

Optymalizacja procesu wyłaczania jednoślimakowego tworzyw polimerowych z dozowanym zasilaniem – badania doświadczalne

Andrzej Nastaj¹⁾

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2020.5.6

Streszczenie: Wykonano badania optymalizacyjne procesu wyłaczania jednoślimakowego tworzyw polimerowych z dozowanym zasilaniem wyłaczarki. Przeprowadzono doświadczalną optymalizację wybranych parametrów wyłaczania: prędkości obrotowej ślimaka i długości strefy dozowania ślimaka według kryteriów maksymalnej wydajności i minimalnego natężenia prądu silnika wyłaczarki. Stwierdzono, że optymalizacja na podstawie badań doświadczalnych jest kosztowna i czasochłonna. Wstępnie zaproponowano optymalizację wyłaczania na podstawie badań symulacyjnych procesu z użyciem technik ewolucyjnych (algorytmów genetycznych). W tym celu zastosowano opracowany program symulacji wyłaczania GSEM. Wyniki badań optymalizacyjnych na podstawie specjalnie zbudowanego programu optymalizacji ewolucyjnej GASEO zostaną przedstawione w części drugiej artykułu.

Słowa kluczowe: wyłaczanie jednoślimakowe, optymalizacja, modelowanie.

Optimization for starve fed single screw extrusion of polymeric materials – experimental studies

Abstract: Optimization studies have been performed on the starve fed single screw extrusion of polymeric materials. Experimental optimization of the selected process parameters, screw rotation speed and screw metering section length has been performed from the point of view maximum extrusion output and minimum current intensity of the extruder motor. It has been stated that experimental optimization is extremely expensive and time consuming. Optimization based on the process simulation and using evolutionary techniques (genetic algorithms) has been initially proposed. Extrusion simulation software GSEM has been used to this aim, and the optimization program GASEO has been developed to optimize the process. The results of optimization have been presented in the second part of the paper.

Keywords: single screw extrusion, optimization, modeling.

Komputerowe modelowanie procesów przetwórstwa tworzyw polimerowych stanowi obecnie podstawowe narzędzie ich projektowania. Systemy CAD/CAE (komputerowe wspomaganie projektowania/komputerowe wspomaganie prac inżynierskich) umożliwiają symulację procesów przetwórczych z wykorzystaniem danych materiałowych, technologicznych i geometrycznych. Zwykle jednak systemy te nie umożliwiają optymalizacji warunków przetwórstwa wg określonych kryteriów optymalizacji, np. maksymalizacji wydajności procesu lub minimalizacji zużycia energii [1, 2].

Wyłaczanie stanowi podstawową i najbardziej masową technikę przetwórstwa tworzyw. Optymalizacja tego procesu jest zagadnieniem wyjątkowo złożonym, gdyż liczba parametrów i kryteriów optymalizacji pro-

cesu (materiałowych, technologicznych i geometrycznych) jest bardzo duża, a kryteria optymalizacji są często przeciwstawne, np. wydajność procesu i zużycie energii.

Wyłaczanie może być realizowane w warunkach zasilania grawitacyjnego lub zasilania z dozowanym zasilaniem tworzywa. Wyłaczarki jednoślimakowe są zwykle zasilane grawitacyjnie, natomiast wyłaczarki dwuślimakowe w sposób dozowany.

W wyłaczarce jednoślimakowej zasilanej grawitacyjnie ślimak pobiera tworzywo z zasobnika bez ograniczeń, jest więc całkowicie wypełniony tworzywem. Tworzywo uplastycznia się powoli i jest słabo wymieszane. Wydajność wyłaczania zależy głównie od prędkości obrotowej ślimaka.

W wyłaczarce dwuślimakowej zasilanej w sposób dozowany ślimaki w początkowej części nie są całkowicie wypełnione tworzywem i nie jest tu generowane ciśnienie. Tworzywo uplastycznia się szybciej i jest lepiej wymieszane. Wydajność wyłaczania nie zależy od prę-

¹⁾ Politechnika Warszawska, Instytut Technik Wytwarzania, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa.
e-mail: andrzej.nastaj@wip.pw.edu.pl

kości obrotowej ślimaków, ale jest określana przez wydajność dozownika.

Zalety wytłaczania dwuślimakowego z dozowanym zasilaniem skłaniają do prób zastosowania dozowanego zasilania w procesie wytłaczania jednoślimakowego.

Badania wytłaczania jednoślimakowego z dozowanym zasilaniem były, jak dotąd, stosunkowo nieliczne, np. [3, 4]. Dopiero niedawno Wilczyński i współpr. [5, 6], opierając się na wynikach badań doświadczalnych, zaproponowali mechanizm i model uplastyczniania tworzywa w wytłaczarce zasilanej w sposób dozowany, wyróżniając uplastycznianie wskutek przewodzenia ciepła w strefie niewypełnionego ślimaka oraz uplastycznianie dyspersyjne w strefie wypełnionego ślimaka. Na tej podstawie autorzy opracowali pierwszy całościowy model wytłaczania jednoślimakowego z dozowanym zasilaniem [7].

Optymalizacja polega na budowaniu, na podstawie parametrów wejściowych, wielowymiarowej przestrzeni parametrów wyjściowych procesu (tzw. przestrzeni odpowiedzi) oraz poszukiwaniu wartości ekstremalnych parametrów wyjściowych w tej przestrzeni (maksimum lub minimum). Optymalizacja procesu może być prowadzona na podstawie danych doświadczalnych lub symulacyjnych, przy czym efektywniejsza jest optymalizacja oparta na symulacji procesu.

