

# Modelowanie procesu wytłaczania jednoślimakowego z dozowanym zasilaniem polimerowych kompozytów drzewnych

Krzysztof J. Wilczyński<sup>1), \*)</sup>, Andrzej Nastaj<sup>1)</sup>, Kamila Buziak<sup>1)</sup>

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.79](https://dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.79)

**Streszczenie:** Przedstawiono zagadnienie modelowania wytłaczania jednoślimakowego polimerowych kompozytów drzewnych z dozowanym zasilaniem wytłaczarki. Wykonano badania symulacyjno-doświadczalne wytłaczania kompozytu drzewnego na osnowie polipropylenu. Zastosowano klasyczny ślimak trójstrefowy. Na podstawie modelu komputerowego wytłaczania z dozowanym zasilaniem wykonano obliczenia symulacyjne uplastyczniania kompozytu, rozkładu ciśnienia i temperatury kompozytu oraz stopnia wypełnienia ślimaka. Wyniki symulacji potwierdzono doświadczalnie. Stwierdzono, że ślimak wypełnia się całkowicie tworzywem jedynie w końcowej części wytłaczarki, przed głowicą wytłaczarską, i tylko w tym obszarze jest generowane ciśnienie. Wielkość obszaru całkowitego wypełnienia ślimaka zależy od stosunku natężenia przepływu do prędkości obrotowej ślimaka. Wypełnienie ślimaka się zwiększa, gdy rośnie natężenie przepływu tworzywa (przy stałej prędkości obrotowej ślimaka) lub gdy maleje prędkość obrotowa ślimaka (przy stałym natężeniu przepływu tworzywa). Ciśnienie rośnie ze wzrostem natężenia przepływu tworzywa, a profil ciśnienia jest dobrze przewidywany.

**Słowa kluczowe:** wytłaczanie jednoślimakowe, kompozyty polimerowo-drzewne, modelowanie.

## Modeling of starve-fed single screw extrusion of wood-polymer composites

**Abstract:** The paper discusses the numerical modeling of starve-fed single screw extrusion of wood-polymer composites. Simulation and experimental studies on the extrusion of wood-polypropylene composite have been performed using classical three-zone screw. Using a computer model of the process, the simulation calculations of polymer plasticization, pressure and temperature profiles as well as screw filling have been carried out and validated experimentally. It was found that the screw is fully filled with the polymer only in the end part of the extruder, before the extrusion die, and the pressure is generated only in this region. The size of the fully filled region of the screw depends on the ratio of the flow rate to the screw speed. The screw filling increases with an increase in the polymer flow rate (at the constant screw speed) or with a decrease in the screw speed (at the constant flow rate). The pressure increases with increasing flow rate, and the pressure profile is well predicted.

**Keywords:** single screw extrusion, wood-polymer composites, modeling.

Polimerowe kompozyty drzewne (ang. WPC, *Wood Polymer Composites*), istniejące na rynku tworzyw od ponad dwudziestu lat, są szeroko stosowane w budownictwie. Dzięki odporności na działanie warunków atmosferycznych z dobrym skutkiem zastępują drewno. Największe znaczenie mają WPC na osnowie polipropylenu, polietylenu dużej gęstości i poli(chlorku winylu) [1–3]. Podstawową technologią ich przetwórstwa jest wytłaczanie.

Fundamentalne prace z zakresu reologii i przetwórstwa polimerowych kompozytów drzewnych: Li i Wolcotta, np. [4–6], Xiao i Tzoganakisa, np. [7–19], oraz Vlachopoulou i Hristowa, np. [10, 11], a także bardziej aktualne [12, 13], ujmują WPC jako płyny nienewtonowskie, pseudoplastyczne i lepkosprężyste, z określoną granicą płynięcia i poślizgiem podczas przepływu. Obszerny przegląd stanu wiedzy w zakresie reologii i przetwórstwa WPC przedstawiono ostatnio w pracach [14, 15], a w zakresie modelowania procesu wytłaczania tworzyw polimerowych, w tym także wytłaczania tworzyw zaawansowanych, takich jak mieszaniny polimerów, kompozyty polimerowe czy tworzywa napełnione, przedstawiono w pracach [16, 17].

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Technik Wytwarzania, Zakład Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa.

