umocnienie materiału (por. rys. 4.20).

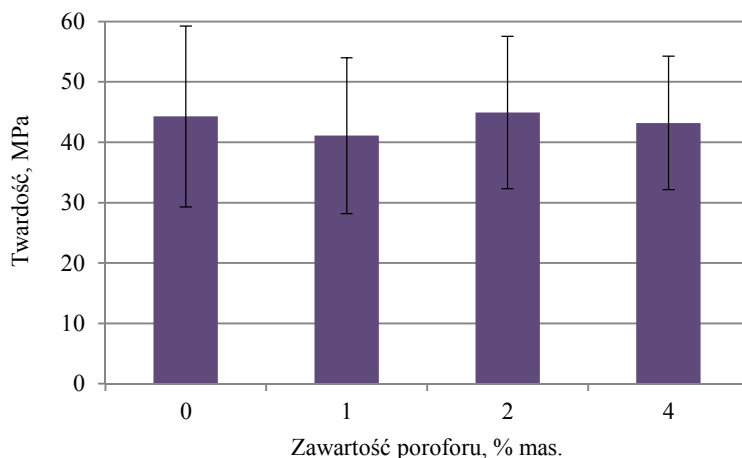


Rys. 7.23. Wpływ zawartości poroforów na twardość wytłoczyn z rwPELED

Twardość wyprasek z recyklatów polipropyleny zawierającego różną ilość poroforów nie różni się istotnie od próbek wykonanych z litego PP, zarówno dla wyprasek uzyskanych z recyklatów otrzymanych z próbek wtryskiwanych jak i wytłaczanych (rys. 7.24 i 7.25).



Rys. 7.24. Wpływ rodzaju recyklatów na twardość wyprasek PP otrzymanych w przetwórstwie wtórnym



Rys. 7.25. Wpływ zawartości poroforów na twardość wyprasek uzyskanych z recyklatów wPP

Dla obu rodzajów próbek z recyklatów PP wartość obliczonego w teście t-Studenta maksymalnego współczynnika  $t_{\alpha}$  nie przekroczyła 0,6 (wartość krytyczna  $t_{0,05; 12} = 2,179$ ).

## 7.5. WŁAŚCIWOŚCI WYTŁOCZYŃ UZYSKANYCH Z RECYKLATÓW TWORZYW POROWATYCH

### 7.5.1. Gęstość

Rezultaty badań gęstości wytłoczyń uzyskanych z materiałów wtórnych przedstawiono w tabeli 7.13. Analiza wyników pozwala stwierdzić, że w przypadku próbek wytworzonych z recyklatów PELD wzrost prędkości obrotowej ślimaka w plastografie Brabendera zmniejsza wartość gęstości otrzymanych wytłoczyń. Intensywne mieszanie generuje wzrost wartości sił ścinających w stopie polimerowym, zwłaszcza w obrębie zwojów ślimaka. Powoduje to wzrost temperatury w układzie uplastyczniającym, co sprzyja wtórnemu porowaniu środków chemicznych, które nie rozłożyły się w trakcie pierwotnego przetwórstwa. Uzyskane wartości gęstości są znacznie niższe niż w przypadku przetwarzania tych samych recyklatów metodą wtryskiwania. Oznacza to, że ciśnienie występujące w trakcie realizacji procesu wytwarzania odgrywa bardzo istotną rolę w kreowaniu struktury porowatej w wytworach powstałych we wtórnym przetwórstwie. W procesie wytłaczania recyklatów PELD ciśnienie procesowe  $p_1$ , mierzone tuż przed wejściem stopionego tworzywa do głowicy szczelinowej, wynosiło od około 7,0 do 11,1 MPa, przy czym największe wartości uzyskiwano w trakcie wytłaczania realizowanego z największą prędkością obrotową ślimaka. W wyniku tego procesu uzyskano wytłoczinę (próbka 11) o gęstości, która jest o około 50% niższa w porównaniu z wytłocziną uzyskaną z litego recyklatu PELD w niskiej temperaturze przetwórstwa. Świadczy to o istotnym wpływie parametrów przetwórczych, zawartości fazy gazowej i środków porotwórczych zawartych w recyklatach porowatych PELD na gęstość uzyskanych wytłoczyń wtórnych.

Tabela 7.13. Gęstość wyłoczyn uzyskanych w plastografie Brabendera z recyklatów w zależności od rodzaju tworzywa i zawartości poroforów

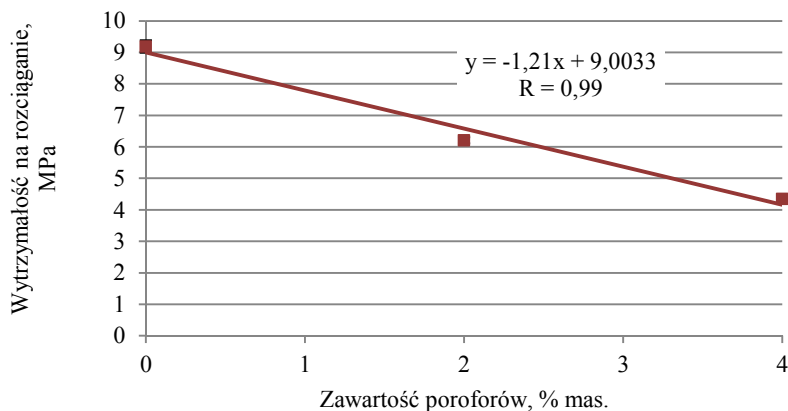
Rodzaj tworzywa	Numer próbki	Rodzaj próbki, ilość poroforów	Gęstość, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Temperatura przetwórstwa, $^{\circ}\text{C}$	Prędkość obrotowa, $\text{obr}\cdot\text{min}^{-1}$	Ciśnienie $p_1$ , MPa
rwPELD	1	rwPELD 0%	920,0±0	169 - niska	45	8,39±0,1
	2	rwPELD 0%	916,7±6	168 - niska	60	9,29±0,1
	3	rwPELD 0%	920,0±1	168 - niska	120	11,01±0,2
	4	rwPELD 2%	780,0±0	162 - niska	45	7,97±0,3
	5	rwPELD 2%	786,7±6	166,5 - niska	60	9,35±0,1
	6	rwPELD 2%	740,0±0	164 - niska	120	11,15±0,2
	7	rwPELD 4%	646,7±6	160 - niska	45	7,44±0,4
	8	rwPELD 4%	620,0±0	160 - niska	60	8,47±0,1
	9	rwPELD 4%	593,3±6	163 - niska	120	10,44±0,1
	10	rwPELD 4%	664,0±4	189 - wysoka	45	5,19±0,1
	11	rwPELD 4%	566,0±2	191 - wysoka	120	7,40±0,1
rwPP	12	rwPP 2%	705,7±4	214	45	6,64±0,1
	13	rwPP 2%	690,7±1	214	120	9,18±0,1

W przypadku wyłoczyn uzyskanych z recyklatów wPP ich gęstość w niewielkim stopniu zależy od obrotów ślimaka w układzie uplastyczniającym. Jednak i w tym przypadku uzyskane próbki są nadal porowate o gęstości o ponad 20% mniejszej w porównaniu z litym PP. Wydaje się, że obserwowany wpływ stopnia porowatości recyklatów na gęstość wyłoczyn uzyskanych we wtórnym przetwórstwie wynika z dłuższego czasu przebywania stopionego tworzywa w układzie uplastyczniającym wylączarki i oddziaływania na niego mniejszego ciśnienia  $p_1$ . Wszystkie wstęgi otrzymane z recyklatów tworzyw porowatych charakteryzowały się dobrą jakością powierzchni, na której nie stwierdzono porów otwartych.

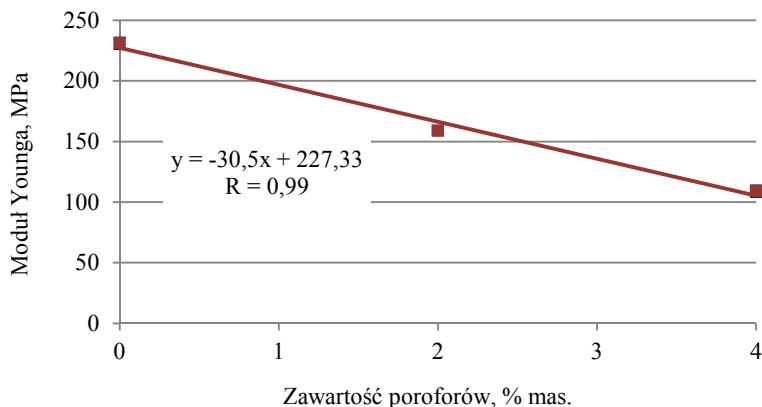
### 7.5.2. Oznaczenie właściwości mechanicznych

Zachowana, po wtórnym wyłoczeniu w wylączarce Brabendera, struktura polimerowo-gazowa tworzywa wpływa istotnie na liniowy spadek wytrzymałości na rozciąganie, któremu towarzyszy także zmniejszenie modułu sprężystości. Poziom tych zmian jest podobny do tendencji zaobserwowanej dla wyłoczyn porowatych uzyskanych w pierwotnym przetwórstwie (przygotowanie próbek do cięcia). Ponownie zrealizowany proces wylączania umocnił nieznacznie próbki z PELD (por. tab. 4.10 oraz rys. 7.26 i 7.27).

Podobne w charakterze zmian w stosunku do rwPELD są krzywe zarejestrowane w próbie statycznego rozciągania dla wyłoczyn uzyskanych z recyklatów wPP 2%. Otrzymane wyniki wskazują na umocnienie się materiału wtórnego w stosunku do wyłoczyny PP z dodatkiem 2% mas, poroforu, otrzymanej w pierwszym przetwórstwie (por. tab. 4.10). Oprócz znacznie wyższej wartości  $R_m$ , moduł Younga materiału rwPP 2% oszacowano na poziomie  $690\pm 20,8$  MPa (dla wPP 2%  $E = 424\pm 26,2$  MPa).



