

Optimalizacja procesu wytłaczania jednoślیمakowego tworzyw polimerowych – badania doświadczalne

Andrzej Nastaj¹⁾, Krzysztof Wilczyński^{1), *)}

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.1.6](https://doi.org/10.14314/polimery.2018.1.6)

Streszczenie: Przeprowadzono badania optymalizacyjne procesu wytłaczania jednoślیمakowego tworzyw polimerowych. Doświadczalnej optymalizacji wybranych parametrów wytłaczania, prędkości obrotowej ślیمaka i długości strefy dozowania ślیمaka dokonano wg kryterium maksymalnej wydajności i minimalnego natężenia prądu silnika wytłaczarki. Ze względu na duży koszt i czasochłonność takiej procedury zaproponowano optymalizację bazującą na badaniach symulacyjnych procesu wykorzystujących techniki ewolucyjne (algorytmy genetyczne) z zastosowaniem programu symulacji wytłaczania GSEM. Wyniki badań optymalizacyjnych na podstawie specjalnie w tym celu zbudowanego programu optymalizacji ewolucyjnej GASEO zostaną przedstawione w drugiej części artykułu.

Słowa kluczowe: wytłaczanie jednoślیمakowe, optymalizacja, modelowanie.

Optimization for single screw extrusion of polymeric materials – experimental studies

Abstract: Optimization studies have been performed on single screw extrusion of polymers. Experimental optimization of the selected process parameters, screw rotation speed and screw metering section length has been performed from the point of view of maximum extrusion output and minimum current intensity of the extruder motor. Because experimental optimization is extremely expensive and time consuming, the process simulation using evolutionary techniques (Genetic Algorithms) has been proposed. Extrusion simulation software GSEM has been used for that purpose, and the optimization program GASEO has been developed to optimize the process. The results of optimization will be presented in the second part of the paper.

Keywords: single screw extrusion, optimization, modeling.

Jednym z głównych kierunków rozwoju przetwórstwa tworzyw polimerowych jest komputerowe modelowanie procesów przetwórstwa, stanowiące efektywne oraz ekonomiczne narzędzie projektowania i badań. Wykorzystywane w tym celu systemy komputerowego modelowania umożliwiają prognozowanie przebiegu procesów przetwórstwa tworzyw na podstawie warunków technologicznych, parametrów geometrycznych maszyny i narzędzia oraz właściwości przetwarzanego tworzywa. Przebieg, np. wytłaczania, może być charakteryzowany masowym natężeniem przepływu tworzywa (wydajnością procesu), rozkładem ciśnienia i temperatury tworzywa, poborem mocy itp. Tak więc, na podstawie danych wejściowych jest możliwe przewidywanie wielkości wyjściowych procesu [1].

Systemy modelowania nie rozwiązują jednak zagadnienia odwrotnego dotyczącego ustalania danych wej-

ściowych procesu odpowiednich do uzyskania określonych wartości wielkości wyjściowych. Nie umożliwiają doboru warunków przetwórstwa, spełniających zadane cele produkcyjne, np. maksymalizacji wydajności procesu, minimalizacji zużycia energii itp. Nie pozwalają też na optymalizację warunków przetwórstwa wg określonych kryteriów optymalizacji.

Przykładowy schemat koncepcyjny modelowania i optymalizacji wytłaczania przedstawiono na rys. 1.

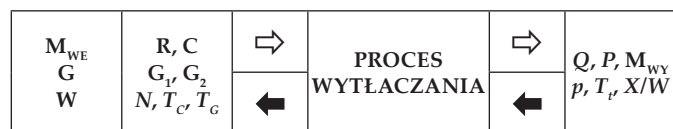
Optymalizacja procesu wytłaczania jest zagadnieniem bardzo złożonym. Różne, znane kryteria optymalizacji często są ze sobą sprzeczne, np. wydajność wytłaczania i pobór mocy, a liczba danych charakteryzujących proces jest bardzo duża (wspomniane już dane materiałowe, parametry geometryczne maszyny i narzędzia oraz warunki technologiczne). Celem przeprowadzanej optymalizacji jest więc uniknięcie rozwiązań lokalnych i znalezienie całościowego rozwiązania optymalnego. Znaczenie podstawowe w optymalizacji jak dotąd miały metody statystyczne oparte na analizie regresji.

Optymalizacja polega na uzyskaniu określonej wielowymiarowej przestrzeni wielkości wyjściowych procesu (tzw. przestrzeni odpowiedzi) na podstawie odpo-

¹⁾ Politechnika Warszawska, Instytut Technik Wytwarzania, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa.