<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji; e-mail: wilczynski\_k@wp.pl

Wyłaczanie stanowi podstawową technologię przetwórstwa tworzyw polimerowych. Może być realizowane w wyłaczarkach jednoślimakowych lub dwuślimakowych, z zasilaniem grawitacyjnym lub dozowanym tworzywa.

Wyłaczanie jednoślimakowe z typowym zasilaniem grawitacyjnym jest stosunkowo dobrze poznane. Tadmor i współpr. na podstawie badań uplastycznienia tworzywa opracowali pierwszy model komputerowy procesu [18–20], po nim powstało kilka innych, np. NEXTRUCAD opracowany przez Vlachopoulosa [21], REX opracowany przez Potente [22], czy SSEM opracowany przez Wilczyńskiego [23]. Prace w zakresie modelowania wyłaczania jednoślimakowego podsumował Altinkaynak [24].

Wyłaczanie dwuślimakowe jest znacznie mniej poznane niż wyłaczanie jednoślimakowe. Podstawowe znaczenie mają tutaj prace White'a i współpr., którzy na podstawie badań przepływu i uplastycznienia tworzywa opracowali pierwszy model komputerowy wyłaczania współbieżnego – Akro-Co-Twin [25–27]. Następnie Potente opracował program SIGMA [28, 29], a Vergnes program Ludovic [30]. Prace nad wyłaczaniem przeciwbieżnym również zainicjowali White i współpr., którzy na podstawie badań przepływu i uplastycznienia tworzywa opracowali pierwszy model komputerowy wyłaczania przeciwbieżnego – Akro-Counter-Twin [31–34]. Badania kontynuowane przez Wilczyńskiego i współpr. zaowocowały programem TSEM [35–37].

Wyłaczanie jednoślimakowe z dozowanym zasilaniem, stanowiące przedmiot tej pracy, do niedawna było słabo poznane. Ostatnio, na podstawie badań doświadczalnych, autorzy [38] zaproponowali model uplastycznienia tworzywa w procesie wyłaczania z dozowanym zasilaniem [39], a następnie opracowali całościowy model procesu [40]. Model rozszerzono na niekonwencjonalne rozwiązania konstrukcyjne ślimaków [41, 42], a następnie, autorzy podjęli badania doświadczalne i modelowe wyłaczania z dozowanym zasilaniem mieszanin polimerów [43–45].

Jak dotąd brakuje modelu wyłaczania polimerowych kompozytów drzewnych, w tym także modelu wyłaczania jednoślimakowego z dozowanym zasilaniem.

## MODELOWANIE

Wyłaczanie to ciągły proces przetwórstwa tworzyw realizowany w linii technologicznej obejmującej połączone szeregowo: wyłaczarkę, głowicę, urządzenie kalibrująco-chłodzące, urządzenie odbierające itd. Podstawą analizy procesu wyłaczania jest zasada zachowania ciągłości przepływu, stanowiąca że natężenie przepływu tworzywa w tym procesie jest stałe w kolejnych elementach linii technologicznej. Warunki pracy wyłaczarki, wynikające ze współdziałania ślimaka i głowicy, są definiowane przez tzw. punkt pracy wyłaczarki, określający ciśnienie i wydajność wyłaczania.

Całościowy model procesu wyłaczania musi więc opisywać wzajemnie sprzężony przepływ tworzywa w wyłaczarkę i głowicę, a także kolejne fazy przepływu tworzywa w wyłaczarkę od zasobnika do głowicy wyłaczarskiej.

W wypadku wyłaczania z zasilaniem grawitacyjnym (bez dozowania) punkt pracy wyłaczarki wyznacza się w procedurze obliczeń iteracyjnych, w której bada się zgodność przyrostu ciśnienia w wyłaczarkę ze spadkiem ciśnienia w głowicy wyłaczarskiej.

W warunkach wyłaczania z dozowanym zasilaniem natężenie przepływu tworzywa jest ustalone (zadane), nie ma więc potrzeby stosowania iteracyjnej procedury poszukiwania punktu pracy wyłaczarki. Znane jest natężenie przepływu, ale nie jest określona przestrzeń, w której jest generowane ciśnienie, tzn. przestrzeń całkowitego wypełnienia ślimaka. Przestrzeń tę wyznacza się w wyniku iteracyjnego poszukiwania zbieżności obliczonych wartości temperatury tworzywa z jego temperaturą topnienia, która stanowi parametr materiałowy, niezmienny w toku obliczeń [40].