Najbardziej korzystne są zintegrowane systemy symulacyjno-optymalizujące. Są one jednak, jak dotąd, praktycznie niedostępne na rynku. Badania nad takimi systemami prowadzi się jedynie w kilku ośrodkach na świecie, specjalizujących się zarówno w modelowaniu procesu wytłaczania, jak i zagadnieniach optymalizacji.

Obszerny przegląd literatury z zakresu optymalizacji procesu wytłaczania przedstawiono ostatnio w pracach własnych [1, 2].

Pierwsze badania optymalizacyjne wytłaczania realizowano na podstawie danych doświadczalnych, np. Underwood [8], Verbraak i Meijer [9], a także Płochocki [10] i Stasiak [11]. Natomiast pierwszych prób optymalizacji na podstawie teoretycznego modelu procesu dokonali Maddock i Smith [12] oraz Helmy i Parnaby [13], z zastosowaniem symulacji wytłaczania i analizy regresji. Rozwój technik komputerowych przyczynił się do istotnego postępu w zakresie optymalizacji. Opracowano efektywne komputerowe modele wytłaczania, udostępniono też wydajne systemy komputerowej analizy danych. Początkowo stosowano metody statystyczne, np. Potente i Krell [14, 15] na bazie systemu REX [16, 17], Lafleur i Thibodeau [18] na podstawie systemu Ecole Polytechnique de Montreal [19], a także Autor tej pracy [20] na bazie systemu SSEM [21, 22]. Istotne ograniczenie metod statystycznych stanowi konieczność przeprowadzenia badań w przestrzeni odpowiedzi o bardzo dużej gęstości parametrów oraz niepożądane uzyskanie ekstremów lokalnych, a nie globalnych.

Znaczący postęp w zakresie optymalizacji wytłaczania nastąpił w wyniku wykorzystania technik sztucznej inteligencji, zwłaszcza algorytmów genetycznych. Duże znacze-

nie mają tutaj prace Covasa i Cunhi dotyczące tradycyjnego wytłaczania jednoślimakowego z zasilaniem grawitacyjnym [23–26] oraz wytłaczania dwuślimakowego współbieżnego [27–29]. Autor niniejszej pracy również przedstawił próbę kompleksowego rozwiązania optymalizacyjnego w odniesieniu do klasycznego wytłaczania jednoślimakowego [1, 2].

Jak dotąd brakuje rozwiązań optymalizacyjnych procesu wytłaczania jednoślimakowego z dozowanym zasilaniem wytłaczarki oraz wytłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego [30], chociaż ostatnio opracowano modele matematyczne wytłaczania jednoślimakowego z dozowanym zasilaniem [31–34] oraz wytłaczania przeciwbieżnego [35, 36].

W niniejszej pracy przedstawiono oryginalne rozwiązanie optymalizacyjne wytłaczania z dozowanym zasilaniem wytłaczarki na podstawie wyników badań doświadczalnych i symulacyjnych technik ewolucyjnych.

Techniki ewolucyjne charakteryzują się m.in. tym, że:

- poszukiwanie rozwiązania obejmuje pewną populację punktów, dzięki temu prawdopodobieństwo utknięcia w ekstremum lokalnym jest mniejsze;
- stosuje się probabilistyczne, a nie deterministyczne reguły wyboru;
- określenie nowego obszaru poszukiwań uwzględnia wyniki przeprowadzonych doświadczeń, dzięki temu unika się przypadkowego błędzenia;
- wykorzystuje się tylko funkcje celu, a nie jej pochodne.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

W próbach doświadczalnych zastosowano polietylen (HDPE) Rigidex 6070EA (firmy BP Chemicals) charakteryzujący się gęstością $\rho = 0,952 \text{ g/cm}^3$, wskaźnikiem szybkości płynięcia $MFR = 7,6 \text{ g/10 min}$ (190°C ; $2,16 \text{ kg}$) i temperaturą topnienia $T_f = 135^\circ\text{C}$. Charakterystykę cieplno-mechaniczną tego tworzywa przedstawiono w pracy [1].

Właściwości reologiczne tworzywa opisano równaniem Kleina:

$$\ln \eta = A_0 + A_1 \ln \dot{\gamma} + A_{11} \ln^2 \dot{\gamma} + A_{12} T \ln \dot{\gamma} + A_2 T + A_{22} T^2 \quad (1)$$

gdzie: η – lepkość, $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania, T – temperatura.

Parametry tego równania ($A_0 = 10,918378968$, $A_1 = -0,218405893$, $A_{11} = -0,036865332$, $A_{12} = 0,001025862$, $A_2 = -0,022682083$, $A_{22} = 0,000021151$) wyznaczano na podstawie równania Crossa-WLF w zakresie temperatury $160\text{--}220^\circ\text{C}$ i szybkości ścinania $1\text{--}20\ 000 \text{ 1/s}$, korzystając z bazy materiałowej programu Autodesk-Moldflow [37].