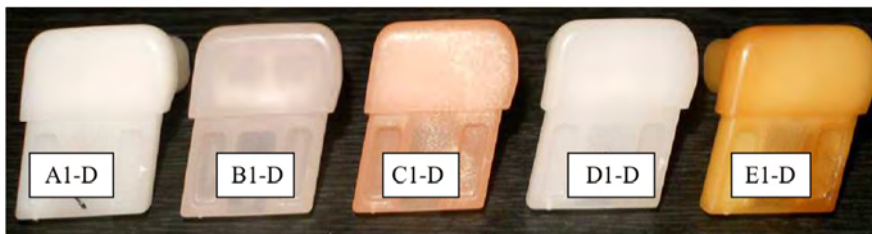
Rys. 7.26. Zmiany wytrzymałości na rozciąganie wyłoczyn uzyskanych z recyklatów PELD o różnej zawartości poroforów



Rys. 7.27. Zmiany modułu Younga dla wyłoczyn uzyskanych z recyklatów PELD

## 7.6. WYNIKI PRÓB WYKONANYCH W WARUNKACH EKSPERYMENTU PRZEMYSŁOWEGO

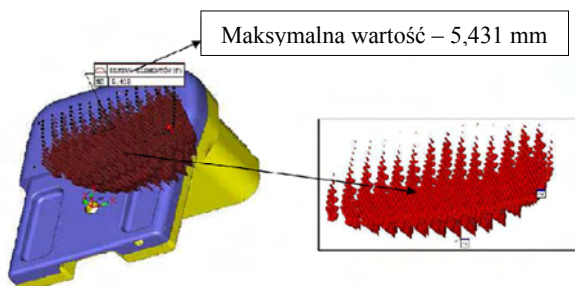
Przeprowadzony w warunkach przemysłowych eksperyment, dotyczący ponownego wykorzystania recyklatów porowatych, dodatkowo uwypuklił zmienność zjawisk zachodzących podczas procesów uplastyczniania i krzepnięcia w gnieździe formy porowatego tworzywa wtórnego. Różnice w jakości powierzchni uzyskanych wyprasek, potencjalne zapadnięcia, jamy skurczowe czy też stabilizacja wymiarowa były pochodną modyfikacji polipropylenu poroforami, którą zrealizowano w pierwotnym przetwórstwie. Na rysunku 7.28 przedstawiono obiekt badań wykonany przy użyciu opisanych w punkcie 7.2.3 pracy materiałów pierwotnych i porowatych tworzyw wtórnych. Obserwacja uzyskanych wyprasek okiem nieuzbrojonym wskazuje na różnice w odwzorowaniu geometrii gniazda formy wtryskowej przez różne materiały. Zamieszczone poniżej wytwory zostały wykonane w cyklu wtryskiwania z realizacją fazy docisku.



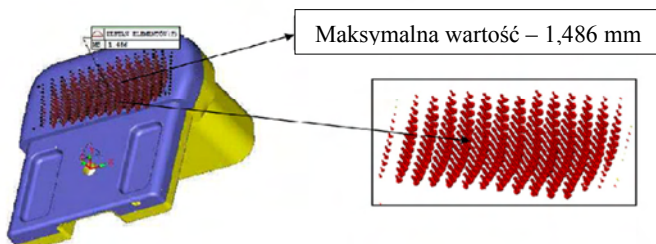
Rys. 7.28. Obraz wyprasek uzyskanych z różnych materiałów w procesie wtryskiwania: a) A1-D – wytwór wyprodukowany z oryginalnego polipropylenu, b) B1-D oraz D1-D – wypraski wykonane z recyklatów polipropylenu litego, c) C1-D oraz E1-D – elementy otrzymane odpowiednio z rPP 2% i rwPP 2%

Szczegółowa analiza wartości skurczu zaobserwowanego na powierzchni wytworu o największej grubości wskazuje na związek pomiędzy jego wartością a rodzajem materiału użytego do prób i oddziaływaniem ciśnienia w gnieździe formy. Zastosowanie litego polipropylenu w postaci oryginalnego granulatu lub recyklatu rwPP lub rPP generuje skurcz o największej wartości. Jest on wynikiem wystąpienia kontrakcji objętościowej tworzywa podczas jego krzepnięcia w gnieździe formy na skutek krystalizacji części makrocząsteczek. Wartość skurczu była tym większa im mniejsze oddziaływanie ciśnienia docisku i wyższa temperatura formy wtryskowej. Otrzymane z maszyny pomiarowej rozkłady zapadnięcia i skurczu przedstawiono na rysunku 7.29.

a) Próbką A1-B



b) Próbką A1-D



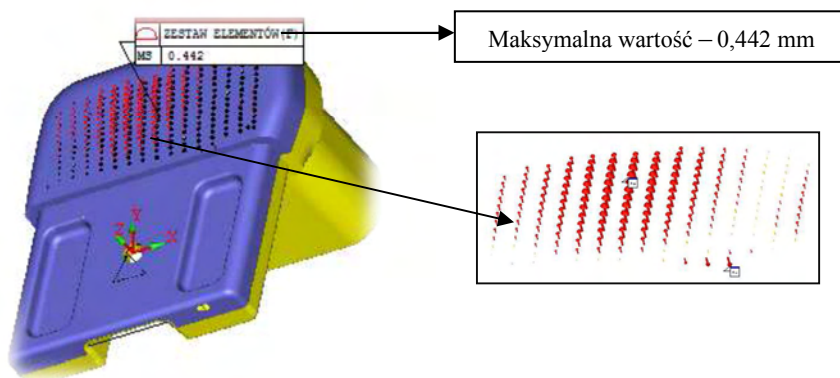
Rys.7.29. Rozkład wielkości zapadnięcia powierzchni dla wyprasek uzyskanych z polipropylenu oryginalnego: a) wtryskiwanie z wyłączoną fazą docisku, b) cykl zrealizowany z oddziaływaniem fazy docisku



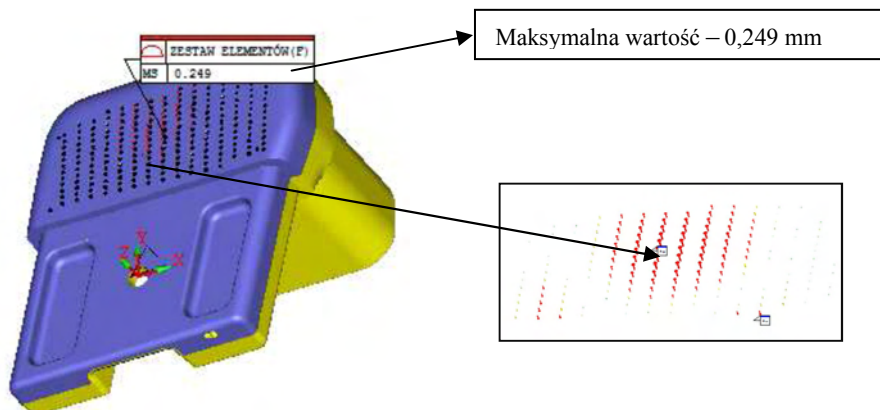
Podobny rozkład i wartość zapadnięcia na powierzchni zaobserwowano na wypraskach wykonanych z recyklatów litego polipropylenu zarówno przeznaczonego do wytłaczania, jak i do wtryskiwania. Maksymalna wartość odchyłki od idealnie płaskiej powierzchni stworzonej w modelu 3D wyniosła odpowiednio 3,65 mm i 4,52 mm dla wyprasek otrzymanych bez oddziaływania fazy docisku oraz 2,44 mm i 2,48 mm dla wytworów otrzymanych w procesie wtryskiwania zrealizowanym z fazy docisku.

Odmienne obrazy rozkładu skurczu zanotowano dla wyprasek uzyskanych z recyklatów uzyskanych przez rozdrobnienie próbek wtryskowych (oznaczenie C1) oraz wytłoczyn (E1) o strukturze porowatej (rys. 7.30 oraz 7.31). W obu przypadkach nastąpiło istotne zmniejszenie odkształcenia skurczowego powierzchni o około 1000%.

a) wypraska C1-B

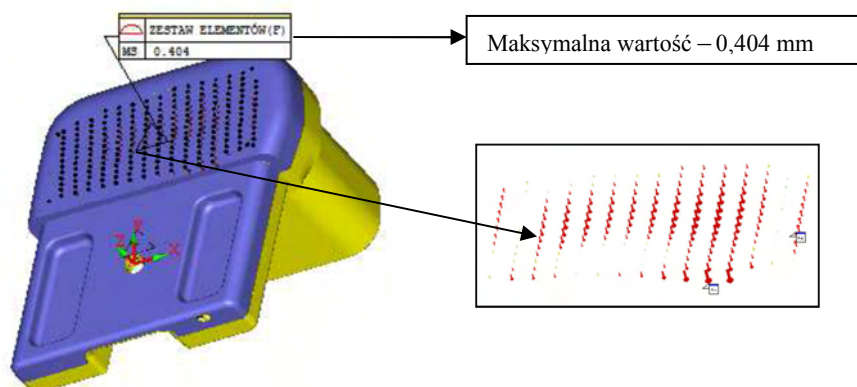


b) wypraska C1-D

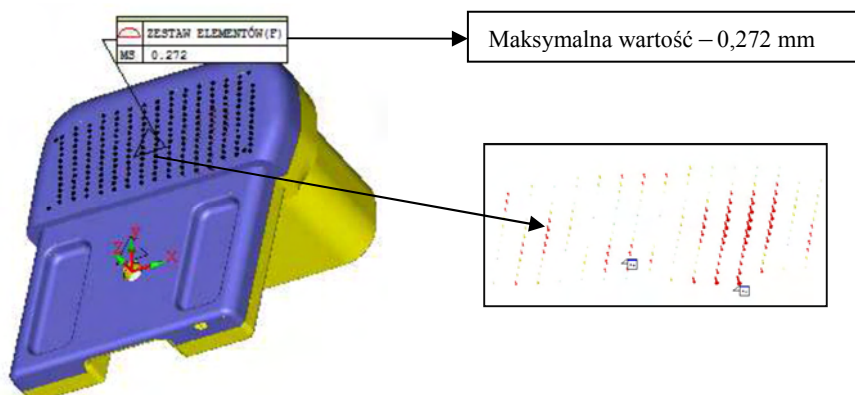


Rys. 7.30. Rozkład zapadnięć na wyprasce otrzymanej z recyklatów polipropylenu porowatego rPP 2%: a) próbka uzyskana bez docisku, b) próbka uzyskana z włączoną fazą docisku