Podstawę modelowania procesu wyłaczania stanowi założenie, że proces ten jest reprezentowany przez szeregowe połączenie elementarnych przestrzeni o ustalonym natężeniu przepływu.

$$G = G_1 = \dots = G_i \dots G_n \quad (1)$$

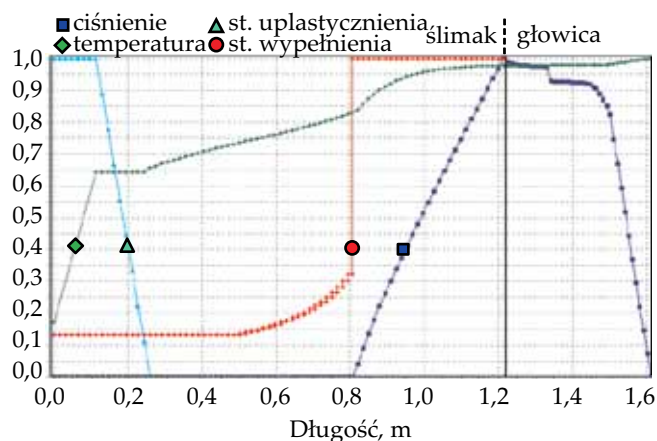
gdzie:  $G$  – masowe natężenie przepływu tworzywa (kg/h),  $G_1$  – natężenie przepływu w pierwszej przestrzeni elementarnej,  $G_i$  – natężenie przepływu w  $i$ -tej przestrzeni elementarnej,  $G_n$  – natężenie przepływu w  $n$ -tej przestrzeni elementarnej.

Wartości parametrów procesu wyłaczania, np. ciśnienia i temperatury, na wejściu każdej elementarnej przestrzeni przepływu są równe wartościom tych parametrów na wyjściu przestrzeni poprzedniej, np.:

$$T_{i,in}(z) = T_{i-1,out}(z - \Delta z) \quad (2)$$

gdzie:  $T_{i,in}(z)$  – wartość parametru (np. temperatury) na początku  $i$ -tej przestrzeni,  $T_{i-1,out}$  – wartość parametru na końcu  $(i - 1)$ -tej przestrzeni,  $z$  – położenie przestrzeni elementarnej wzdłuż długości kanału ślimaka,  $\Delta z$  – długość przestrzeni elementarnej.

Podstawę prezentowanego tutaj modelowania stanowi niedawno opracowany dwuetapowy model uplastycznienia tworzywa w procesie wyłaczania jednoślimakowego z dozowanym zasilaniem [39], zgodnie z którym w obszarze niewypełnionego ślimaka zachodzi uplastycznienie w wyniku przewodzenia, natomiast w obszarze wypełnionego ślimaka zachodzi uplastycznienie dyspersyjne. Takie modelowanie wykorzystano z powodzeniem do symulacji wyłaczania z dozowanym zasilaniem tworzyw termoplastycznych, np. [40–42], a także mieszanin polimerów, np. [43, 45], również z zastosowaniem ślimaków niekonwencjonalnych.



Rys. 1. Ogólna charakterystyka procesu wytłaczania; prędkość obrotowa ślimaka  $N = 30$  obr./min, natężenie przepływu  $G_{SF} = 8$  kg/h

Fig. 1. Overall characteristics of the extrusion process; screw speed  $N = 30$  rpm, flow rate  $G_{SF} = 8$  kg/h