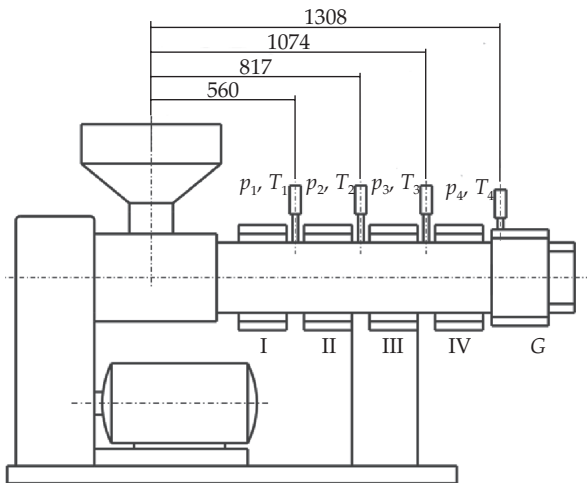
Program badań

Program badań obejmował wytłaczanie jednoślimakowe z dozowanym zasilaniem polietylenu dużej gęstości

(HDPE), w szczególności wyznaczenie podstawowych parametrów procesu: ciśnienia, masowego natężenia przepływu tworzywa oraz poboru prądu przez silnik wylączarki. Na podstawie obserwacji próbek tworzywa zdjętych ze ślimaka wylączarki po jej unieruchomieniu i szybkim ochłodzeniu (ang. *screw pulling-out technique*) dokonano również oceny mechanizmu przepływu i uplastyczniania tworzywa.

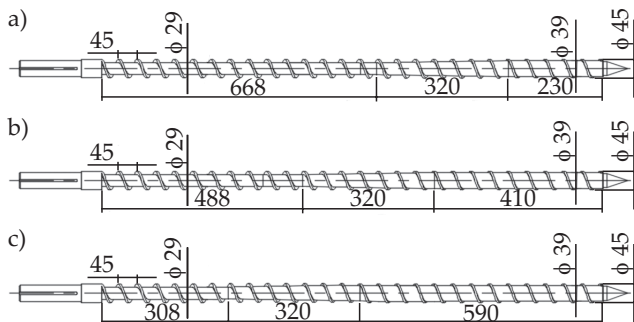
Stanowisko badawcze

Badania prowadzono na stanowisku badawczym procesu wylączania (rys. 1) obejmującym wylączarkę jednoślindakową Metalchem T-45 o średnicy cylindra $D = 45$ mm i stosunku długości do średnicy $L/D = 27$. Wykorzystano klasyczne ślimaki trójstrefowe oraz głowicę prostą do wylączania prętów o przekroju kołowym o średnicy $D_p = 5$ mm. Ślimaki różniły się długością strefy dozowania i zasilania (rys. 2).



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: rozmieszczenie czujników ciśnienia i temperatury (p_1, T_1-p_4, T_4): I-IV – strefy wylączarki, G – głowica

Fig. 1. Extrusion test stand: location of sensors of pressure and temperature (p_1, T_1-p_4, T_4): I-IV – extruder sections, G – extrusion die



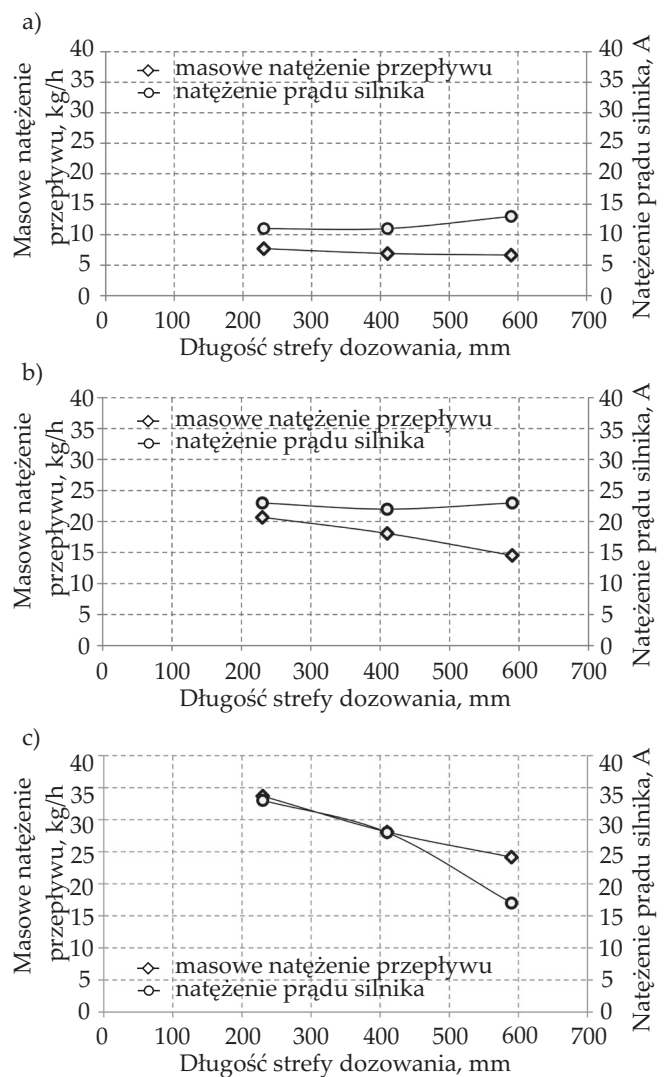
Rys. 2. Ślimaki: a) długość strefy dozowania $L_d = 230$ mm, b) $L_d = 410$ mm, c) $L_d = 590$ mm [1]

Fig. 2. Screws: a) length of metering section $L_d = 230$ mm, b) $L_d = 410$ mm, c) $L_d = 590$ mm [1]

Wylączanie prowadzono z zastosowaniem dwóch poziomów dozowania, równych 90% i 95% wydajności uzyskiwanej podczas wylączania klasycznego, w warunkach trzech różnych prędkości obrotowych ślimaka: $N = 20, 50$ i 80 obr./min. Ustalono następujące wartości temperatury cylindra i głowicy w kolejnych strefach wylączarki: $T_I = 150^\circ\text{C}$, $T_{II} = 180^\circ\text{C}$, $T_{III} = 210^\circ\text{C}$, $T_{IV} = 210^\circ\text{C}$, $T_G = 210^\circ\text{C}$.