## a) wypraska E1-B

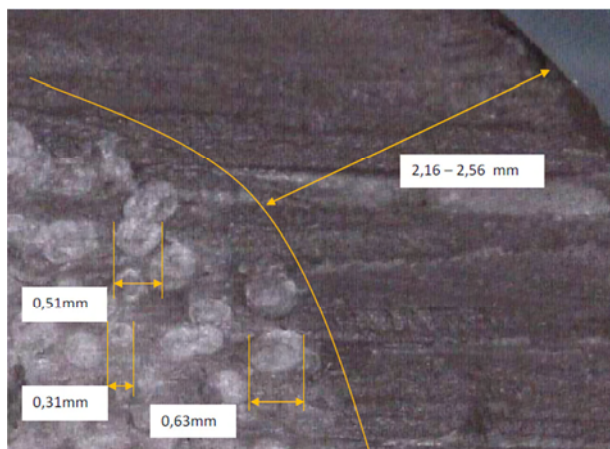


## b) wypraska E1-D



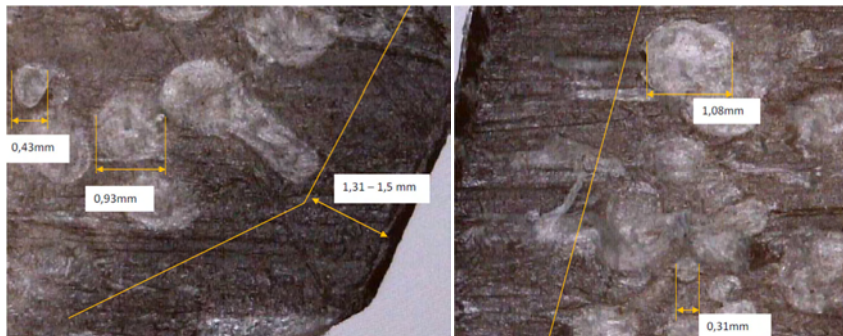
Rys. 7.31. Rozkład zapadnięć na wypraskie otrzymanej z recyklatów polipropylenu porowatego rPP 2%: a) próbka uzyskana bez docisku, b) próbka uzyskana z włączoną fazą docisku

Stwierdzono ponadto, że wyłączenie oddziaływania fazy docisku spowodowało niewielkie w stosunku do grubości ścianki zapadnięcia na powierzchni wyprasek, uzyskanych z recyklatów porowatego polipropylenu. Pory gazowe, podobnie jak we wcześniej omawianych przykładach, zastąpiły oddziaływanie docisku i zlikwidowały pojawiające się w trakcie krzepnięcia polipropylenu wady wynikające z jego dużego skurczu. W rozpatrywanym przypadku jest to szczególnie widoczne ze względu na stopniowanie ścianek i ich nadmierną grubość. Pomimo nietechnologicznej konstrukcji wytworu uzyskano wypraski z recyklatów porowatych o akceptowalnych cechach powierzchniowych. Główną przyczyną usunięcia dokuczliwych wad powierzchniowych było pojawienie się w strukturze porów gazowych, pochodzących albo z poprzedniego przetwórstwa lub będących wynikiem rozkładu wtórnego środków porujących. Intensywność zaobserwowanych zmian jest podobna w obu przypadkach. Porowate recyklaty ograniczyły także podatność wyprasek do deformacji objętościowej. Uzyskano anizotropową strukturę polimerowo-gazową, o czym świadczą obrazy przekrojów zamieszczone na rysunku 7.32.



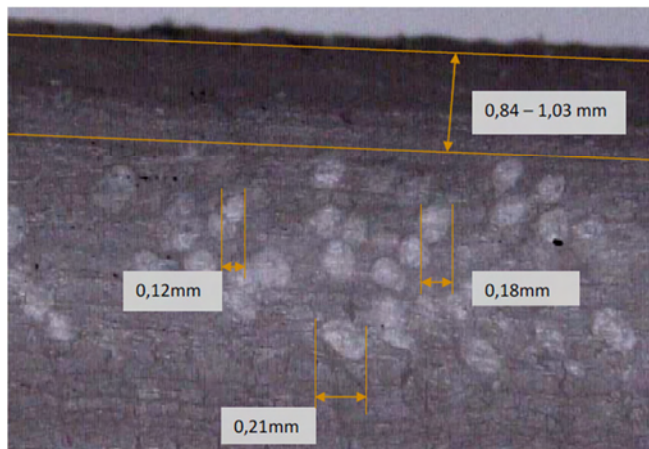
Rys. 7.32. Anizotropowa struktura wypraski C1-B z uwzględnieniem wielkości porów gazowych oraz warstwy wierzchniej pow. x40 (wycinek ze ścianki wypraski)

W przekroju wypraski można dostrzec litą warstwę zewnętrzną o grubości uzależnionej od miejsca pobrania wycinka oraz grubości ścianki wypraski. W rdzeniu wytworu znajdują się pory gazowe, przy czym dla wyprasek uzyskanych z recyklatów polipropylenu rPP 2% są to pory o kształcie kulistym i o mniejszej wielkości w porównaniu do elementów fazy gazowej powstałej na bazie recyklatów rwPP 2% (rys. 7.33).



Rys. 7.33. Rozkład porów gazowych w przekroju wyprasek otrzymanych z recyklatów porowatych wytłocznin rwPP 2% (E1-B), pow. x40

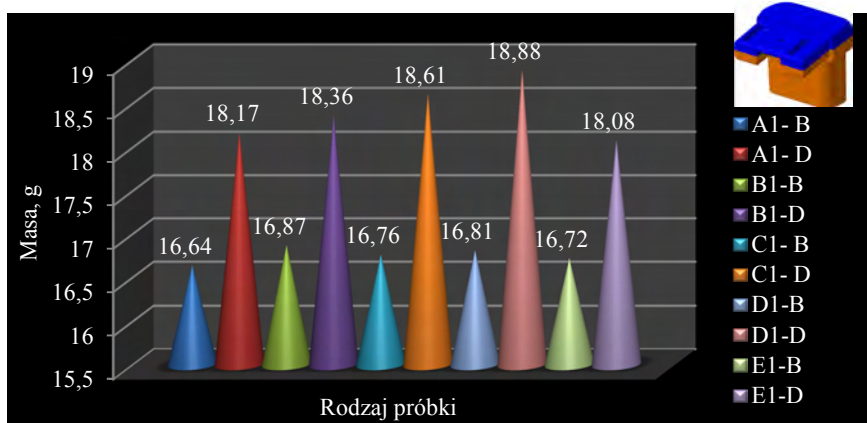
Wielkość ta nie ma jednak większego znaczenia dla wartości powstałych zapadnięć na powierzchni wypraski. Analiza obrazów wskazuje także na istotną zależność pomiędzy wielkością porów a grubością ścianki wypraski. Zakładając, że wszystkie porofory rozłożyły się w pierwotnym przetwórstwie, taka zależność nie powinna obowiązywać dla struktur polipropylenowo-gazowych uzyskanych we wtórnym przetwórstwie. Pośrednim dowodem na tworzenie się nowych porów gazowych we wtórnym przetwórstwie są obrazy przekrojów wyprasek pobrane ze ścianek o mniejszej grubości. Szybsza i intensywniejsza ewakuacja ciepła ze stopionego tworzywa, krzepnącego w gnieździe formy wtryskowej, powoduje mniejszy rozrost porów gazowych (rys. 7.34).



Rys. 7.34. Anizotropowa struktura wypraski otrzymanej z recyklatów rPP 2% pobrana ze ścianki wypraski o grubości 6 mm

Oprócz niewątpliwych zalet przetwarzania recyklatów porowatych w zakresie niwelowania typowych wad wynikających ze zmiany objętości tworzywa w trakcie jego krzepnięcia w gnieździe formy oraz anizotropii skurczowej, istotną przesłanką ekonomiczną do stosowania tego typu materiałów wtórnych jest redukcja masy wyprasek. Intensywność zaobserwowanych zmian zależy od grubości ścianki wypraski i jest tym większa, im ścianka jest grubsza. W efekcie przetworzenia recyklatów polipropylenu o strukturze porowatej uzyskano wytwory o mniejszej masie pozbawione wad powierzchniowych i nadmiernego skurczu przetwórczego (rys. 7.35).

Oddziaływanie porów gazowych wytworzonych w strukturze polipropylenu litego pozwoliło ograniczyć lub wyeliminować fazę docisku, a to spowodowało skrócenie cyklu wtryskiwania, zmniejszenie obciążenia wtryskarki oraz wyeliminowało powstawanie naprężeń własnych w produkowanych wypraskach.