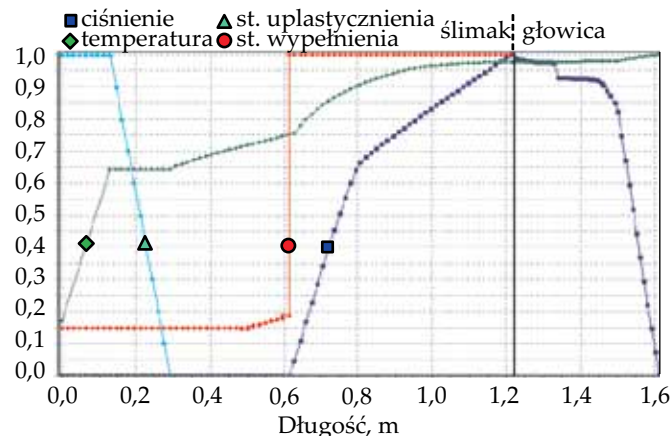
Procedura modelowania polega na wyznaczeniu profilu uplastycznienia tworzywa w wytłaczarce, w kierunku od zasobnika do głowicy, tzn. do przodu (ang. *forward*) oraz profilu ciśnienia i wypełnienia ślimaka w kierunku przeciwnym, od głowicy do zasobnika, czyli do tyłu (ang. *backward*). Profil temperatury w fazie uplastycznienia jest wyznaczany w kierunku „do przodu”, natomiast w fazie dozowania – „do tyłu”. Taka procedura umożliwia lokalizację miejsca, w którym ślimak wypełnia się tworzywem. Od tego punktu następuje generacja ciśnienia, a także potencjalna zmiana mechanizmu uplastycznienia tworzywa.

Przykład symulacji procesu wytłaczania jednoślیمakowego z dozowanym zasilaniem przedstawiono na rys. 1 i rys. 2 w postaci ogólnej, bezwymiarowej charakterystyki wytłaczania, obejmującej najważniejsze parametry procesu: rozkład ciśnienia i temperatury, profil uplastycznienia tworzywa oraz profil wypełnienia ślimaka wytłaczarki. Profil uplastycznienia tworzywa definiuje stosunek objętości tworzywa niestopionego do całkowitej objętości tworzywa. Jest równy jedności, gdy tworzywo jest w stanie stałym, natomiast równy zero, gdy jest całkowicie stopione. Profil wypełnienia ślimaka określa stosunek objętości tworzywa do objętości przestrzeni, w której się znajduje. Jest równy 1, gdy ślimak jest wypełniony tworzywem, natomiast gdy ślimak jest pusty – równa się 0.

T a b e l a 1. Charakterystyka WPC Beologic 50/50 PP copo inj 4

T a b l e 1. Characteristics of WPC Beologic 50/50 PP copo inj 4

Właściwości		Wartość	Norma
Fizyczne	Gęstość w stanie stałym, g/cm <sup>3</sup>	1,1–1,3	Beologic
	Gęstość nasypowa, g/cm <sup>3</sup>	0,4–0,6	Beologic
Mechaniczne	Moduł Younga, MPa	4172,37	ISO 527-1, -2
	Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	46,95	ISO 527-1, -2
	Udarność (23 °C), kJ/m <sup>2</sup>	15,04	ISO 179/U/1J



Rys. 2. Ogólna charakterystyka procesu wytłaczania; prędkość obrotowa ślimaka  $N = 30$  obr./min, natężenie przepływu  $G_{SF} = 9$  kg/h

Fig. 2. Overall characteristics of the extrusion process; screw speed  $N = 30$  rpm, flow rate  $G_{SF} = 9$  kg/h

## BADANIA SYMULACYJNO-DOŚWIADCZALNE

Wykonano badania symulacyjno-doświadczalne wytłaczania kompozytu drzewnego 50/50 PP copo inj 4 (firmy Beologic) na osnowie polipropylenu (PP) o zawartości mączki drzewnej 50 % mas. Charakterystykę tego tworzywa przedstawia tabela 1. Gęstość stopionego kompozytu ( $\rho_m = 0,996$  g/cm<sup>3</sup>) oraz wskaźnik szybkości płynięcia [ $MFR = 0,86$  g/10 min (190 °C, 5,00 kg)] wyznaczono na podstawie wyników badań własnych.

Badania symulacyjno-doświadczalne prowadzono w warunkach klasycznego, grawitacyjnego zasilania wytłaczarki oraz z dozowanym zasilaniem tworzywa, na różnym poziomie dozowania z wykorzystaniem wytłaczarki Metalchem T-45 o średnicy  $D = 45$  mm i stosunku  $L/D = 27$ , zaopatrzonej w dozownik ślimakowy. Zastosowano klasyczny ślimak trójstrefowy oraz głowicę do wytłaczania profili płaskich o wymiarach  $20 \times 2$  mm.