*) Autor do korespondencji:

e-mail: k.wilczynski@wip.pw.edu.pl



Rys. 1. Schemat koncepcyjny modelowania i optymalizacji procesu wytłaczania: ⇒ – modelowanie (przewidywanie przebiegu procesu), ⇐ – optymalizacja, M_{WE} – właściwości wejściowe tworzywa, R – właściwości reologiczne tworzywa, C – właściwości cieplne tworzywa, G – geometria maszyny i narzędzia, G_1 – geometria ślimaka, G_2 – geometria głowicy, W – warunki technologiczne procesu, N – prędkość obrotowa ślimaka, T_c – temperatura cylindra, T_G – temperatura głowicy, Q – masowe natężenie przepływu tworzywa (wydajność wytłaczania), P – pobierana moc, M_{WY} – właściwości wyjściowe tworzywa, p – ciśnienie, T_t – temperatura tworzywa, X/W – profil uplastyczniania tworzywa [1]

Fig. 1. Conceptual scheme of modeling and optimization for extrusion process: ⇒ – modeling (process prediction), ⇐ – optimization, M_{WE} – input polymer properties, R – rheological properties, C – thermal properties, G – geometry of the machine and the tool, G_1 – screw geometry, G_2 – die geometry, W – operating parameters, N – screw rotation speed, T_c – barrel temperature, T_G – die temperature, Q – polymer mass flow rate (extrusion output), P – power consumption, M_{WY} – output polymer properties, p – pressure, T_t – polymer temperature, X/W – solid bed profile [1]

wiednio przygotowanego zestawu danych wejściowych, a następnie na poszukiwaniu w tej przestrzeni wartości ekstremalnych (minimum lub maksimum). Dane do optymalizacji (odpowiednie zestawy wielkości wejściowych i wyjściowych) mogą być pozyskiwane na podstawie doświadczalnych badań procesu lub z zastosowaniem symulacji komputerowych. Pierwszy sposób jest kosztowny i w swoim zakresie ograniczony. Znacznie bardziej efektywna jest optymalizacja na bazie danych otrzymanych w wyniku symulacji procesu. Najlepsze są zintegrowane rozwiązania symulacyjno-optymalizacyjne, są one jednak, praktycznie biorąc, niedostępne. Prace badawcze w tym zakresie prowadzi się tylko w nielicznych ośrodkach na świecie, doświadczonych zarówno w modelowaniu procesów przetwórczych, jak i zagadnieniach optymalizacji.

Próby optymalizacji procesu wytłaczania na podstawie danych doświadczalnych podejmowali: Underwood [2], Verbraak i Meijer [3], a w kraju Płochocki [4, 5] i Stasiak [6, 7].

Ze względu na ograniczenia związane z badaniami doświadczalnymi obecnie podstawowe znaczenie ma optymalizacja na podstawie teoretycznego modelu procesu. Pierwsze takie próby podjęli Maddock i Smith [8] oraz Helmy i Parnaby [9], a podstawą ich prac były badania symulacyjne wytłaczania i analiza regresji.

Znaczący postęp w zakresie badań optymalizacyjnych nastąpił w wyniku rozwoju technik komputerowych. Opracowano kompleksowe komputerowe modele wytłaczania, jednocześnie udostępniono wydajne systemy komputerowej analizy danych. Metody statystyczne

zastosowali w swoich pracach Potente i Krell [10, 11] na podstawie programu REX [12–14] oraz Lafleur i Thibodeau [15, 16] na podstawie programu Ecole Polytechnique de Montreal [17, 18]. Metody statystyczne wykorzystali również autorzy pracy [19] na bazie programu SSEM [20, 21]. Istotną wadą metod statystycznych jest m.in. konieczność prowadzenia badań w przestrzeni odpowiedzi o bardzo dużej gęstości danych oraz niebezpieczeństwo uzyskiwania rozwiązań lokalnych (optimum lokalnego), a nie całościowych.

Możliwe są również modelowanie i optymalizacja procesów przetwórstwa na podstawie technik obliczeniowych sztucznej inteligencji (ang. *Computational Intelligence*), obejmujących sieci neuronowe, algorytmy genetyczne oraz systemy rozmyte. Techniki takie dostarczają rozwiązań ciągłych lub dyskretnych, uwzględniających proces uczenia z wykorzystaniem dostępnych danych. Zastosowanie tych technik w wypadku wytłaczania tworzywa jest, jak dotąd, ograniczone do prób wykorzystania algorytmów genetycznych w optymalizacji procesu tradycyjnego wytłaczania jednoślismakowego z zasilaniem grawitacyjnym [22–25] oraz wytłaczania dwuślismakowego współbieżnego [26–28]. Autorzy niniejszej pracy również podjęli takie próby z zastosowaniem sieci neuronowych [29] oraz algorytmów genetycznych [30, 31]. Ostatnio algorytmy genetyczne wykorzystano do skalowania procesu wytłaczania jednoślismakowego i dwuślismakowego współbieżnego [32, 33], a także do optymalizacji procesu wtryskiwania [34, 35].

Dotychczas brakuje opracowań optymalizacyjnych procesu wytłaczania jednoślismakowego z dozowanym zasilaniem wylączarki oraz wytłaczania dwuślismakowego przeciwbieżnego, mimo że ostatnio opracowano odpowiednie modele matematyczne tych procesów, kompleksowe modele wytłaczania jednoślismakowego z dozowaniem [36–38] oraz kompleksowe modele wytłaczania przeciwbieżnego [39–41].