Rys. 7.35. Różnice pomiędzy masą wyprasek uzyskanych z oryginalnego PP i jego recyklatów w procesie wtórnego wtryskiwania w warunkach oddziaływania i bez ciśnienia docisku

## 8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Rozprawa jest pierwszą, jak się wydaje, próbą systematycznego ujęcia w jednym spójnym opracowaniu zagadnień związanych z zagospodarowaniem porowatych tworzyw poliolefinowych w procesach recyklingu mechanicznego. Starano się uwypuklić metodę dochodzenia do odpowiedniego rozwiązania technologicznego poprzez zrealizowanie badań w sposób sekwencyjny, zwłaszcza w zakresie cięcia i rozdrabniania tworzyw porowatych. Przyjęcie określonego sposobu realizowania celów rozprawy, opisanego w kolejnych jej rozdziałach, umożliwiło wzajemne powiązanie kolejnych wniosków szczegółowych, wynikających z przeprowadzenia badań procesów cięcia i rozdrabniania w kontekście właściwości materiałów wsadowych, a co najważniejsze – w odniesieniu do oceny efektywności procesów ponownego wykorzystania recyklatów poliolefin porowatych. W kolejnych rozdziałach pracy zbadano i opisano:

- potrzeby w zakresie procesów recyklingu mechanicznego tworzyw porowatych,
- tendencje rozwojowe w konstruowaniu nożowych układów tnących oraz przedstawiono charakterystykę procesu cięcia nożowego, zwłaszcza w jego odmianie hiperboloidalnej,
- właściwości poliolefinowych tworzyw porowatych, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu sposobu wytwarzania i nastaw procesowych na strukturę polimerowo-gazową uzyskanych materiałów,
- wpływ geometrii noży tnących i ich wzajemnego usytuowania na przebieg cięcia w odniesieniu do właściwości tworzyw porowatych,
- wpływ zawartości poroforów na jednostkowe zużycie energii i wydajność procesu rozdrabniania porowatych tworzyw poliolefinowych, w odniesieniu do rozkładów uziarnienia uzyskanych recyklatów,
- cechy geometryczne zbioru ziaren recyklatów,
- wtórne przetwórstwo otrzymanych produktów rozdrabniania, wykorzystując standardowe procesy przetwórstwa polimerów: metodę wtryskiwania i wytłaczania,
- właściwości fizyczne i strukturę otrzymanych tworzyw wtórnych.

Oryginalnym osiągnięciem autora jest zbadanie następujących zagadnień:

- ✓ ustalenie odmiennych w stosunku do materiałów litych, warunków cięcia w zakresie określenia odpowiedniej geometrii noży tnących, prędkości przecinania i szczeliny międzyżożowej, w zależności od struktury i rodzaju porowatych tworzyw poliolefinowych,
- ✓ wskazanie zmiennych relacji pomiędzy wartościami siły tnącej na nożu ruchomym i nieruchomym w zależności od warunków realizacji procesu cięcia, a zwłaszcza w odniesieniu do kątów ostrza noży tnących i kąta pochylenia ich względem osi obrotu wirnika. Stanowi to doświadczalne potwierdzenie postawionej w pracy hipotezy badawczej,
- ✓ wyznaczenie zakresu obciążeń układu roboczego rozdrabniacza od siły tnącej i momentu obrotowego podczas dekohezji porowatych wyprasek i wytłoczn o znacznej grubości, wykonanych z polietylenu małej gęstości i polipropylenu,
- ✓ wyznaczenie jednostkowego zużycia energii procesu rozdrabniania porowatych tworzyw poliolefinowych w odniesieniu do uzyskanych rozkładów uziarnienia,
- ✓ opracowanie metodyki realizacji badań cięcia i rozdrabniania tworzyw polimerowo-gazowych o obniżonej gęstości,

- ✓ oszacowanie cech geometrycznych ziaren recyklatów w odniesieniu do ich sposobu wytwarzania z wykorzystaniem cyfrowej analizy obrazu,
- ✓ zrealizowanie badań w ramach obiegu zamkniętego, recyklingu mechanicznego poliolefinowych tworzyw porowatych, w wyniku którego uzyskano, w warunkach ekonomicznie uzasadnionych, wytwory o właściwościach pozwalających na ich ponowne wykorzystanie,
- ✓ opracowanie technologii powtórnego wykorzystania porowatego polietylenu o małej gęstości (poniżej  $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), modyfikowanego przez porowanie fizyczne,
- ✓ oszacowanie korzystnego stopnia rozdrobnienia recyklatów tworzyw porowatych w aspekcie ich dalszego przetworzenia w standardowych maszynach do przetwórstwa termoplastycznych tworzyw polimerowych,
- ✓ uzyskanie materiału wtórnego o strukturze porowatej, o poprawionych w stosunku do tworzywa pierwotnego, niektórych właściwościach mechanicznych,
- ✓ wskazanie na obszary praktycznego wykorzystania wyników badań w zakresie ponownego wykorzystania recyklatów porowatych,
- ✓ wykazanie efektu wtórnego porowania poroforów w trakcie przetwarzania recyklatów oraz pozostałości w strukturze materiału porów powstałych w pierwotnym przetwórstwie,
- ✓ wykazanie konieczności stosowania odmiennych, w stosunku do przetwórstwa tworzyw litych, parametrów w technologii wtryskiwania lekkich recyklatów tworzyw poliolefinowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można sformułować najważniejsze wnioski o charakterze szczegółowym:

1. Poprzez dobór odpowiednich parametrów procesowych i rodzaju poroforów chemicznych, a także dzięki konstrukcji kanałów przepływowych w głowicy wylączarskiej obniżono gęstość wyloczyny z polipropylenu do poziomu wartości charakterystycznego dla technologii porowania fizycznego tworzyw polimerowych.
2. Postać geometryczna próbki, rodzaj poroforów oraz nastawy procesu wytwarzania istotnie wpływają na intensywność procesu rozkładu poroforów w trakcie przetwórstwa tworzyw poliolefinowych, a uzyskana struktura polimerowo-gazowa decyduje o przebiegu procesie cięcia.
3. Największą skuteczność cięcia porowatych wyloczyn z PP i PELD uzyskuje się przy zastosowaniu noży o kątach ostrza  $\beta_r = 30^\circ$  oraz  $\beta_s = 60^\circ$ , przy jednoczesnym pochyleniu względem osi wirnika ich krawędzi tnących o kąt  $2\lambda = 6^\circ$  lub o  $2\lambda = 13,5^\circ$ .
4. Najgorsze efekty cięcia porowatych tworzyw poliolefinowych zaobserwowano przy zastosowaniu noży ruchomych o kątach ostrza  $\beta_r = 45^\circ$ , przy jednoczesnym pochyleniu ich krawędzi tnących względem osi wirnika o kąt  $2\lambda = 6^\circ$ .
5. W przypadku rozdzielania lekkich, porowatych próbek z polietylenu o gęstości poniżej  $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , ich deformacja i ścinanie krawędziami noży w minimalnej szczelinie międzyżożowej są szczególnie efektywne. Należy dążyć do ustawiania minimalnej szczeliny pomiędzy krawędziami tnącymi noży, dzięki czemu ogranicza się niepożądane zginanie materiału w trakcie przecinania.
6. Stwierdzono, że zastosowanie sit roboczych o wielkości otworów  $\varnothing 9 \text{ mm}$  umożliwia uzyskanie recyklatów porowatych o uziarnieniu, które można opisać rozkładem normalnym. Uzyskano niewielki rozrzut średnicy medialnej rozkładu w zakresie  $4,65 \div 5,81 \text{ mm}$  dla recyklatów PELD oraz od  $4,88$  do  $5,70 \text{ mm}$  dla produktów roz-

- drobnienia z polipropylenu. Jednostkowe zużycie energii procesu rozdrabniania zależy od stopnia porowatości materiału wsadowego.
7. Zastosowanie sit o otworach okrągłych o średnicy  $\varnothing$  9 mm jest wystarczające do skutecznego uplastycznienia recyklatów porowatych tworzyw poliolefinowych w standardowych wtryskarkach i wylączarkach. Rozdrobnienie tych materiałów do średniej wielkości uziarnienia  $d_p < 6$  mm jest korzystne ze względu na jednostkowe zużycie energii poniżej  $100 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Ze względu na gęstość nasypową recyklatów modyfikacji wymaga układ zasypowy strefy uplastyczniania.
  8. Uzyskanie zadowolających pod względem właściwości i jakości wyprasek z recyklatów porowatych może przebiegać przy obniżonej wartości lub z wyłączeniem fazy docisku, w trakcie realizacji procesu wtryskiwania.
  9. W procesach wtórnego przetwórstwa uzyskano wytwory polimerowo-gazowe o właściwościach fizycznych zbliżonych do pierwotnych, pozwalających na ich ponowne wykorzystanie. Faza gazowa pozostająca w strukturze wyprasek z polipropylenu spowodowała obniżenie skurczu przetwórczego i zapadnięć na powierzchni, zwłaszcza dla wytworów grubościennych, a także redukcję ich masy i czasu cyklu wtryskiwania. Recyklat porowaty może stanowić oczekiwany materiał do wykorzystania w produkcji wyprasek nietechnologicznych.
  10. Uzyskano istotne podwyższenie udarności próbek polipropylenowych wykonanych z recyklatów wyprasek wytworzonych bez docisku, w stosunku do materiału oryginalnego.
  11. Opracowano technologię recyklingu mechanicznego lekkich porowatych próbek z polietylenu o gęstości poniżej  $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , w efekcie uzyskując wytwory o poprawionych w stosunku do litego PELD właściwościach.

W wyniku podjętych prac wskazano na relacje pomiędzy poszczególnymi procesami składowymi recyklingu mechanicznego w aspekcie właściwości wytworów, uzyskanych całkowicie z recyklatów tworzyw porowatych. Poprzez analizę przebiegów pojedynczych przecięć tworzyw porowatych o zmiennej zawartości porów wskazano na istotną rolę w tych procesach fazy gazowej, która opóźnia propagację pęknięcia i stanowi fazę elastyczną w materiale, utrudniającą przecięcie. Po raz pierwszy w Polsce przeprowadzono pomiary siły tnącej na nożach ruchomych. Pozytywnie zweryfikowano zastosowanie powłoki PVD do pokrywania noży.

Jak wykazano w pracy, rozdrabnianie tworzyw porowatych przebiega odmiennie w stosunku do materiałów litych. Zwykle wiąże się ze wzrostem zapotrzebowania energii na redukcję objętości materiału wsadowego. W wyniku realizacji procesu rozdrabniania tworzyw porowatych przez cięcie, uzyskano recyklaty o uziarnieniu, które opisano układem normalnym. Bez względu na właściwości materiału wsadowego otrzymano zbiór ziaren o płaskich powierzchniach przecięcia, powstałych jako efekt oddziaływania na materiał krawędzi tnących noży. Było to możliwe dzięki przyjęciu odpowiedniej geometrii ostrzy i ustawieniu noży, wynikającego z analizy wyników procesu cięcia.