Określano mechanizm przepływu kompozytu, dokonano pomiaru ciśnienia i natężenia przepływu. Tensometryczne czujniki ciśnienia umieszczono w cylindrze i w głowicy. Oceny mechanizmu przepływu dokonano techniką „zimnego eksperymentu” wytłaczania, polegającą na obserwacji próbek tworzywa zdjętych ze ślimaka wytłaczarki po jej zatrzymaniu i gwałtownym ochłodzeniu (ang. *Screw Pulling-out Technique*), np. [15].

Stosowano dwie wartości prędkości obrotowej ślimaka:  $N = 30$  obr./min i  $N = 70$  obr./min i następujące wartości temperatury w kolejnych strefach wylączarki:  $T_I = 190$  °C,  $T_{II} = 190$  °C,  $T_{III} = 190$  °C,  $T_{IV} = 200$  °C i w głowicy  $T_C = 200$  °C.

Lepkość kompozytu wyznaczano za pomocą reometru kapilarnego Rheograph 6000 firmy Goettfert, działającego na zasadzie stałej szybkości ścinania. Pomiar wykonano w zakresach temperatury 175–195 °C i szybkości ścinania 5–3500 s<sup>-1</sup>.

Szybkość ścinania korygowano poprawką Rabinowitscha z zastosowaniem poprawki Bagleya. Krzywą lepkości kompozytu wyznaczano na podstawie logarytmicznego równania Kleina:

$$\ln \eta = A_0 + A_1 \ln \dot{\gamma} + A_{11} \ln^2 \dot{\gamma} + A_{12} T \ln \dot{\gamma} + A_2 T + A_{22} T^2 \quad (3)$$

gdzie:  $\eta$  – lepkość,  $\dot{\gamma}$  – szybkość ścinania,  $T$  – temperatura,  $A_0, A_1, A_{11}, A_{12}, A_2, A_{22}$  – parametry równania Kleina ( $A_0 = 12,469780638$ ,  $A_1 = -0,8345507$ ,  $A_{11} = -0,017832191$ ,  $A_{12} = 0,001331159$ ,  $A_2 = -0,008413991$ ,  $A_{22} = -0,000025745$ ), uzyskane na podstawie obliczeń regresyjnych.

Pozostałe dane materiałowe zaczerpnięto z literatury.

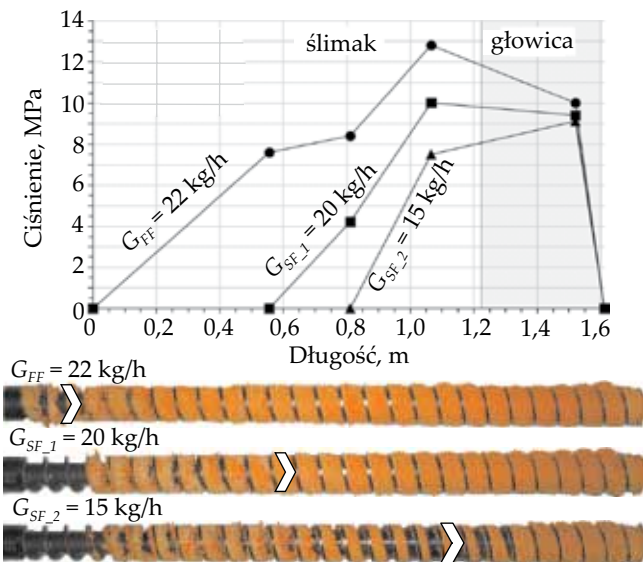
Rysunki 1 i 2 przedstawiają wyniki obliczeń symulacyjnych wylączania z dozowanym zasilaniem, z prędkością obrotową ślimaka  $N = 30$  obr./min, na dwóch poziomach dozowania kompozytu. Wraz ze wzrostem natężenia przepływu wydłuża się przestrzeń całkowite-

go wypełnienia ślimaka. W niewypełnionym obszarze ślimaka, gdzie współczynnik wypełnienia jest mniejszy od jedności, ciśnienie nie jest generowane.

Rysunki 3 i 4 przedstawiają wyniki badań doświadczalnych, zdjęcia ślimaków wyjętych z wylączarki w ramach „zimnego eksperymentu” oraz wyniki pomiaru ciśnienia. W warunkach klasycznego (bez dozowania) wylączania generowane jest wyższe ciśnienie. Gdy natężenie przepływu rośnie w warunkach zasilania dozowanego zwiększa się również ciśnienie oraz wydłuża się przestrzeń całkowitego wypełnienia ślimaka. W obszarze niewypełnionego ślimaka ciśnienie nie jest generowane.