Algorytmy genetyczne (inaczej techniki ewolucyjne) w porównaniu z innymi metodami optymalizacji charakteryzują się następującymi cechami:

- parametry zadania są tu przetwarzane nie bezpośrednio, lecz w postaci zakodowanej;
- poszukiwanie rozwiązania jest prowadzone nie z jednego punktu, lecz z pewnej ich populacji, co powoduje, że prawdopodobieństwo utknięcia w ekstremum lokalnym jest mniejsze;
- stosowane są probabilistyczne, a nie deterministyczne reguły wyboru;
- zdobyte doświadczenia są wykorzystywane do określenia nowego obszaru poszukiwań o spodziewanej, wyższej jakości, dzięki czemu, pomimo elementu losowości, nie sprowadzają się do przypadkowego błędzenia;
- korzysta się tylko z funkcji celu, a nie z jej pochodnych lub innych pomocniczych informacji.

Dotychczasowe próby stosowania technik ewolucyjnych do optymalizacji procesu wytłaczania ograniczały się do badań symulacyjnych wytłaczania i nie odnosiły

T a b e l a 1. Charakterystyka tworzywa HDPE Rigidex HD 6070 EA

T a b l e 1. Polymer characteristics (HDPE Rigidex HD 6070 EA)

Właściwości		Wartość	Norma
Fizyczne	gęstość w stanie stałym	0,952 g/cm ³	ISO 1872
	gęstość w stanie stopionym	0,722 g/cm ³	ISO 1872
	wskaźnik szybkości płynięcia MFR (190 °C, 2,16 kg)	7,6 g/10 min	ISO 1133
Mechaniczne	moduł Younga	1500 MPa	ISO 527-1 ISO 527-2
	wytrzymałość na rozciąganie	31,0 MPa	ISO 527-1 ISO 527-2
	udarność (23 °C)	4,0 kJ/m ²	ISO 179

się do warunków doświadczalnych procesu. W tej pracy badania optymalizacyjne na podstawie symulacyjnych technik ewolucyjnych przedstawiono na tle badań doświadczalnych procesu wytłaczania jednoślakowego, z uwzględnieniem optymalizacji parametrów geometrycznych ślimaka.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Program badań obejmował wytłaczanie jednoślakowe polietylenu dużej gęstości (HDPE) w szerokim zakresie parametrów technologicznych i geometrycznych procesu. Badania obejmowały mechanizm przepływu i uplastyczniania przetwarzanego materiału oraz podstawowe parametry procesu wytłaczania: ciśnienie i masowe natężenie przepływu tworzywa, a także pobór mocy i prądu. Mechanizm przepływu i uplastyczniania tworzywa oceniano na podstawie bezpośredniej obserwacji próbek tworzywa, zdjętych ze ślimaka wytłaczarki po jej zatrzymaniu i gwałtownym ochłodzeniu (ang. *Screw Pulling-out Technique*).

W badaniach zastosowano polietylen dużej gęstości (HDPE) Rigidex 6070EA (firmy BP Chemicals) o gęstości 0,952 g/cm³, wskaźniku szybkości płynięcia MFI = 7,6 g/10 min (190 °C, 2,16 kg) i temperaturze topnienia 135 °C. Charakterystykę cieplno-mechaniczną tego tworzywa przedstawiono w tabeli 1.

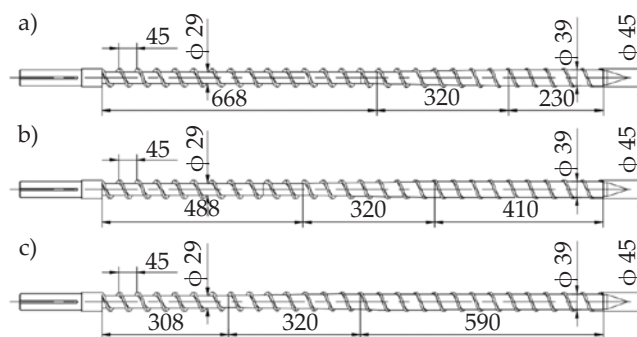
Właściwości reologiczne HDPE opisano równaniem Kleina:

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

gdzie: η – lepkość, $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania, T – temperatura, parametry równania Kleina: $A_0 = 10,918378968$, $A_1 = -0,218405893$, $A_{11} = -0,036865332$, $A_{12} = 0,001025862$, $A_2 = -0,022682083$, $A_{22} = 0,000021151$ wyznaczono na podstawie bazy materiałowej Autodesk-Moldflow (z równania Cross-WLF) w zakresie temperatury 160–220 °C i szybkości ścinania 1–20 000 1/s.

W badaniach wykorzystano specjalistyczne stanowisko badawcze procesu wytłaczania, zbudowane na bazie wytłaczarki jednoślakowej Metalchem T-45, o średnicy cylindra $D = 45$ mm i stosunku długości do średnicy $L/D = 27$. Proces prowadzono w trybie klasycznego za-

silania grawitacyjnego, bez dozowania tworzywa. Do wytłaczania prętów o przekroju kołowym używano klasycznych ślimaków trójstrefowych oraz głowicy prostej. Ślimaki różniły się długością strefy dozowania (rys. 2).