Powiązanie poszczególnych sekwencji badań, zawartych w kolejnych rozdziałach, pozwoliło na opracowanie założeń dotyczących technologii zagospodarowania tworzyw porowatych o gęstości mniejszej niż  $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , co wydaje się ważne w kontekście ciągłego rozwoju branży opakowań i tendencji do zastępowania w tej dziedzinie ekspandowanego polistyrenu tworzywami poliolefinowymi i polistyrenem, które są modyfikowane przez porowanie fizyczne. Stwarza to nowe możliwości ponownego wykorzystania odpadowych tworzyw termoplastycznych o budowie porowatej.



Wyniki badań materiałowych kończących rozprawę wskazują, że poprzez odpowiednie sprzężenie parametrów procesu rozdrabniania nożowego i wtryskiwania w standardowej wtryskarce istnieje możliwość ponownego wykorzystania podatnej na przetwórstwo postaci recyklatów poliolefinowych tworzyw porowatych. Uzyskano materiały wtórne o właściwościach pozwalających na ich ponowne wykorzystanie, w tym jako elementy konstrukcyjne o podwyższonej udatności.

Potwierdzono również przydatność recyklatów porowatych do wytwarzania wyprasek, zwłaszcza grubościennych, o stopniowanej grubości ścianek, mających cechy wytworów nietechnologicznych. Poprzez zastosowanie we wtórnym wtryskiwaniu rozdrobnionego polipropylenu o budowie porowatej uzyskano zmniejszenie masy wytworów oraz skutecznie ograniczono wartości zapadnięcia i skurczu. Może więc być to skuteczna metoda ograniczania wad w projektowaniu wyprasek i błędów w konstrukcji form wtryskowych, co prowadzi do zmniejszenia niezbędnego i kosztownego w takich przypadkach poprawiania narzędzia.

Wyniki badań własnych mogą stanowić podstawę do ukierunkowania dalszych prac w zakresie recyklingu mechanicznego tworzyw polimerowych o małej podatności na rozdrabnianie, zarówno o strukturze litej jak i porowatej. Dotyczy to nie tylko odpadów ekspandowanego polistyrenu i polipropylenu, ale także konstrukcyjnych tworzyw termoplastycznych o znacznej wytrzymałości mechanicznej. Wydaje się więc, że zmodernizowane stanowisko do badania procesów cięcia i rozdrabniania, pozwala obecnie na prowadzenie eksperymentów w zakresie dekohezji tworzyw polimerowych o różnych właściwościach. Skorelowanie wyników procesów składowych cięcia, rozdrabniania i przetwórstwa wtórnego recyklatów podnosi efektywność recyklingu mechanicznego, czyniąc go ekonomicznie uzasadnionym. Ponowne wykorzystanie potencjału materiałowego zgromadzonego w odpadach polimerowych, zwłaszcza technologicznych, jest w wielu wypadkach uzasadnione energetycznie. Podjęcie w tym zakresie dalszych prac może być realizowane metodami opracowanymi i wykorzystanymi w ramach zrealizowanej pracy i za pomocą istniejących i wytworzonych narzędzi badawczych.



## LITERATURA

- [1] Allen T., 1997. Particle Size Measurement. Vol. 1. Powder sampling and particle size measurement. Chapman & Hall, London Weinheim New York Tokyo Madras, rozdz. 2, 3, 4, 9.
- [2] Armarego E.J.A., Kang D.C., Verezub S., Wang D.L., 2002. The geometry, specification, and predictive force for plane faced ball-end milling cutters and operations. *Machining Science and Technology* 6(3).
- [3] Bauer W., 2001. Untersuchung des Einzelzerkleinerungsvorganges in Schneidmühlen am Beispiel von Polypropylen. VDI Verlag, Reihe 3, Verfahrenstechnik, Düsseldorf.
- [4] Bauer W., Wüstenberg D., 2002. Fracture behavior of polypropylene under dynamic cutting and shearing action in granulators. *Chemical Engineering & Technology* 25(11).
- [5] Bauer W., Wüstenberg D., Woldt D., Schubert G., 2002. The right speed: The comminution of polypropylene is influenced decisively by the cutting speed. *Kunststoffe Plast Europe* 92(2).
- [6] Bieliński M., 1992. Badanie wybranych właściwości polietylenu wtórnego. *Polimery* 8, 37.
- [7] Bieliński M., 1992. Podstawy i badanie podatności termoplastycznych tworzyw wtórnych na wybrane procesy przetwórstwa. Wyd. Uczeln. ATR Bydgoszcz, Rozprawy 48.
- [8] Bieliński M., 2004. Techniki porowania tworzyw termoplastycznych. Wyd. Uczeln. ATR Bydgoszcz.
- [9] Bieliński M., Piszczek K., Sykutera D., 2003. Badania wpływu procesu porowania na wybrane wskaźniki użytkowe tworzyw. X Seminarium Tworzywa Sztuczne w Budowie Maszyn, Kraków.
- [10] Bieliński M., Piszczek K., Sykutera D., 2003. The Evaluation of Dimension and Decay of Pores in Thermoplastics – Method of Computer Picture Analysis. 18. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren – Technomer '03, TU Chemnitz.
- [11] Bieliński M., Sykutera D., 2010. Properties of polypropylene porous parts and their recycle. *Polymeric Materials*, Martin-Luther University Halle-Wittenberg.
- [12] Bieliński M., Sykutera D., Pepliński K., 2007. Polypropylene modification by talc at the changeable cooling conditions of injection molding process. 12. Problemseminar Polymermischungen – Gefüllte und verstärkte Polymerblends – Nanoblends. Bad Lauchstädt, Martin-Luther University Halle-Wittenberg.
- [13] Błędzki A.K. (red.), 1997. Recykling materiałów polimerowych. WNT Warszawa.
- [14] Błędzki A.K., Faruk O., Kirschling H., Kühn J., Jaskiewicz W., 2006. Microcellular polymers and composites. *Polimery* 10, 51.
- [15] Błędzki A.K., Kirschling H., Steinbichler G., Egger P., 2004. Polycarbonate microfoams with a smooth surface and higher notched impact strength, *Journal of Cellular Plastics* 40(6).
- [16] Bochat A., Grzonkowski R., 2005. Problematyka modelowania cięcia materiału anizotropowego. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 1-2, 44.

- [17] Bochat A., Grzonkowski R., Zastempowski M., 2005. Analiza badań cięcia żdźbła roślin zbożowych i nowy bębnowy zespół tnący. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 1-2, 44.
- [18] Bociąga E., 2001. Procesy determinujące przepływ tworzywa w formie wtryskowej i jego efektywność. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Monografie 82.
- [19] Bociąga E., 2008. Specjalne metody wtryskiwania tworzyw polimerowych. WNT Warszawa.
- [20] Bociąga E., Palutkiewicz P., 2011. Wpływ zawartości poroforu i warunków wtryskiwania na strukturę wyprasek z polipropylenu. *Polimery* 10, 56.
- [21] Bociąga E., Palutkiewicz P., 2012. Wpływ zawartości poroforu i warunków wtryskiwania na wybrane właściwości i stan powierzchni wyprasek z polipropylenu. *Polimery* 1, 57.
- [22] Bociąga E., Palutkiewicz P., Szymański D., Wawrzyniak J., 2010. Badanie wpływu rodzaju poroforu na właściwości i strukturę wyprasek wtryskowych. *Zesz. Nauk. Politechniki Poznańskiej, Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją* 12.
- [23] Bociąga E., Szymański D., Wawrzyniak J., Palutkiewicz P., 2009. Właściwości wyprasek z tworzyw wtórnych z poroforem. [W:] *Recykling i odzysk materiałów polimerowych. Materiały – Technologie – Utylizacja*, red. A.K. Błędzki, Z. Tartakowski, Wyd. Uczeln. ZUT Szczecin.
- [24] Borowski G., Kuczmazewski J., 2005. Utylizacja drobnoziarnistych odpadów metalowych, Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [25] Brożek M., Maczka W., Tumidajski T., 1995. Modele matematyczne procesów rozdrabniania. Wyd. AGH, Kraków.
- [26] Bravo V.L., Hrymak A.N., 2005. Nozzle Injection of Physical Blowing Agents In the Injection Molding of Microcellular Foams. *International Polymer Processing* 2.
- [27] Ciesielska D., 2005. Ocena wpływu techniki rozdrabniania odpadów z tworzyw termoplastycznych na strukturę i właściwości otrzymanych recyklatów. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 25(1).
- [28] Corti A., Lombardi L., 2004. End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA. *Energy* 29.
- [29] Czaja K., 1996. Actual trends in the development of polyolefins. *Polimery* 1, 41.
- [30] Czarnecka D., Ciesielska D., Jurga J., 2004. Wpływ krotności przetwarzania na zmiany strukturalne wybranych tworzyw termoplastycznych. [W:] *Nowe kierunki modyfikacji i zastosowań tworzyw sztucznych*, red. J. Jurga, Wyd. Politechniki Poznańskiej.
- [31] Domek G., Kowalski A., Macko M., 2006. Analiza rozdrabniania na podstawie nierównomierności napędu. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 1-2, 45.
- [32] Dudziński D., Molinari A., 1997. A modelling of cutting for viscoplastic materials. *International Journal of Mechanical Science*. Vol. 39, nr 41.
- [33] Dyrektywa EU 2008/98/WE dotycząca odpadów.
- [34] Flizikowski J., 1990. Badania i podstawy konstrukcyjne rozdrabniaczy wielotarczowych. Wyd. Uczeln. ATR Bydgoszcz, Rozprawy 42.
- [35] Flizikowski J., 1996. Modelling of field and speed cutting in multiple disc milling. Part I, II. *Archiwum Budowy Maszyn PAN XLIII* (4).
- [36] Flizikowski J., 1998. Rozdrabnianie tworzyw sztucznych. Wyd. Uczeln. ATR Bydgoszcz.