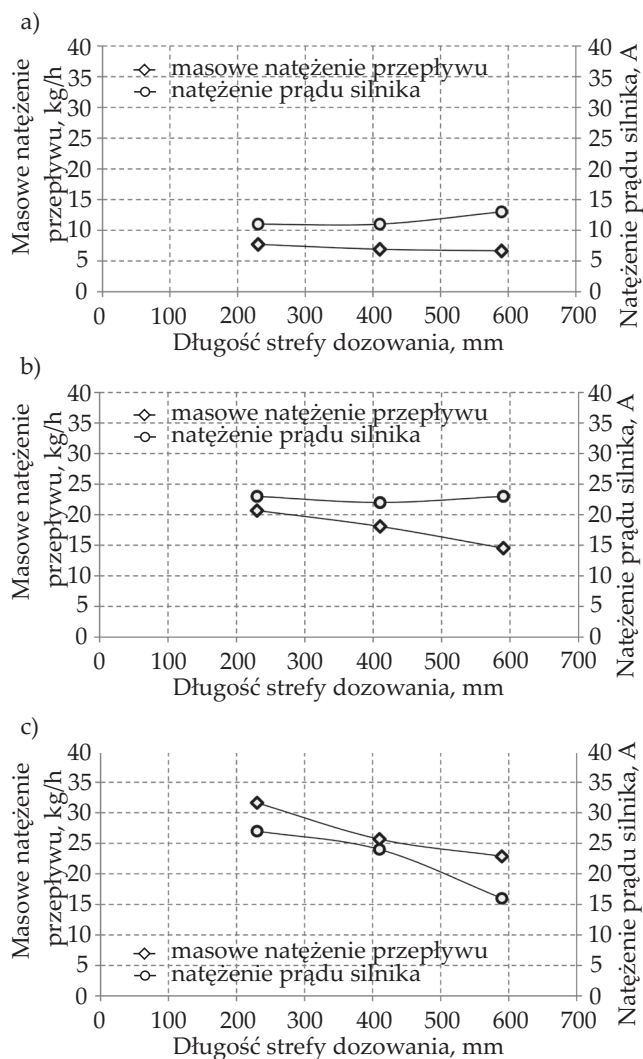
WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Ogólną charakterystykę procesu obrazują rys. 3–5. Rysunki 3 i 4 przedstawiają wpływ prędkości obrotowej ślimaka i długości strefy dozowania ślimaka na pobór prądu przez silnik wylączarki. Widać wyraźnie, że wraz



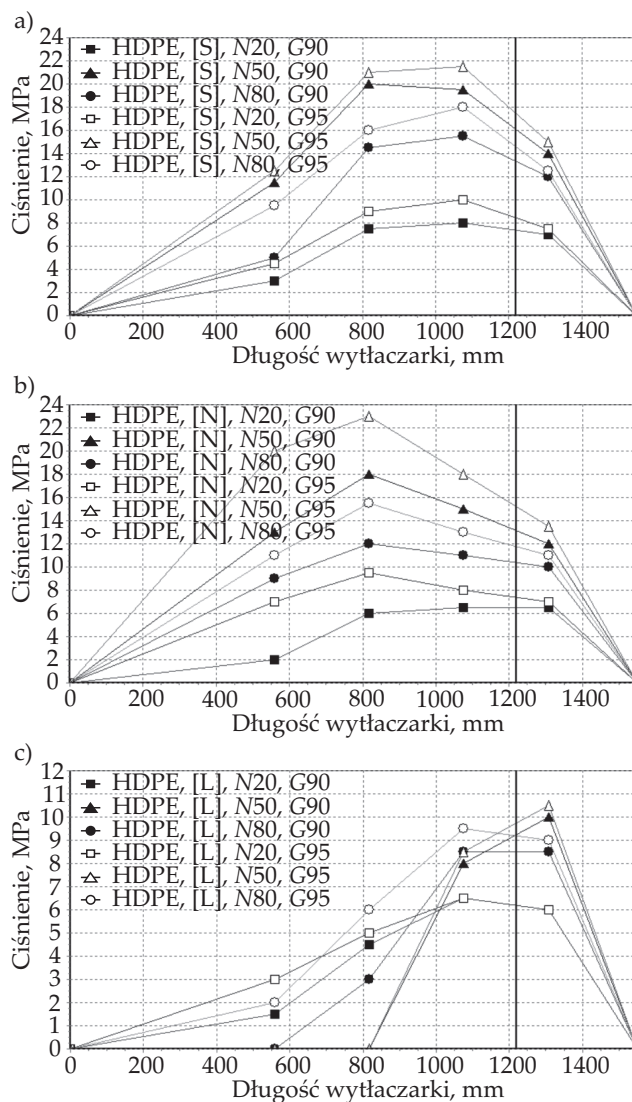
Rys. 3. Wpływ długości strefy dozowania ($L_d = 230$ mm [S], 410 mm [N], 590 mm [L]) na natężenie prądu silnika, dozowanie tworzywa $G = 0,95 G_{graw}$ – dane doświadczalne: a) prędkość obrotowa ślimaka $N = 20$ obr./min, b) $N = 50$ obr./min, c) $N = 80$ obr./min