Rys. 2. Ślimaki o długości strefy dozowania: a) $L_d = 230$ mm [S], b) $L_d = 410$ mm [N], c) $L_d = 590$ mm [L]

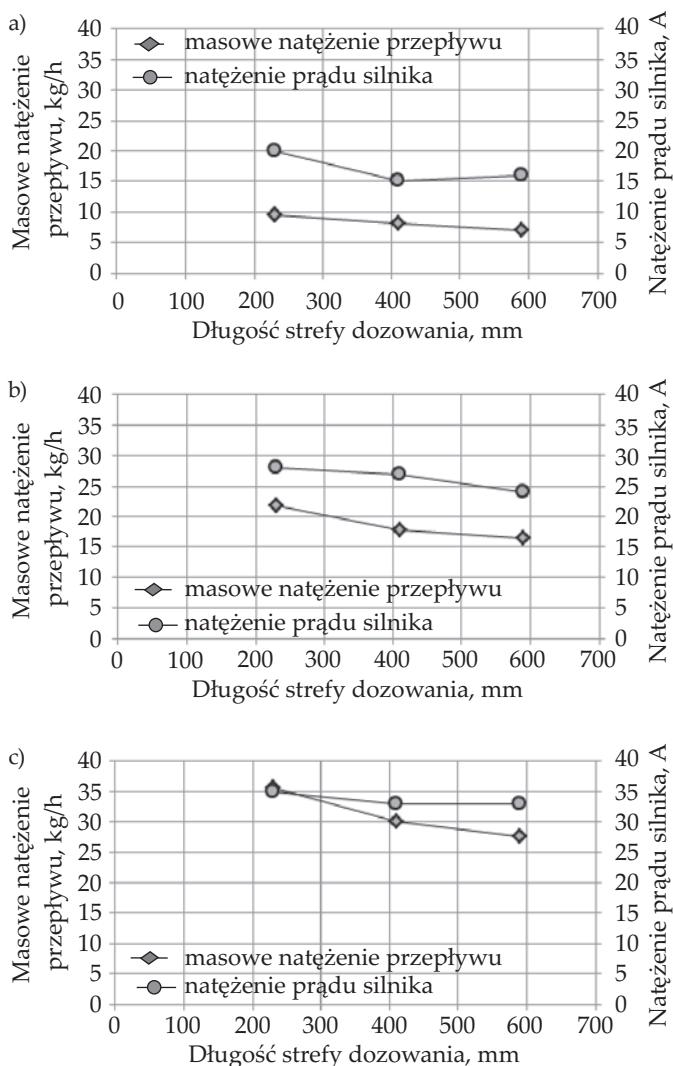
Fig. 2. Screws with a length of metering section: a) $L_d = 230$ mm [S], b) $L_d = 410$ mm [N], c) $L_d = 590$ mm [L]

Badania wykonano z zastosowaniem trzech różnych wartości prędkości obrotowej ślimaka: $N = 20$ obr./min, $N = 50$ obr./min i $N = 80$ obr./min.

Ustalono następujące warunki temperatury cylindra i głowicy w kolejnych strefach wytłaczarki: $T_I = 150$ °C, $T_{II} = 160$ °C, $T_{III} = 170$ °C, $T_{IV} = 180$ °C, $T_G = 180$ °C.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Ogólną charakterystykę procesu przedstawiono na rys. 3 i rys. 4. Rysunek 3 ilustruje wpływ prędkości obrotowej ślimaka i długości strefy jego dozowania na masowe natężenie przepływu przetwarzanego tworzywa (wydajność wytłaczania) i pobór prądu przez silnik wytłaczarki. Zwiększenie prędkości obrotowej ślimaka wywołuje wzrost zarówno masowego natężenia przepływu, jak i zużycia prądu. Wpływ długości strefy dozowania ślimaka na wydajność wytłaczania i pobór prądu nie jest już tak oczywisty. Zwiększająca się długość strefy dozowania ślimaka powoduje zmniejszanie wydajności procesu oraz poboru prądu, co można tłumaczyć spadkiem ciśnienia w wytłaczarce. Potwierdza to zależność przedstawiona na rys. 4 – rozkładu ciśnienia wzdłuż długo-



Rys. 3. Wpływ długości strefy dozowania ([S], [N], [L]) na masowe natężenie przepływu i natężenie prądu silnika – dane doświadczalne; prędkość obrotowa ślimaka: a) $N = 20$ obr./min, b) $N = 50$ obr./min, c) $N = 80$ obr./min