- [37] Flizikowski J., 2005. Konstrukcja rozdrabniaczy żywności. Wyd. Uczeln. ATR Bydgoszcz.
- [38] Flizikowski J., 2010. Rozdrabnianie materiałów porowatych i hiperplastycznych. *Recykling* 1(109).
- [39] Flizikowski J., Al-Zubiedy A.M., 2005. Rozwój rozdrabniacza w ujęciu entropowym. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 3, 44.
- [40] Flizikowski J., Macko M., 2000. Metodyka badań obciążeń i odkształceń quasi-ścinających przy rozdrabnianiu wielotarczowym tworzyw. *Zesz. Nauk. Politechniki Łódzkiej* 28.
- [41] Flizikowski J., Macko M., 2001. Metodyka oceny sprawności quasi-ścinań recyklatów rur optotelekomunikacyjnych. *Polimery* 1, 46.
- [42] Flizikowski J., Macko M., 2008. Genetyczne wspomaganie konstrukcji rozdrabniaczy wielotarczowych. *Advances in Materials Sciences* 8(2).
- [43] Frankowski P., Zimniak J., 2006. Metoda wyznaczania jednostkowej siły cięcia w warunkach rozdrabniania quasi-stycznego. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 3, 45.
- [44] Gantt J.A., Gatzke E.P., 2005. High-Shear Granulation Modeling Using a Discrete Element Simulation Approach. *Powder Technology* 156(2-3).
- [45] Garbarczyk J., Konieczka R., Sykutera D., Paukszta D., Borysiak S., 2001. Recykling materiałowy oczyszczonych wielowarstwowych opakowań spożywczych i wybrane własności otrzymanego recyklatu, 1<sup>st</sup> Central European Conference Recycling of Polymer Materials Science-Industry, Szczecin.
- [46] Gente V., La Marca F., Lucci F., Massacci P., Pani E., 2004. Cryo-comminution of plastic waste. *Waste Management* 24.
- [47] Gottberg J.P., 1969. Untersuchung des Schneidvorganges bei Zerkleinerung von homogenen Weichstoffen am Beispiel hochpolymeren Kunststoffe. TU Branschweig, Dissertation.
- [48] Gottberg J.P., 1970. Grundlagen der Schneidzerkleinerung hochpolymerer Weichstoffe. *Kunststoff-Technik* 12.
- [49] Górzyński J., 2007. Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektów. WNT Warszawa.
- [50] Grellmann W., Seidler S., 2001. Deformation and Fracture Behaviour of Polymers. Springer Verlag Berlin, Heidelberg and New York.
- [51] Gu F., Kapoor S.G., DeVor R.E., Bandyopadhyay P., 1997. An Enhanced Cutting Force Model for Face Milling with Variable Cutter Feed Motion and complex Workpiece Geometry. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 119(11).
- [52] Habibi-Naini S., Schlummer Ch., 2005. A New and Flexible Process for Thermoplastic Foams ANTEC.
- [53] Hackl H., 1995. Schneidmühlen zur Zerkleinerung weicher Materialien. Hosokawa Alpine AG, Ausburg.
- [54] Helias A., de Haes U., Heijungs R., 2007. Life-cycle assessment for energy analysis and management. *Applied Energy* 84.
- [55] Henning J., 1992. Trocken- und Naßzerkleinerungs- und Recyclingverfahren für Kunststoffabfälle. [W:] *Recykling von Kunststoffabfällen*, red. G. Menges, Hanser, München-Wien.
- [56] Hwang S.S., Chen S.Ch., Chung M.H., 2005. Study on the Mechanical Properties of Microcellular Injection Molded Parts. ANTEC.

- [57] Isherwood D.P., Younan H.R., 1986. An impact cutting test for polymers. *Journal of Polymer Testing* 6.
- [58] Kałużny W., Konieczka R., Sykutera D., 2002. Zużycie noży tnących a proces rozdrabniania gumy hiperboloidalnym cięciem obrotowym. *Konf. Nauk. Tech. Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych, Częstochowa-Poraj*.
- [59] Kamieńska-Krzowska B., Domińczuk J., Józef Kuczmaszewski J., 2005. Analiza przydatności technik wizyjnych do pomiaru wielkości geometrycznych, *Pomiary Automatyka Kontrola* 7/8.
- [60] Konieczka R., 1988. Badania procesu cięcia obrotowego tworzyw wielkocząsteczkowych. *Polimery* 6, 34.
- [61] Konieczka R., 1989. Untersuchungen des Schneidvorgangs beim Zerkleinern von Kunststoffen. *Kunststoffe* 79(7).
- [62] Konieczka R., 1996. Podstawy mechanicznych procesów recykulacji folii z polietylenu małej gęstości. *Wyd. Uczeln. ATR Bydgoszcz, Rozprawy* 74.
- [63] Konieczka R., Kałużny W., Sykutera D., 1997. Drehschneiden im Prozeß der Feinzerkleinerung von Gummi. *KGK* 50(9).
- [64] Konieczka R., Kałużny W., Sykutera D., 1999. Der Einfluß der Schnittgeschwindigkeit auf den Verlauf der Feinzerkleinerung von Gummi durch Drehschneiden. 16. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren Technomer '99, TU Chemnitz.
- [65] Konieczka R., Kałużny W., Sykutera D., 2001. Zerkleinerungsstufen und Prozess der Feinzerkleinerung von Gummiabfällen beim hyperboloidalen Rotationschreiben, 17. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren Technomer '01, TU Chemnitz.
- [66] Konieczka R., Sykutera D., 2002. Polyurethane fine grinding by rotational cutting. *International Conference Recycling of Plastics in Europe, TU Kassel*.
- [67] Konieczka R., Sykutera D., 2002. Technologia precyzyjnego rozdrabniania poliuretanów poprzez ich wielostopniowe hiperboloidalne cięcie (WHC). 7. Profesorskie Warsztaty Naukowe Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych, Puszczykowo k. Poznania.
- [68] Konieczka R., Zimniak J., 2011. Rotary knife cutting in plastics recycling. [W:] *Advanced Grinding – 25<sup>th</sup> anniversary of the comminution in Bydgoszcz*, red. A. Mroziński, M. Macko, *Wyd. Fundacji Rozwoju Mechatroniki Bydgoszcz*.
- [69] Koszkuł J., 1997. Polipropylen i jego kompozyty. *Wyd. Politechniki Częstochowskiej*.
- [70] Koszkuł J., Nabiałek J., 2000. The influence of viscosity model on the results of injection molding process simulation. 9<sup>th</sup> *International Scientific Conference Achievements in Mechanical and Materials Engineering*, ed. L.A. Dobrzański.
- [71] Koszkuł J., Nabiałek J., 2004. Viscosity models in simulation of the fillig stage of the injection molding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 157-158.
- [72] Koszkuł J., Nitkiewicz Z., 1996. Badania stopnia krystaliczności kompozytów polipropylenu. *Inżynieria Materiałowa* 1.
- [73] Kozłowski M. (red.), 2006. *Recykling tworzyw sztucznych w Europie*. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej.
- [74] Kozłowski M., Kozłowska A., Frąckowiak S., 2010. Materiały polimerowe o strukturze komórkowej. *Polimery* 10, 55.

- [75] Królikowski B., 2007. Effect of poly(ethylene terephthalate) and polyethylene comminution on the mechanical and thermal properties of polymer compositions. *Polimery* 10, 52.
- [76] Krupiński W., Sykutera D., 2008. Badania symulacyjne procesu wtryskiwania poliamidu 6.6 wzmocnionego włóknem szklanym. VI Sympozjum Modelowania i Symulacja Komputerowa w Technice, Łódź.
- [77] Liu M.T., Baker E.W., 1991. Instrumented dart impact evaluation of linear low density polyethylene at controlled impact energy. *Polymer Engineering and Science* 31(10).
- [78] Macko M., 2000. Wpływ cech konstrukcyjnych zespołu wielotarczowego na charakterystyki użytkowe procesu rozdrabniania rurowych recyklatów tworzyw sztucznych. ATR Bydgoszcz, dysertacja.
- [79] Macko M., 2005. Badania wielokrawędziowego rozdrabniania tworzyw. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 1-2, 44.
- [80] Macko M., 2010. Metoda doboru rozdrabniaczy do materiałów nie kruchych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 5, 49.
- [81] Macko M., 2011. Badania oraz analiza sił i odkształceń w rozdrabnianiu jednokrotnym. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 3, 50.
- [82] Macko M., 2011. Metoda doboru rozdrabniaczy wielokrawędziowych do przeróbki materiałów polimerowych. Wyd. UKW Bydgoszcz.
- [83] Macko M., 2011. Research methods of mill, grinders and crushers innovation in energetic recycling. [W:] *Advanced Grinding – 25<sup>th</sup> anniversary of the comminution in Bydgoszcz*, red. A. Mroziński, M. Macko, Wyd. Fundacji Rozwoju Mechatroniki Bydgoszcz.
- [84] Macko M., Flizikowski J., 2003. The methodology of research into innovative design mill in recycling, 18 Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren – Technomer 2003, TU Chemnitz.
- [85] Materiały AKZO NOBEL, 2012. Expand 1.
- [86] Materiały firmy Avian Granulator, 2009.
- [87] Materiały firmy CMG, 2009. Granulatori CMG.
- [88] Materiały firmy Folcieri, 2012. The Futur is now – Catalogo Prodotti.
- [89] Materiały firmy Müller, 2009. Providing better solutions for your grinding operations.
- [90] Materiały firmy Pallmann, 2010. Utilisation of Plastics.
- [91] Materiały firmy Rapid, 2010. Rapid Schneidmühle – Zugriff auf überlegene Leistung.
- [92] Materiały firmy TRIA, 2009. Schneidmühle.
- [93] Materiały firmy Wanner, 2012. Cutting edge processing.
- [94] Materiały firmy Weima, 2009. SMW – Schneidmühle – leistungsstark und wirtschaftlich.
- [95] Materiały firmy Zerma, 2009. High Performance Granulators.
- [96] Michaeli W., Habibi-Naini S., 2005. Saving time by Foam Injection Molding. ANTEC.
- [97] Michaeli W., Pfannschmidt O., Habibi-Naini S., 2002. Wege zum mikrozellulärenschaum. *Kunststoffe* 6(92).