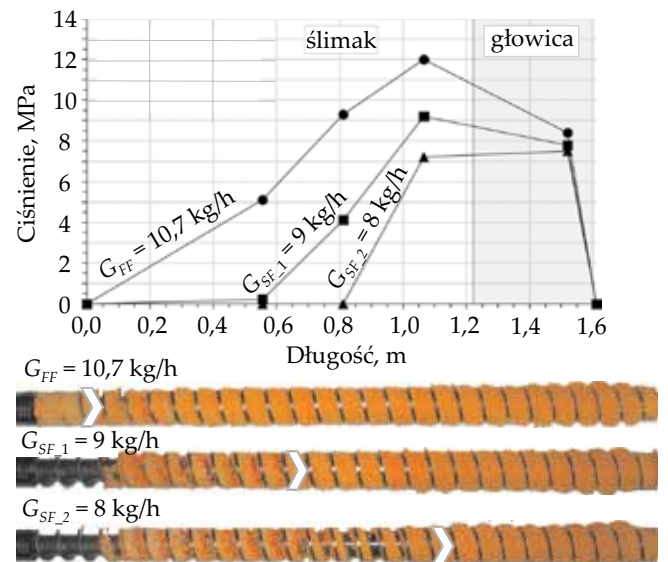
Przedstawione na rys. 5 i rys. 6 wyniki weryfikacji doświadczalnej obrazują wpływ natężenia przepływu tworzywa na przebieg procesu w warunkach wylączania z prędkością obrotową ślimaka  $N = 30$  obr./min i  $N = 70$  obr./min, na dwóch poziomach dozowania oraz w warunkach zasilania grawitacyjnego.

Stopień wypełnienia ślimaka weryfikowano na podstawie oceny długości kanału ślimaka całkowicie wypełnionego tworzywem. Początek obszaru całkowitego wypełnienia ślimaka oznaczono strzałką. Punkt ten odpowiada wartości stopnia wypełnienia równej 1. Wypełnienie ślimaka zwiększa się ze wzrostem natężenia przepływu. Należy jednak pamiętać, że stopień wypełnienia zależy nie tylko od natężenia przepływu, ale także od prędkości obrotowej ślimaka, a dokładniej od stosunku



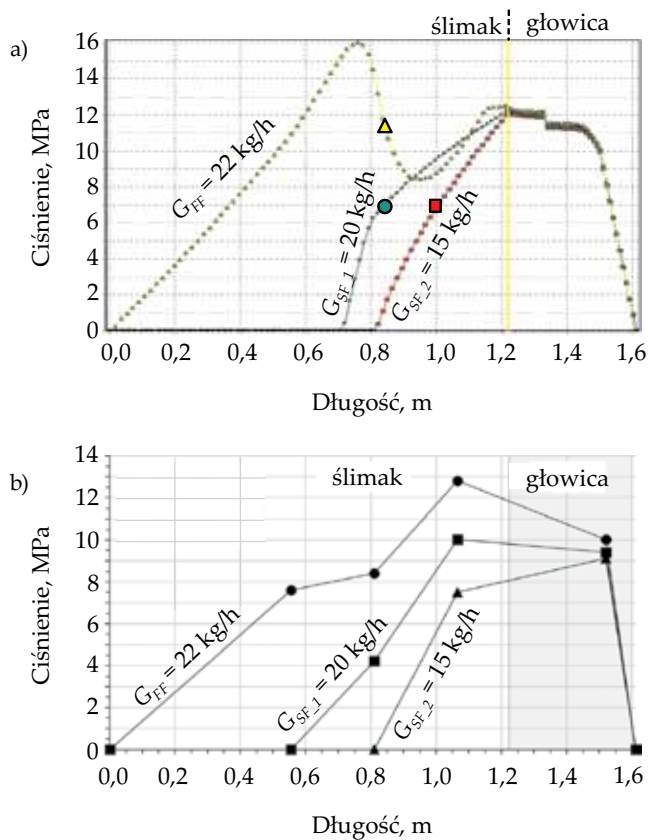
Rys. 3. Wyniki badań doświadczalnych wylączania z prędkością obrotową ślimaka  $N = 70$  obr./min, zasilaniem grawitacyjnym  $G_{FF} = 22$  kg/h oraz zasilaniem dozowanym  $G_{SF_1} = 20$  kg/h i  $G_{SF_2} = 15$  kg/h (strzałka wskazuje początek całkowitego wypełnienia ślimaka)