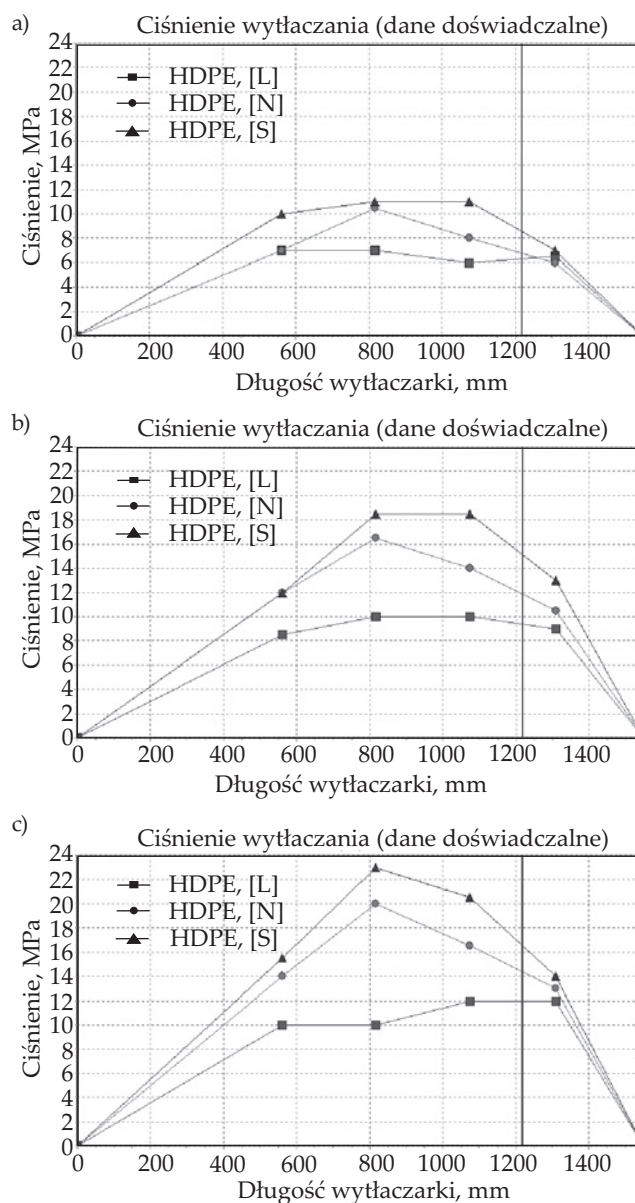
Fig. 3. Effect of metering section length ([S], [N], [L]) on mass flow rate and motor current intensity – experimental data; screw rotation speed: a) $N = 20$ rpm, b) $N = 50$ rpm, c) $N = 80$ rpm

ści wylączarki przy różnej prędkości obrotowej ślimaka w funkcji długości strefy dozowania ślimaka. Oczywiście ze zwiększającą się prędkością obrotową ciśnienie w wylączarce rośnie.

Wyniki badań doświadczalnych posłużyły do optymalizacji procesu wylączania. Optymalizacji parametrów technologicznych procesu (np. prędkości obrotowej ślimaka) i parametrów geometrycznych ślimaka (np. długości strefy dozowania) dokonano wg kryterium maksymalnej wydajności i minimalnego zużycia prądu.

Optymalizacja

Znalezienie całkowitego optimum procesu w badanej przestrzeni danych obejmuje maksymalizację bądź minimalizację tzw. funkcji celu. W procesie wylączania



Rys. 4. Wpływ długości strefy dozowania ([S], [N], [L]) na rozkład ciśnienia – dane doświadczalne; prędkość obrotowa ślimaka: a) $N = 20$ obr./min, b) $N = 50$ obr./min, c) $N = 80$ obr./min

Fig. 4. Effect of metering section length ([S], [N], [L]) on pressure profile – experimental data; screw rotation speed: a) $N = 20$ rpm, b) $N = 50$ rpm, c) $N = 80$ rpm

zwykle musi być spełnionych równocześnie kilka lub kilkanaście kryteriów optymalizacji, takich jak: wydajność wylączania, pobór mocy, temperatura wylączanego tworzywa, stopień wymieszania tworzywa itp. Określone indywidualne kryteria stanowią podstawę do utworzenia kryterium globalnego, tzw. globalnej funkcji celu.

W tej pracy globalną funkcję celu zdefiniowano w postaci:

$$F_i = \sqrt[k]{f_{i(1)} \cdot f_{i(2)} \cdot \dots \cdot f_{i(k)}} \quad (2)$$

gdzie: F_i – globalna funkcja celu i -tego zestawu danych, k – liczba kryteriów optymalizacji (kryteriów indywidualnych, wielkości wyjściowych procesu), $f_{i(k)}$ – funkcja

celu k -tego kryterium, która może przybierać następującą postać (znormalizowana):

– gdy kryterium optymalizacji jest maksymalna wartość wielkości wyjściowej y :

$$f_i = \frac{y_i - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (3)$$

– gdy kryterium optymalizacji jest minimalna wartość wielkości wyjściowej y :

$$f_i = \frac{y_{\max} - y_i}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (4)$$

Optymalizację procesu wytłaczania przeprowadzono wg kryterium maksymalnej wydajności Q_{\max} i minimalnego poboru prądu I_{\min} . Globalną funkcję celu zdefiniowano jako:

$$F_i = \sqrt[2]{Q_i I_i} \quad (5)$$

gdzie poszczególne dane ze zbioru wielkości wyjściowych unormowano w postaci:

$$Q_{i_znorm} = \frac{Q_i - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \quad (6)$$

$$I_{i_znorm} = \frac{I_{\max} - I_i}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (7)$$

gdzie: F_i – globalna funkcja celu, Q_{i_znorm} – znormalizowana wartość masowego natężenia przepływu, I_{i_znorm} – znormalizowana wartość natężenia prądu silnika, i – kolejna wartość ze zbioru danych.

Wartości maksymalne i minimalne wielkości wyjściowych procesu (kryteriów optymalizacji), uzyskane na podstawie badań doświadczalnych, wynosiły odpowiednio: $Q_{\max} = 35,627$ kg/h, $Q_{\min} = 7,133$ kg/h, $I_{\max} = 35,0$ A, $I_{\min} = 15,0$ A.