- [98] Nabiałek J., 2010. Wpływ konstrukcji kanałów doprowadzających na wypełnienie gniazda formującego w procesie wtryskiwania kompozytów polimerowych. *Badania modelowe. Zesz. Nauk. Politechniki Poznańskiej, Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją* 12.
- [99] Okamoto K.T., 2003. *Microcellular Processing*. Carl Hanser Verlag München.
- [100] Pahl M.H., 1994. *Zerkleinerungstechnik*. Verlag TUV Rheinland.
- [101] Patent polski nr 130061 pt.: Urządzenie rozdrabniające. Twórcy: R. Konieczka i inni.
- [102] Philipps K.K. i in., 1996. Shearing of automotive grade PP and ABS to facilitate recycling. *Conference of the North American Manufacturing Reaserch Institute of SME 24, Ann Arbor*.
- [103] Plochocki A., Konieczka R., 1999. Hyperboloidal rotary cutter – modeling and application in recycling of polyethylene film in palletizing – line aggregation. *ANTEC*.
- [104] Powell M.S., Morrison R.D., 2007. The future of comminution modelling. *International Journal of Mineral Processing* 84.
- [105] Pr. zbiorowa pod red. J. Brandrupa, 1996. *Recycling and recovery of plastics*. Hanser/Gardner München – Vienna – New York.
- [106] Pr. zbiorowa pod red. Z. Drzymały, 1992. *Badania i podstawy konstrukcji młynów specjalnych*. PWN Warszawa.
- [107] Rief B., Gundrum J., 2003. Microcellular parts from the injection moulding machine. *Kunststoffe Plast Europe* 1.
- [108] Rydzkowski T., 2012. Teoretyczne i doświadczalne podstawy efektywnego wytlaczania ślimakowo-tarczowego w recyklingu materiałów i kompozytów polimerowych. *Wyd. Uczeln. Politechniki Koszalińskiej*.
- [109] Sadrai S., Meech J.A., Ghomshei M., Sassani F., Tromans D., 2006. Influence of impact velocity on fragmentation and the energy efficiency of comminution. *International Journal of Impact Engineering* 33.
- [110] Shamoto E., Altintas Y., 1999. Prediction of shear angle in oblique cutting with maximum shear stress and minimum energy principles. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 8.
- [111] Shen C., Kramschuster A., Ermer D., Turng L.S., 2006. Study of Shrinkage and Warpage in Microcellular Co-Injection Moulding. *International Polymer Processing* 4.
- [112] Sidor J., 2005. *Badania, modele i metody projektowania młynów wibracyjnych*. Wyd. AGH Kraków, Rozprawy 150.
- [113] Sikora J.W., 2002. Wpływ kąta ostrza noża granulatora na efektywność konstrukcyjną procesu wytłaczania z granulowaniem polietylenu. *Polimery* 3, 47.
- [114] Sikora R., 1989. Model matematyczny recykulacji całkowitej tworzyw termoplastycznych. *Archiwum Nauki o Materiałach* 110.
- [115] Sikora R., 1996. *Obróbka tworzyw wielkocząsteczkowych*. ŻAK – Wyd. Eduk. Z. Dobkowskiej Warszawa.
- [116] Sikora R. (red.), 2006. *Przetwórstwo tworzyw polimerowych – podstawy logiczne, formalne i terminologiczne*. Wyd. Politechniki Lubelskiej.
- [117] Snyder J., 1992. Analysis of the wedge-shaped damage zone in edge-notched polypropylene. *Journal of Material Sciences* 27.
- [118] Sokołowski M., 1995. *Energia rozdrabniania*. IMBiGS Warszawa.

- [119] Sołtysiak R., Bieliński M., 2005. Właściwości litych i porowatych płyt PVC. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 3, 44.
- [120] Sykutera D., 1998. Badanie procesu rozdrabniania odpadów gumy cięciem hiperboloidalnym w aspekcie wykorzystania otrzymanego proszku gumowego do napełniania poliamidu 6. Politechnika Poznańska, dysertacja.
- [121] Sykutera D., 1999. Wykorzystanie metody komputerowej analizy obrazu do badań właściwości proszków uzyskanych przez rozdrobnienie gumy w młynie nożowym. IX International Conference on Machinery Recycling, Bydgoszcz.
- [122] Sykutera D., 2000. Zerkleinerungsprozeß von Gummi und Kunststoffen beim Recycling. Deutsch-polnisches Seminar – Fortschritte in der Zerkleinerungstechnik, Universität Paderborn, Institut für Energie- und Verfahrenstechnik.
- [123] Sykutera D., 2001. Badanie procesu rozdrabniania odpadów gumy cięciem hiperboloidalnym w aspekcie wykorzystania otrzymanego proszku gumowego do napełniania poliamidu 6. VI Profesorskie Warsztaty Naukowe Przetwórstwo Tworzy Wielkocząsteczkowych, Częstochowa-Poraj.
- [124] Sykutera D., 2001. Feinzerkleinerungsprozess von Elastomeren. 4-th European Conference of Young Research and Science Workers in Transport and Telecommunications Transcom 2001, Zilina.
- [125] Sykutera D., 2001. Obraz powierzchni i kształt ziaren a efektywność procesu drobnego mielenia gumy. [W:] *Recykulacja w budowie maszyn*, praca zbiorowa pod red. J. Flizikowskiego, Prace Wydziału Nauk Technicznych Bydgoszcz.
- [126] Sykutera D., 2001. Rola sita w precyzyjnym rozdrabnianiu gumy przez cięcie obrotowe, *Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy*, Mechanika 50.
- [127] Sykutera D., 2003. Die Funktion des Siebes im Prozeß der Feinzerkleinerung von Gummiabfällen durch Rotationsschneiden. 18. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren – Technomer '03, TU Chemnitz.
- [128] Sykutera D., 2003. Wpływ prędkości obwodowej noży ruchomych na efektywność precyzyjnego dwustopniowego rozdrabniania pianek poliuretanowych. *Inżynieria Maszyn – Recykulacja w budowie maszyn*, Bydgoszcz.
- [129] Sykutera D., 2004. Właściwości recyklatów otrzymanych przez wielostopniowe rozdrabnianie poliuretanów metodą cięcia obrotowego. Pr. zbiorowa pod redakcją J. Koszkuła i E. Bociągi, Wyd. Politechniki Częstochowskiej.
- [130] Sykutera D., 2005. Badanie cięcia próbek tworzyw porowatych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 3, 44.
- [131] Sykutera D., 2006. Cięcie wolnoobrotowe porowatego PVC. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 3, 45.
- [132] Sykutera D., 2008. Wtryskiwanie recyklatu porowatego PVC o różnym stopniu uziarnienia. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 3, 47.
- [133] Sykutera D., 2009. Próba weryfikacji wyników symulacji procesu wtryskiwania w warunkach rzeczywistych. *Mechanika* 3.
- [134] Sykutera D., 2009. Reuse of recycled porous PVC of different size grains. 20. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren – Technomer '09, TU Chemnitz.
- [135] Sykutera D., 2010. Multistage fine grinding of polyurethane. *Journal of Polish CIMAC* 5(3).
- [136] Sykutera D., 2010. Rozwój konstrukcji wirników młynów nożowych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 5, 49.

- [137] Sykutera D., 2010. Stanowisko badawcze i wstępne wyniki badań cięcia termoplastycznych tworzyw porowatych. *Przetwórstwo Tworzyw* 4(136).
- [138] Sykutera D., 2010. Stanowisko do cięcia i rozdrabniania porowatych tworzyw termoplastycznych. *Zesz. Nauk. Politechniki Poznańskiej* 12.
- [139] Sykutera D., 2011. Badanie procesu cięcia polistyrenu porowatego. *Przetwórstwo Tworzyw* 5(143).
- [140] Sykutera D., 2011. Recykling mechaniczny porowatego polietylenu małej gęstości, *Przetwórstwo Tworzyw* 5(143).
- [141] Sykutera D., 2011. Selected methods of polymer recycled plastic properties evaluation. [W:] *Advanced Grinding – 25<sup>th</sup> anniversary of the comminution in Bydgoszcz*, red. A. Mroziński, M. Macko, Wyd. Fundacji Rozwoju Mechatroniki Bydgoszcz.
- [142] Sykutera D., 2012. Porous polystyrene grinding research. *Journal of Polish CIMAC* 7(3).
- [143] Sykutera D., Bieliński M., 2010. The use of injection moulding process simulation software Cadmould for injection mould designing. *Journal of Polish CIMAC* 5(3).
- [144] Sykutera D., Bieliński M., Czyżewski P., 2010. Wykorzystanie programu Cadmould do symulacji procesu wtryskiwania w projektowaniu modułowej formy badawczej. *Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych*, Pr. zbiorowa pod red. E. Bociąga, Częstochowa.
- [145] Sykutera D., Bieliński M., Pepliński K., 2011. Selected aspects of grinding process research of porous polystyrene. 22. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren Technomer '11, TU Chemnitz.
- [146] Sykutera D., Bieliński M., 2012. Polyethylene property and structure pore modification. *Polymeric Materials 2012*. Martin-Luther University Halle-Wittenberg.
- [147] Sykutera D., Blomberg S., 2012. Podajnik do precyzyjnego dozowania materiałów w badaniach procesu cięcia tworzyw polimerowych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* nr 3, 51.
- [148] Sykutera D., Czyżewski P., 2012. Badanie procesu rozdrabniania i cięcia odpadów wtryskowych z kopolimeru jonomerowego Surlyn<sup>®</sup>. *Przetwórstwo Tworzyw* 3(144).
- [149] Sykutera D., Czyżewski P., 2012. Recycling abilities of thermoplastic ionomers, as exemplified by Surlyn<sup>®</sup>. *Journal of Polish Cimac* 7(3).
- [150] Sykutera D., Hejnowski M., 2006a. Badanie kopolimerów jonomerowych w recykulacji. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* nr 3, 45.
- [151] Sykutera D., Hejnowski M., 2006b. Cięcie nożowe tworzyw transmisyjnych o wysokiej udarności. *Zesz. Nauk. ATR Bydgoszcz, Chemia i Technologia Chemiczna* 11.
- [152] Sykutera D., Hejnowski M., 2008. Wykorzystanie symulacji procesu wtryskiwania do przetwórstwa tworzyw jonomerowych. *Przetwórstwo materiałów polimerowych*, pr. zbiorowa pod red. J. Koszkuła i E. Bociągi, Częstochowa.
- [153] Sykutera D., Krupiński W., Hejnowski M., Nowak M., 2008. Symulacja procesu wtryskiwania poliamidu 6.6. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 5, 47.
- [154] Szala G., 2008. Experimental tests of technological shear modulus of grain materials. Part I. Methodology and testing equipment. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 3, 47.