Fig. 3. Effect of the metering section length ($L_d = 230$ mm [S], 410 mm [N], 590 mm [L]) on the current intensity, at the polymer dosing $G = 0,95 G_{graw}$ – experimental data: a) screw speed $N = 20$ rpm, b) $N = 50$ rpm, c) $N = 80$ rpm



Rys. 4. Wpływ długości strefy dozowania ($L_d = 230$ mm [S], 410 mm [N], 590 mm [L]) na natężenie prądu silnika, dozowanie tworzywa $G = 0,9 G_{graw}$ – dane doświadczalne: a) prędkość obrotowa ślimaka $N = 20$ obr./min, b) $N = 50$ obr./min, c) $N = 80$ obr./min Fig. 4. Effect of the metering section length ($L_d = 230$ mm [S], 410 mm [N], 590 mm [L]) on the current intensity, at the polymer dosing $G = 0.9 G_{graw}$ – experimental data: a) screw speed $N = 20$ rpm, b) $N = 50$ rpm, c) $N = 80$ rpm

ze zwiększającą się prędkością obrotową ślimaka zwiększa się zużycie prądu. Natomiast, gdy rośnie długość strefy dozowania ślimaka i, odpowiednio, zmniejsza się długość strefy zasilania, pobór prądu maleje, co można tłumaczyć tym, że zmniejsza się ciśnienie w wylączarce. Rysunek 5 ilustruje wpływ długości strefy dozowania na profil ciśnienia, w warunkach różnej prędkości obrotowej ślimaka. Jak można zauważyć, ciśnienie w wylączarce rośnie wraz ze zwiększającym się poziomem dozowania tworzywa oraz wzrostem prędkości obrotowej ślimaka.



Rys. 5. Wpływ długości strefy dozowania ($L_d = 230$ mm [S], 410 mm [N], 590 mm [L]) na rozkład ciśnienia przy dozowaniu tworzywa $G = 0,90 G_{graw}$ i $G = 0,95 G_{graw}$ – dane doświadczalne: a) długość strefy dozowania $L_d = 230$ mm, b) $L_d = 410$ mm, c) $L_d = 590$ mm Fig. 5. Effect of the metering section length ($L_d = 230$ mm [S], 410 mm [N], 590 mm [L]) on the pressure profile at the polymer dosing $G = 0.90 G_{graw}$ and $G = 0.95 G_{graw}$ – experimental data: a) metering section length $L_d = 230$ mm, b) $L_d = 410$ mm, c) $L_d = 590$ mm

OPTIMALIZACJA

Na podstawie wyników badań doświadczalnych przeprowadzono optymalizację parametrów technologicznych i geometrycznych wylączarki (prędkości obrotowej ślimaka i długości strefy dozowania) wg kryterium maksymalnej wydajności Q_{maks} i minimalnego poboru prądu I_{min} . Takie indywidualne kryteria stanowią podstawę do utworzenia kryterium globalnego, tzw. globalnej funkcji celu.

Globalną funkcję celu zdefiniowano jako:

$$F_i = \sqrt[2]{Q_i I_i} \quad (2)$$

gdzie parametry wyjściowe procesu zostały znormalizowane jako

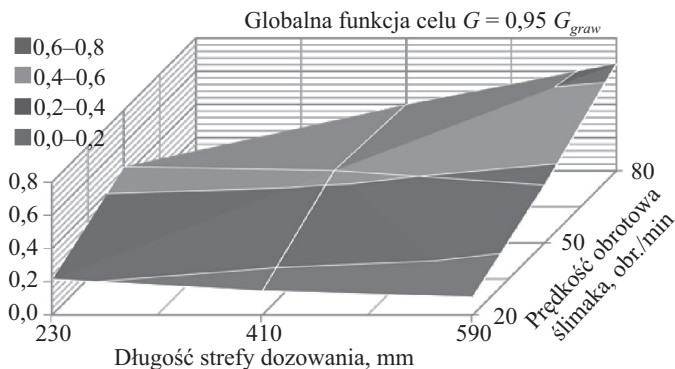
$$Q_{i_znorm} = \frac{Q_i - Q_{min}}{Q_{maks} - Q_{min}} \quad (3)$$

$$I_{i_znorm} = \frac{I_{maks} - I_i}{I_{maks} - I_{min}} \quad (4)$$

gdzie: F_i – globalna funkcja celu, Q_{i_znorm} – znormalizowana wydajność procesu (masowe natężenie przepływu tworzywa), I_{i_znorm} – znormalizowane natężenia prądu silnika, i – kolejna wartość parametru ze zbioru danych.

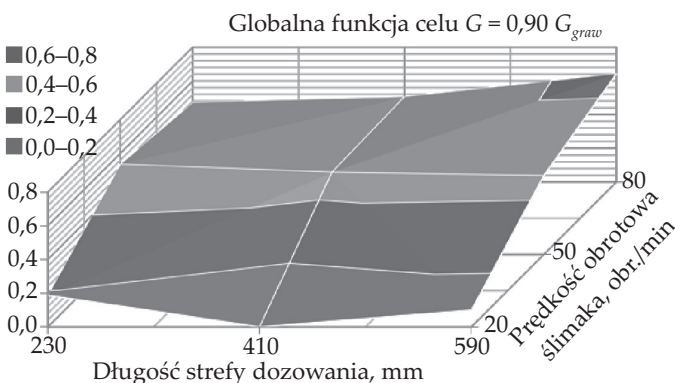
Wartości maksymalne i minimalne wielkości wyjściowych procesu (kryteriów optymalizacji), uzyskane na podstawie badań doświadczalnych, wynosiły, odpowiednio: $Q_{maks} = 33,675$ kg/h, $Q_{min} = 6,274$ kg/h, $I_{maks} = 33,0$ A, $I_{min} = 8,0$ A.