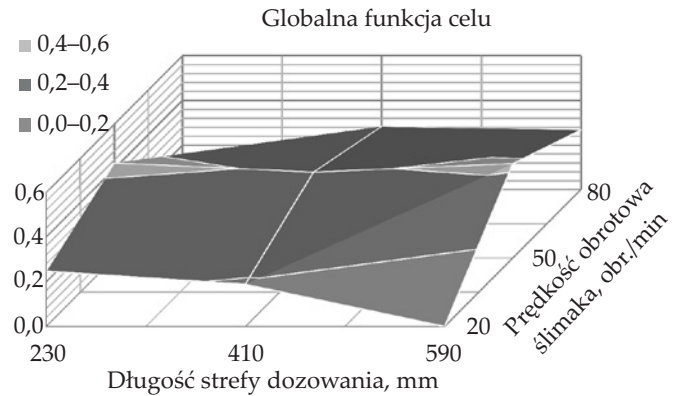
Wyniki obliczeń globalnej funkcji celu zestawiono w tabeli 2 i na rys. 5. Największą wartość funkcji celu ($F_i = 0,42555$) uzyskano w wypadku ślimaka z krótką strefą dozowania ($L_d = 230$ mm), przy prędkości obrotowej ślimaka $N = 50$ obr./min. Parametry te są optymalne wg przyjętych kryteriów optymalizacji maksymalnej wydajności i minimalnego poboru prądu ($L_{d_opt} = 230$ mm, $N_{opt} = 50$ obr./min). Odpowiadają im następujące wartości wielkości wyjściowych procesu:

- masowe natężenie przepływu: 21,87 kg/h,
- natężenie prądu silnika: 28,0 A.

T a b e l a 2. Wartości globalnej funkcji celu dla danych doświadczalnych

T a b l e 2. Global objective function for experimental data

Prędkość obrotowa	Długość strefy dozowania		
	230 mm	410 mm	590 mm
20 obr./min	0,247540	0,188178	0,0
50 obr./min	0,425550	0,384675	0,422730
80 obr./min	0,0	0,282854	0,267931



Rys. 5. Wykres globalnej funkcji celu dla danych doświadczalnych

Fig. 5. Global objective function for experimental data

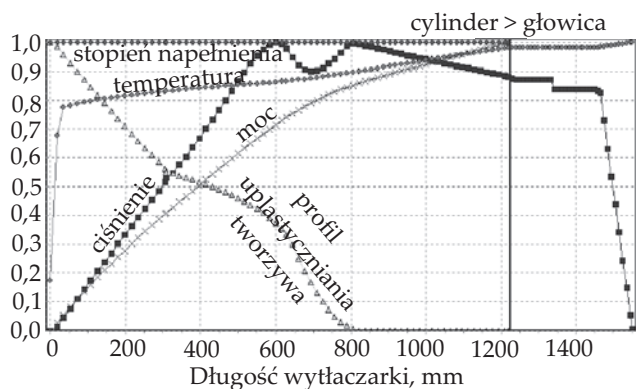
Badania symulacyjne

Dane do optymalizacji można pozyskiwać z badań doświadczalnych lub symulacyjnych. Badania doświadczalne są czasochłonne i kosztowne, dlatego też podjęto próbę optymalizacji procesu wytłaczania na bazie wyników symulacyjnych z zastosowaniem technik ewolucyjnych.

Badania symulacyjne przeprowadzono z zastosowaniem programu GSEM (ang. *Global Screw Extrusion Model*), stanowiącego rozwinięcie programu symulacji tradycyjnego procesu wytłaczania jednoślindakowego z zasilaniem grawitacyjnym SSEM (ang. *Single Screw Extrusion Model*) [42]. Program GSEM umożliwia też symulację procesu wytłaczania jednoślindakowego z dozowanym zasilaniem wytłaczarki, jest więc narzędziem modelowania przepływu tworzyw w wytłaczarkach jednoślindakowych zasilanych grawitacyjnie i z dozowaniem tworzywa, ze ślimakami konwencjonalnymi i specjalizowanymi oraz z głowicami o różnej geometrii. Program stanowi element wielozadaniowego systemu modelowania, optymalizacji i skalowania procesów ślimakowych przetwórstwa tworzyw MultiScrew System budowanego w Zakładzie Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych Politechniki Warszawskiej.

Przykładowe wyniki obliczeń symulacyjnych przedstawiono na rys. 6. Pokazano tzw. ogólną charakterystykę wytłaczania, obejmującą podstawowe parametry procesu: rozkład ciśnienia i temperatury, pobór mocy, przebieg uplastycznienia tworzywa oraz stopień wypełnienia ślimaka.