- [155] Szala G., 2011. Cereal grains refinement mechanics through the technological shear. [W:] *Advanced Grinding – 25<sup>th</sup> anniversary of the comminution in Bydgoszcz*, red. A. Mroziński, M. Macko, Wyd. Fundacji Rozwoju Mechatroniki Bydgoszcz.
- [156] *The Compelling Facts About Plastics*, 2011. Plastic Europe Market Research Group (PEMRG), Plastics Europe, Belgium.
- [157] *The Compelling Facts About Plastics 2012*. Plastic Europe Market Research Group (PEMRG), Plastics Europe, Belgium.
- [158] Tomporowski A., 2011. Uniformity kinematic and dynamic shredding materials industry agro-food. [W:] *Advanced Grinding – 25<sup>th</sup> anniversary of the comminution in Bydgoszcz*, red. A. Mroziński, M. Macko, Wyd. Fundacji Rozwoju Mechatroniki Bydgoszcz.
- [159] Vu Thi B.N., Vu-Khanh T., Lara J., 2005. Effect of Friction on Cut Resistance of Polymers. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 18(1).
- [160] Yuan Y.Ch., Zhang C.H., McKenna G., Korzeniowski C., Li J., 2007. Experimental studies on cryogenic recycling of printed circuit board. *International Journal Advanced Manufacturing Technology* 34.
- [161] Wilczek M., Bertling J., Hintermann D., 2004. Optimised technologies for cryogenic grinding. *International Journal of Mineral Processing* 74S.
- [162] Woldt D., 2009. Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe in Rotorchen und – reisen. Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- [163] Wüstenberg D., Bauer W., 1997. Die Grundlagen der Schneidtechnologie, Abfallzerkleinerung – Grundlagen und praktische Erfahrungen. Vorträge zum 48. Berg- und Hüttenmännischen Tag 1997 in Freiberg, Freiburger Forschungshäfte A840.
- [164] Zawistowski H., Frenkel D., 2007. Formy wtryskowe. Dokumentacja obiegowa przy zamawianiu i odbiorze. Plastech Warszawa.
- [165] Zimniak J. 2003. Analyse von Grundprozessen der Aufbereitung von Kompositwerkstoffen aus ausgewählten Kunststoff- und Gummiabfällen. Technische Universität Chemnitz, Habilitationsschrift.
- [166] Zimniak J., 2005. Energetyczna weryfikacja nowej techniki rozdrabniania próbek polimerowych PS i PVC. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 1-2, 44.
- [167] Zimniak J., 2008. Rozdrabnianie materiałów polimerowych. *Przetwórstwo Materiałów Polimerowych*, pr. zbiorowa pod red. J. Koszkula i E. Bociągi, Wyd. Politechniki Częstochowskiej.
- [168] Zimniak J., 2001. Rotary knife cutting in plastic recycling [W:] *Advanced Grinding – 25<sup>th</sup> anniversary of the comminution in Bydgoszcz*, red. A. Mroziński, M. Macko, Wyd. Fundacji Rozwoju Mechatroniki Bydgoszcz.

# BADANIA PROCESÓW CIĘCIA I PODATNOŚCI NA ROZDRABNIANIE POLIOLEFIN POROWATYCH W ASPEKCIE ICH WTÓRNEGO PRZETWÓRSTWA

## Streszczenie

Recykling mechaniczny zużytych wytworów polimerowych odbywa się zwykle w złożonych systemach, w których zasadniczą rolę odgrywają procesy separacji, czyszczenia i dezintegracji. Przedmiotem rozprawy były badania procesów cięcia i rozdrabniania poliolefin o strukturze porowatej w aspekcie ich ponownego wykorzystania w przetwórstwie. Na podstawie analizy stanu literatury omówiono stan badań rozdrabniania tworzyw porowatych, scharakteryzowano procesy cięcia i rozdrabniania, a także odniesiono się do rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń do rozdrabniania tworzyw polimerowych. Przedstawiono także wpływ głównych czynników konstrukcyjnych i technologicznych na efektywność procesu rozdrabniania. Głównym celem badań doświadczalnych było podniesienie efektywności procesu dezintegracji tworzyw poliolefinowych o strukturze porowatej, a zwłaszcza ustalenie charakterystycznych, korzystnych parametrów konstrukcyjno-technologicznych procesów cięcia i rozdrabniania ze względu na możliwość dalszego przetwórstwa uzyskanych recyklatów porowatych w standardowych maszynach do wytłaczania i wtryskiwania termoplastów. Dążono do ustalenia wzajemnych relacji pomiędzy procesami składowymi, z uwzględnieniem specyfiki porowatej nadawy o właściwościach sprężysto-plastycznych.

Badaniom poddano porowate tworzywa poliolefinowe wytworzone w warunkach laboratoryjnych metodą wtryskiwania i wytłaczania z wykorzystaniem poroforów chemicznych o różnej charakterystyce. Ze względu na specyfikę dwufazowej struktury tworzyw porowatych procesy rozdrabniania i cięcia realizowano w specjalnie skonstruowanych stanowiskach badawczych. Analizowano wpływ cech konstrukcyjnych rozdrabniacza, zwłaszcza jego układu tnącego, na przebieg cięcia, opisany między innymi poprzez pomiar siły na nożu ruchomym i nieruchomym. Oszacowano także wpływ warunków technologicznych procesu rozdrabniania na jego efektywność, stosując ocenę wielokryterialną. Dla dużej próby badawczej ziaren recyklatów wyznaczono zbiór wskaźników określających ich cechy geometryczne. Badania te stanowiły podstawę do ustalenia korzystnego, w aspekcie wtórnego przetwórstwa, rozkładu uziarnienia rozdrobnionych poliolefin porowatych. Oznaczono ponadto podatność na przetwarzanie otrzymanych recyklatów. Do wytworzenia materiału wtórnego wykorzystano dwugniazdową formę z wymiennymi wkładami z systemem gorącokanałowym oraz wtryskarkę o napędach elektrycznych. Porównano wyniki badań właściwości mechanicznych wyprasek wtórnych do materiałów porowanych w pierwotnym przetwórstwie, a także odniesiono je do stopnia rozdrobnienia recyklatów.

Weryfikację uzyskanych rezultatów dotyczących wtórnego wtryskiwania recyklatów poliolefin porowatych był eksperyment przeprowadzony w warunkach przemysłowych, na przykładzie wytwarzania grubościennego elementu konstrukcyjnego, stosowanego w przemyśle samochodowym.

W celu rozszerzenia i pogłębienia interpretacji wyników przeprowadzono badania stopnia krystaliczności i rozkładu porów w strukturze materiałów wtórnych. Wyniki badań eksperymentalnych pozwoliły na ustalenie korzystnych rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych dotyczących realizacji procesów składowych recyklingu mechanicznego poliolefin porowatych. Rozprawę zakończono podsumowaniem oraz wnioskami o charakterze poznawczym i utylitarnym.

# **THE SURVEY OF GRINDING PROCESSES OF POROUS POLYOLEFIN AND THEIR DISINTEGRATION SUSCEPTIBILITY CONSIDERED IN THE ASPECT OF THEIR RE-PROCESSING**

## **Summary**

Mechanical recycling of waste polymer products is usually conducted within complex systems, where the processes of separation, cleaning and grinding are of major importance. The subject of the present dissertation was the study of porous structure polyolefin cutting and grinding processes considered in the aspect of their re-use in processing. On the basis of current bibliography analysis, the status of the survey of porous plastic material grinding was discussed, physical models of cutting and grinding processes were presented as well as constructional solutions of polymer material grinding devices were referred to. Furthermore, the influence of major constructional and technological factors on the grinding process effectiveness was characterised. The primary target of experimental survey was to increase the effectiveness of porous structure polyolefin disintegration process, in particular – to define specific positive constructional-technological parameters of cutting and grinding from the point of view of the possibility of further processing of the porous recyclates obtained in standard thermoplastic material extrusion and injection machines. The pursued goal was to define the inter-relationship among the constitutive processes, taking into account the specifics of porous input material elasticity-plastic properties.

The survey was conducted upon porous polyolefin materials obtained in laboratory conditions by extrusion and injection moulding with the use of chemical porophores of differentiated characteristics. Due to the specifics of two-phase porous plastic material structure, the processes of grinding and cutting were realised at specially designed research stations. The influence of the grinder constructional features, especially its cutting unit, on the cutting efficiency, defined among others by the measurement of the force on the moving and fixed knives was analysed. Additionally, the influence of technological conditions of grinding process on its effectiveness was estimated with the use of multi-criteria evaluation. A set of factors defining their geometrical features was determined for a large survey sample of recyclate grains. The survey composed a basis to define the advantageous from the point of view of re-processing ground porous polyolefin granule distribution. In addition, the susceptibility of the obtained recyclate to processing was defined. A two-nest mould with interchangeable inserts and hot-runner system plus electrical injection machine were used to produce the recyclate. The results of testing the mechanical properties of recyclates were compared with porous materials in primary processing; moreover, the results were referred to the recyclate granularity degree.

The verification of the obtained results concerning porous polyolefin recyclate injection moulding was an experiment conducted in industrial conditions on the example of a thick-walled constructional part for automotive industry.

In order to extend and deepen the interpretation of the recyclate testing results, a study of their crystallisation degree and pore distribution in their structure was conducted. The experimental research results allowed to define advantageous constructional-technological solutions concerning the realisation of constitutive processes of porous polyolefin mechanical recycling. The dissertation is recapitulated with conclusions of cognitive and utilitarian character.