Wyniki obliczeń globalnej funkcji celu w wypadku wytłaczania z dozowanym zasilaniem tworzywa na poziomie $G = 0,95 G_{graw}$ zestawiono w tabeli 1 i zobrazowano na rys. 6.



Rys. 6. Wykres globalnej funkcji celu dla danych doświadczalnych; dozowanie tworzywa $G = 0,95 G_{graw}$

Fig. 6. Global objective function for experimental data at the polymer dosing $G = 0,95 G_{graw}$



Rys. 7. Wykres globalnej funkcji celu dla danych doświadczalnych; dozowanie tworzywa $G = 0,9 G_{graw}$

Fig. 7. Global objective function for experimental data at the polymer dosing $G = 0,9 G_{graw}$

T a b e l a 1. Wartości globalnej funkcji celu F_i dla danych doświadczalnych; dozowanie tworzywa $G = 0,95 G_{graw}$

T a b l e 1. Global objective function F_i for experimental data at the polymer dosing $G = 0,95 G_{graw}$

N , obr./min	$L_d = 230$ mm	$L_d = 410$ mm	$L_d = 590$ mm
20	0,21505	0,14348	0,10575
50	0,45868	0,43539	0,34727
80	0,00000	0,39896	0,64620

T a b e l a 2. Wartości globalnej funkcji celu F_i dla danych doświadczalnych; dozowanie tworzywa $G = 0,9 G_{graw}$

T a b l e 2. Global objective function F_i for experimental data at the polymer dosing $G = 0,9 G_{graw}$

N , obr./min	$L_d = 230$ mm	$L_d = 410$ mm	$L_d = 590$ mm
20	0,18858	0,00000	0,09904
50	0,53528	0,41756	0,46839
80	0,47119	0,41228	0,64184

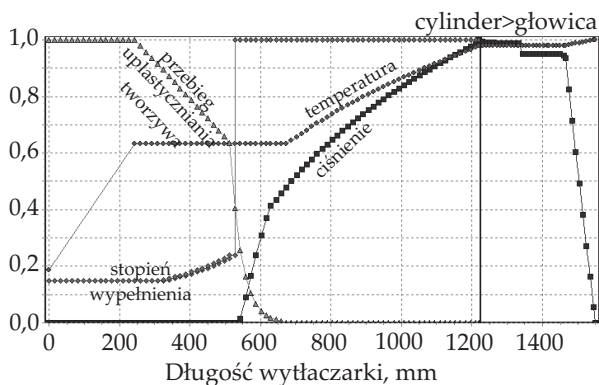
Natomiast wyniki obliczeń dotyczące wytłaczania z dozowanym zasilaniem tworzywa na poziomie $G = 0,90 G_{graw}$ podano w tabeli 2 i na rys. 7. Największą wartość funkcji celu ($F_i = 0,64620$) uzyskano w wypadku zastosowania ślimaka z długą strefą dozowania ($L_d = 590$ mm), przy prędkości obrotowej ślimaka $N = 80$ obr./min i dozowaniu tworzywa $G = 0,95 G_{graw}$. Te parametry są optymalne wg przyjętych kryteriów optymalizacji: maksymalnej wydajności i minimalnego poboru prądu ($L_{d_opt} = 590$ mm, $N_{opt} = 80$ obr./min, $G = 0,95 G_{graw}$). Parametrami optymalnym odpowiadają następujące wartości wielkości wyjściowych procesu:

- masowe natężenie przepływu: 24,15 kg/h;
- natężenie prądu silnika: 17 A.

BADANIA SYMULACYJNE

Przedstawioną optymalizację przeprowadzono na podstawie badań doświadczalnych. Takie badania są czasochłonne i kosztowne, a często, w wypadku szerszego programu optymalizacji, praktycznie niemożliwe do wykonania. Dlatego też podjęto próbę optymalizacji wytłaczania z dozowanym zasilaniem, bazując na badaniach symulacyjnych z zastosowaniem technik ewolucyjnych (algorytmów genetycznych). Tego typu badania prowadzono po raz pierwszy na świecie, ponieważ do niedawna nie było możliwości modelowania przedmiotowego procesu.

Badania prowadzono z wykorzystaniem modelu opracowanego w Zakładzie Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych Politechniki Warszawskiej, zrealizowanego w postaci programu GSEM (ang. *Global Screw Extrusion Model*), który umożliwia symulację procesu wytłaczania jednoślakowego z dozowanym zasilaniem wytłaczarki. Program ten stanowi element budowanego w Zakładzie PTS Politechniki Warszawskiej wielozadaniowego systemu modelowania, optymalizacji i skalo-



Rys. 8. Ogólna charakterystyka procesu wytłaczania z dozowanym zasilaniem tworzywa (długość strefy dozowania $L_d = 590$ mm, prędkość obrotowa ślimaka $N = 50$ obr./min)

Fig. 8. General characteristics of starve fed extrusion process (metering section length $L_d = 590$ mm, screw speed $N = 50$ rpm)

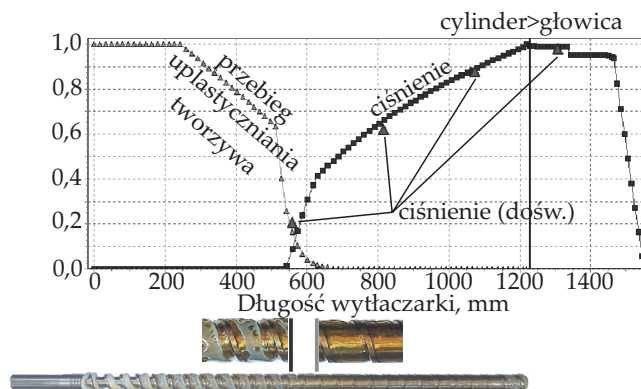
wania procesów ślimakowych przetwórstwa tworzyw – Multi-Screw System.