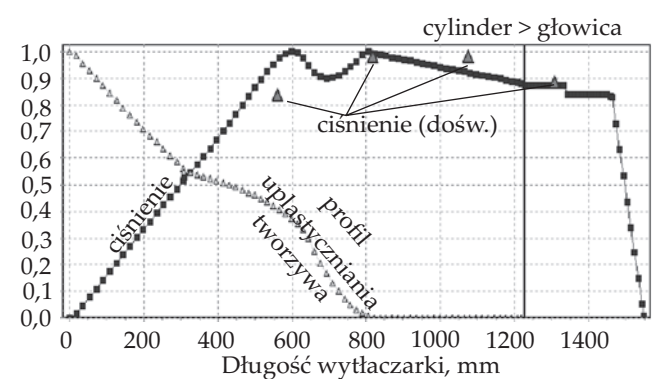
Przebieg uplastycznienia tworzywa jest określany przez tzw. profil uplastycznienia SBP (ang. *Solid Bed Profile*), definiowany stosunkiem objętości tworzywa w stanie stałym do całkowitej objętości tworzywa w rozpatrywanej przestrzeni ślimaka wytłaczarki [1]. W wypadku tradycyjnego wytłaczania z zasilaniem grawitacyjnym jest to stosunek szerokości warstwy stałej tworzywa (X) do szerokości kanału ślimaka (W), czyli $SBP = X/W$. W początkowej fazie procesu, gdy kanał ślimaka jest całkowi-



Rys. 6. Ogólna charakterystyka procesu wytłaczania HDPE: długość strefy dozowania $L_d = 590$ mm [L], prędkość obrotowa ślimaka $N = 50$ obr./min, masowe natężenie przepływu $Q = 15,71$ kg/h
 Fig. 6. General characteristics of HDPE extrusion process: metering section length $L_d = 590$ mm [L], screw rotation speed $N = 50$ rpm, mass flow rate $Q = 15,71$ kg/h

cie wypełniony tworzywem w stanie stałym, $SBP = 1$, natomiast w fazie końcowej, gdy tworzywo jest już całkowicie uplastycznione, $SBP = 0$. Na podstawie tego profilu można przewidywać, czy tworzywo uplastyczni się całkowicie w wytłaczarce. Upłastycznianie powinno przebiegać na tyle szybko, aby wytworzyły się odpowiednie warunki czasu i przestrzeni do uzyskania wysokiego stopnia wymieszania tworzywa.

Stopień wypełnienia ślimaka FF (ang. *Fill Factor*) definiuje stosunek całkowitej objętości tworzywa w rozpatrywanej objętości kanału ślimaka do objętości kanału. Stopień wypełnienia $FF = 1$ wówczas, gdy kanał jest całkowicie wypełniony tworzywem, natomiast stopień wypełnienia $FF = 0$, gdy ślimak jest pusty. Stopień wypełnienia z zakresu $0 < FF < 1$ oznacza, że kanał ślima-



Rys. 7. Rozkład ciśnienia i przebieg uplastyczniania tworzywa: długość strefy dozowania $L_d = 590$ mm [L], prędkość obrotowa ślimaka $N = 50$ obr./min, masowe natężenie przepływu $Q = 15,71$ kg/h – wyniki badań symulacyjno-doświadczalnych
 Fig. 7. Pressure profile and polymer melting course: metering section length $L_d = 590$ mm [L], screw rotation speed $N = 50$ rpm, mass flow rate $Q = 15,71$ kg/h – simulation and experimental data

ka jest częściowo wypełniony tworzywem. W wypadku tradycyjnego wytłaczania stopień wypełnienia jest zwykle, chociaż nie zawsze, równy jedności na całej długości ślimaka wytłaczarki. Warto zauważyć, że ciśnienie jest generowane tylko w obszarze całkowitego wypełnienia ślimaka, czyli gdy $FF = 1$.

Na rys. 7 zestawiono przykładowe wyniki obliczeń symulacyjnych z wynikami badań doświadczalnych, obejmujących rozkład ciśnienia tworzywa i przebieg uplastyczniania. Zgodność danych wyników jest zadowalająca. Badania optymalizacyjne wykonane na podstawie wyników symulacji procesu będą przedmiotem drugiej części artykułu.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzono badania symulacyjno-doświadczalne procesu wytłaczania jednoślindakowego tworzywa polimerowych w celu optymalizacji procesu. Zbadano wpływ prędkości obrotowej ślimaka i geometrii ślimaka na ciśnienie i masowe natężenie przepływu tworzywa oraz pobór mocy i prądu. Dokonano optymalizacji prędkości obrotowej ślimaka i długości strefy dozowania ślimaka wg kryterium maksymalnej wydajności i minimalnego natężenia prądu silnika wytłaczarki, uzyskując nieoczywiste wyniki optymalne przy krótkiej strefie dozowania i pośredniej prędkości obrotowej. Przedstawiono koncepcję optymalizacji na podstawie badań symulacyjnych procesu oraz wykonano badania symulacyjne, które wykazały zgodność wyników obliczeń symulacyjnych i badań doświadczalnych.

LITERATURA

- [1] Wilczyński K.: „Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych”, WNT, Warszawa 2001.
- [2] Underwood W.M.: *Chemical Engineering Progress* **1962**, 58, 59.
- [3] Verbraak C.P.J.M., Meijer H.E.H.: *Polymer Engineering and Science* **1989**, 29, 479.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.760290708>
- [4] Płochocki A.P.: *Polimery* **1974**, 19, 76.
- [5] Płochocki A.P.: *Polimery* **1974**, 19, 156.
- [6] Stasiak J.: *Polimery* **1995**, 40, 214.
- [7] Stasiak J.: *Polimery* **1997**, 42, 14.
- [8] Maddock B.H., Smith D.J.: *SPE Journal* **1972**, 28, 1972.
- [9] Helmy H.A.A., Parnaby J.: *Polymer Engineering and Science* **1976**, 16, 437.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.760160609>
- [10] Potente H., Krell B.: “Screw optimization by means of DOE and multiple regression”, Materiały konferencyjne 55th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC 1997), Toronto, Kanada 1997, str. 135–139.
- [11] Potente H.: *Kunststoffe Plast Europe* **1999**, 1, 27.
- [12] Potente H., Hanhart W., Schoppner V.: *International Polymer Processing* **1993**, 8, 335.

- <http://dx.doi.org/10.3139/217930335>
- [13] Potente H., Hanhart W., Reski T.: *Polymer Engineering and Science* **1994**, 34, 937.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.760341111>
- [14] Potente H., Schoppner V., Ujma A.: *Journal of Polymer Engineering* **1997**, 17, 153.
<http://dx.doi.org/10.1515/POLYENG.1997.17.2.153>
- [15] Thibodeau C.A., Lafleur P.G.: "Computer Design and Screw Optimization", Materiały konferencyjne 58th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC 2000), Orlando, Floryda, USA 2000, str. 276–282.
- [16] Thibodeau C.A., Lafleur P.G.: "Computer Design and Screw Optimization", Materiały konferencyjne The Polymer Processing Society Sixteenth Annual Meeting (PPS-16), Shanghai, Chiny 2000, str. 15.
- [17] Amellal K., Lafleur P.G.: *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications* **1993**, 19, 227.
- [18] Vincelette A.R., Guerrero C.S., Carreau P.J., Lafleur P.G.: *International Polymer Processing* **1989**, 4, 232.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.890232>
- [19] Wilczyński K., Nastaj A., Krutysz P.: *Mechanik* **2003**, nr 10, 618.
- [20] Wilczyński K.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **1996**, 35, 449.
<http://dx.doi.org/10.1080/03602559608000931>
- [21] Wilczyński K.: *Journal of Materials Processing Technology* **2001**, 109, 308.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00821-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00821-9)
- [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.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.11434>
- [24] Covas J.A., Gaspar-Cunha A.: "The Use of an Optimisation Approach to the Design of Extrusion Screw", Materiały konferencyjne The Polymer Processing Society Sixteenth Annual Meeting (PPS-16), Shanghai, Chiny 2000.
- [25] Gaspar-Cunha A., Covas J.A.: *International Polymer Processing* **2001**, 16, 229.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.1652>
- [26] Gaspar-Cunha A., Covas J.A., Vergnes B.: "An Optimisation Methodology for Setting the Operating Conditions in Twin-Screw Extrusion", Materiały konferencyjne The Polymer Processing Society Eighteenth Annual Meeting (PPS-18), Guimaraes, Portugalia 2002.
- [27] Gaspar-Cunha A., Poulesquen A., Vergnes B., Covas J.A.: *International Polymer Processing* **2002**, 17, 201.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.1701>
- [28] Gaspar-Cunha A., 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., Abramczyk P.: *Mechanik* **2004**, nr 7, 470.
- [30] Wilczyński K., Nastaj A.: *Mechanik* **2005**, nr 7, 606.
- [31] Wilczyński K., Nastaj A.: „SSEM-AG Computer Model for Optimization of Polymer Extrusion”, Materiały konferencyjne International Mechanical Engineering Congress and Exposition: Applied Mechanics (ASME 2006), Chicago, Illinois, USA 2006, str. 683–689.
<http://dx.doi.org/10.1115/IMECE2006-13074>
- [32] Covas J.A., Gaspar-Cunha A.: *International Polymer Processing* **2009**, 24, 67.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2200>
- [33] Covas J.A., Gaspar-Cunha A.: "A Scaling-up Methodology for Co-rotating Twin-extruders", Materiały konferencyjne 27th Annual Meeting of the Polymer Processing Society (PPS-27), Marrakech, Maroko 2011, str. 1–6.
- [34] Fernandes C., Pontes A.J., Viana J.C., Gaspar-Cunha A.: *Polymer Engineering and Science* **2010**, 50, 1667.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.21652>
- [35] Fernandes C., Pontes A.J., Viana J.C., Gaspar-Cunha A.: *International Polymer Processing* **2012**, 27, 213.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2511>
- [36] Wilczyński K.J., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.: *Polymer Engineering and Science* **2014**, 54, 2362.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.23797>
- [37] Wilczyński K.J., Lewandowski A., Nastaj A., Wilczyński K.: *Advances in Polymer Technology* **2017**, 36, 23.
<http://dx.doi.org/10.1002/adv.21570>
- [38] Wilczyński K.J., Lewandowski A., Nastaj A., Wilczyński K.: *International Polymer Processing* **2016**, 31, 82.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.3154>
- [39] Wilczyński K., White J.L.: *Polimery* **2008**, 53, 754.
- [40] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polimery* **2011**, 56, 45.
- [41] Lewandowski A., Wilczyński K.J., Nastaj A., Wilczyński K.: *Polymer Engineering and Science* **2015**, 55, 2838.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.24175>
- [42] Wilczyński K.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **1999**, 38, 581.
<http://dx.doi.org/10.1080/03602559909351602>