Przykładowe wyniki obliczeń symulacyjnych, przedstawione na rys. 8, pokazują ogólną charakterystykę wytłaczania, która obejmuje podstawowe parametry procesu: rozkład ciśnienia i temperatury, zużycie mocy, przebieg uplastyczniania tworzywa oraz stopień wypełnienia ślimaka.

Szczególnie ważnym, a wyjątkowo trudnym do modelowania parametrem charakteryzującym proces wytłaczania jest profil uplastyczniania tworzywa *SBP* (ang. *Solid Bed Profile*), definiowany stosunkiem objętości tworzywa w stanie stałym do całkowitej objętości tworzywa w rozpatrywanej objętości kanału ślimaka. W wypadku klasycznego wytłaczania z zasilaniem grawitacyjnym jest to stosunek szerokości warstwy stałej tworzywa X do szerokości kanału W , czyli $SBP = X/W$. W początkowej części ślimaka, gdy kanał ślimaka jest całkowicie wypełniony tworzywem w stanie stałym, $SBP = 1$, w części końcowej, gdy tworzywo jest już całkowicie uplastycznione, $SBP = 0$, natomiast w fazie uplastyczniania $0 < SBP < 1$. Na podstawie profilu *SBP* można ocenić, czy tworzywo uplastyczni się całkowicie w wytłaczarce. Ważne, aby uplastycznianie zachodziło stosunkowo szybko, wówczas powstają odpowiednie warunki czasu i przestrzeni do uzyskania odpowiedniego stopnia wymieszania tworzywa.

W wypadku wytłaczania z dozowanym zasilaniem wytłaczarki stopień uplastyczniania jest definiowany stosunkiem objętości tworzywa w stanie stałym do całkowitej objętości tworzywa w rozpatrywanej objętości kanału ślimaka, która wynika z założonych parametrów symulacji (długości obliczeniowej przestrzeni elementarnej ślimaka).

Ważnym parametrem modelowania jest również profil stopnia wypełnienia ślimaka wytłaczarki wzdłuż jego długości FF (ang. *Fill Factor*), definiowany stosunkiem objętości tworzywa w kanale ślimaka do całkowitej objętości tego kanału. Stopień wypełnienia $FF = 1$ oznacza, że kanał jest całkowicie wypełniony tworzywem, natomiast stopień



Rys. 9. Rozkład ciśnienia i przebieg uplastyczniania tworzywa w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem tworzywa (długość strefy dozowania $L_d = 590$ mm, prędkość obrotowa ślimaka $N = 50$ obr./min) – wyniki badań symulacyjno-doświadczalnych

Fig. 9. Pressure profile and polymer melting course for starve fed extrusion (metering section length $L_d = 590$ mm, screw speed $N = 50$ rpm) – simulation and experimental data

wypełnienia $FF = 0$, oznacza że kanał ślimaka jest pusty. W wypadku stopnia wypełnienia w zakresie $0 < FF < 1$ kanał ślimaka jest częściowo wypełniony tworzywem.

W klasycznym wytłaczaniu stopień wypełnienia jest zazwyczaj, chociaż nie zawsze, równy jedności na całej długości ślimaka. Natomiast w wypadku wytłaczania z dozowanym zasilaniem ślimak jest zwykle w pełni wypełniony tylko w swej końcowej części. Warto zwrócić uwagę, że ciśnienie jest generowane tylko w obszarze całkowitego wypełnienia ślimaka, czyli gdy $FF = 1$. Natomiast gdy ślimak nie jest całkowicie wypełniony tworzywem, czyli gdy $0 < FF < 1$, ciśnienie nie jest generowane. Zawsze, gdy stopień wypełnienia jest mniejszy od jedności, czyli gdy $FF < 1$, ciśnienie spada do zera. Ilustruje to rys. 8.

Profil uplastyczniania uwidacznia dwuetapowy przebieg procesu. W fazie początkowej, w obszarze niecałkowitego wypełnienia ślimaka, tzn. gdy $FF < 1$, uplastycznianie zachodzi wskutek przewodzenia, natomiast w dalszej części ślimaka, po jego wypełnieniu, uplastycznianie następuje w wyniku rozpraszania energii wg modelu dyspersyjnego.

Rysunek 9 przedstawia przykładowe wyniki obliczeń symulacyjnych. Zestawiono je z odpowiednimi wynikami badań doświadczalnych, obejmujących rozkład ciśnienia tworzywa i przebieg uplastyczniania tworzywa. Zgodność danych w tym wypadku jest zadowalająca.

Szersze badania optymalizacyjne na podstawie symulacji procesu zostaną przedstawione w drugiej części artykułu.

PODSUMOWANIE

Wykonano badania symulacyjno-doświadczalne wytłaczania jednoślismakowego z dozowanym zasilaniem wytłaczarki na różnym poziomie dozowania w celu optymalizacji procesu. Oceniono wpływ prędkości obro-

towej ślimaka i jego geometrii na rozkład ciśnienia i pobór prądu. Optymalizację prędkości obrotowej ślimaka i długości strefy dozowania ślimaka przeprowadzono wg kryteriów maksymalnej wydajności i minimalnego natężenia prądu. Optymalne wyniki uzyskano z zastosowaniem długiej strefy dozowania i największej prędkości obrotowej. We wcześniejszych badaniach Autora [1], odnoszących się do wytłaczania z zasilaniem grawitacyjnym, optymalne wyniki uzyskano w warunkach krótkiej strefy dozowania i pośredniej prędkości obrotowej. Przedstawiono koncepcję optymalizacji na podstawie badań symulacyjnych procesu oraz wykonano wstępne badania symulacyjne, które wykazały dobrą zgodność wyników obliczeń symulacyjnych i badań doświadczalnych.

LITERATURA

- [1] Nastaj A., Wilczyński K.: *Polimery* **2018**, 63, 38.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.1.6>
- [2] Nastaj A., Wilczyński K.: *Polimery* **2018**, 63, 297.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.4.7>
- [3] Gale M.: *Advances in Polymer Technology* **1997**, 16, 251.
[http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2329](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1098-2329)
- [4] Thompson M.R., Donoian G., Christiano J.P.: *Polymer Engineering and Science* **2000**, 40, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.11334>
- [5] Wilczyński K., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polymer Engineering and Science* **2012**, 52, 1258.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.230776>
- [6] Wilczyński K., Nastaj A., Wilczyński K.J.: *International Polymer Processing* **2013**, 28, 34.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2640>
- [7] Wilczyński K.J., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.: *Polymer Engineering and Science* **2014**, 54, 2362.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.23797>
- [8] Underwood W.M.: *Chemical Engineering Progress* **1962**, 58, 59.
- [9] Verbraak C.P.J.M., Meijer H.E.H.: *Polymer Engineering and Science* **1989**, 29, 479.
<https://doi.org/10.1002/pen.760290708>
- [10] Płochocki A.P.: *Polimery* **1974**, 19, 76, 156.
- [11] Stasiak J.: *Polimery* **1997**, 42, 14.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.1997.014>
- [12] Maddock B.H., Smith D.J.: *SPE Journal* **1972**, 28, 1972.
- [13] Helmy H.A.A., Parnaby J.: *Polymer Engineering and Science* **1976**, 16, 437.
<https://doi.org/10.1002/pen.760160609>
- [14] Potente H., Krell B.: ANTEC 1997, Toronto, Canada 1997.
- [15] Potente H.: *Kunststoffe Plast Europe* **1999**, 1, 27.
- [16] Potente H., Hanhart W., Schoppner V.: *International Polymer Processing* **1993**, 8, 335.
<https://doi.org/10.3139/217.930335>
- [17] Potente H., Schoppner V., Ujma A.: *Journal of Polymer Engineering* **1997**, 17, 153.
<http://dx.doi.org/10.1515/POLYENG.1997.17.2.153>
- [18] Lafleur P.G., Thibodeau C.A.: ANTEC 2000, Orlando 2000.
- [19] Amellal K., Lafleur P.G.: *Plastics and Rubber Processing and Applications* **1993**, 19, 227.
- [20] Wilczyński K., Nastaj A., Krutysz P.: *Mechanik* **2003**, 76, 618.
- [21] Wilczyński K.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **1999**, 38, 581.
<http://dx.doi.org/10.1080/03602559909351602>
- [21] Wilczyński K.: *Journal of Materials Processing Technology* **2001**, 109, 308.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00820-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00820-9)
- [22] Covas J.A., Cunha A.G., Oliveira P.: *International Journal of Forming Processes* **1998**, 1, 323.
- [23] Covas J.A., Cunha A.G., Oliveira P.: *Polymer Engineering and Science* **1999**, 39, 443.
- [24] Covas J.A., Cunha A.G.: PPS-16 Annual Meeting, Shanghai, Chiny 2000.
- [25] Cunha A.G., Covas J.A.: *International Polymer Processing* **2001**, 16, 229.
<https://doi.org/10.3139/217.1652>
- [26] Cunha A.G., Covas J.A., Vergnes B.: PPS-18 Meeting, Guimaraes, Portugalia 2002.
- [27] Cunha A.G., Poulesquen A., Vergnes B., Covas J.A.: *International Polymer Processing* **2002**, 17, 201.
<https://doi.org/10.3139/217.1701>
- [28] Cunha A.G., Covas J.A., Vergnes B.: *Polymer Engineering and Science* **2005**, 45, 1159.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.20391>
- [29] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **2012**, 51, 626.
<http://dx.doi.org/10.1080/03602559.2012.659313>
- [30] Wilczyński K.J., Lewandowski A., Nastaj A., Wilczyński K.: *International Polymer Processing* **2016**, 31, 82.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.3154>
- [31] Wilczyński K.J., Lewandowski A., Nastaj A., Wilczyński K.: *Advances in Polymer Technology* **2017**, 36, 23.
<http://dx.doi.org/10.1002/adv.21570>
- [32] Wilczyński K.J., Nastaj A., Wilczyński K.: *Advances in Polymer Technology* **2018**, 37, 2142.
<http://dx.doi.org/10.1002/adv.21873>
- [33] Wilczyński K., Buziak K., Wilczynski K.J. et al.: *Polymers* **2018**, 10 (3), 295.
<http://dx.doi.org/10.3390/polym10030295>
- [34] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polimery* **2011**, 56, 45.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2011.045>
- [35] Lewandowski A., Wilczyński K.J., Nastaj A., Wilczyński K.: *Polymer Engineering and Science* **2015**, 55, 2838.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.24175>
- [36] www.autodesk.com