Fig. 3. Experimental results for extrusion at the screw speed  $N = 70$  rpm, flood feeding  $G_{FF} = 22$  kg/h, starve feeding  $G_{SF_1} = 20$  kg/h and  $G_{SF_2} = 15$  kg/h (an arrow shows the beginning of the fully filled region)



Rys. 4. Wyniki badań doświadczalnych wylączania z prędkością obrotową ślimaka  $N = 30$  obr./min, zasilaniem grawitacyjnym  $G_{FF} = 10,7$  kg/h oraz zasilaniem dozowanym  $G_{SF_1} = 9$  kg/h i  $G_{SF_2} = 8$  kg/h (strzałka wskazuje początek całkowitego wypełnienia ślimaka)

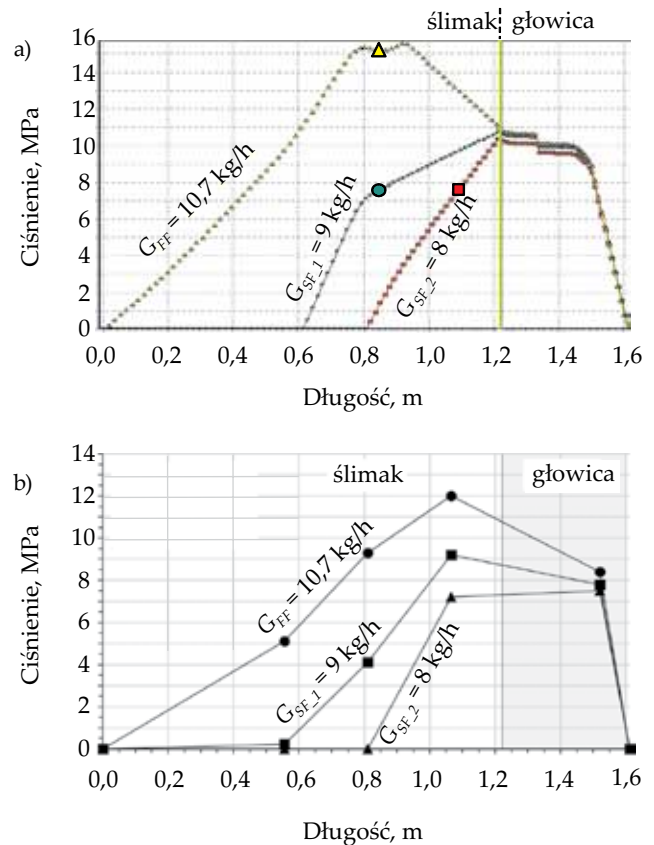
Fig. 4. Experimental results for extrusion at the screw speed  $N = 30$  rpm, flood feeding  $G_{FF} = 10,7$  kg/h, starve feeding  $G_{SF_1} = 9$  kg/h and  $G_{SF_2} = 8$  kg/h (an arrow shows the beginning of the fully filled region)



Rys. 5. Wyniki: a) symulacji, b) pomiaru ciśnienia w procesie wytłaczania z prędkością obrotową ślimaka  $N = 70$  obr./min, zasilaniem grawitacyjnym  $G_{FF} = 22$  kg/h oraz zasilaniem dozowanym  $G_{SF,1} = 20$  kg/h i  $G_{SF,2} = 15$  kg/h  
 Fig. 5. Pressure: a) computation, b) measurement results for extrusion at the screw speed  $N = 70$  rpm, flood feeding  $G_{FF} = 22$  kg/h, starve feeding  $G_{SF,1} = 20$  kg/h and  $G_{SF,2} = 15$  kg/h

natężenia przepływu tworzywa do prędkości obrotowej ślimaka, czyli  $G/N$ . Stopień wypełnienia jest stosunkowo dobrze przewidywany, zarówno w warunkach prędkości obrotowej  $N = 30$  obr./min, jak i  $N = 70$  obr./min. Rozbieżności nie przekraczały 15 %.

Weryfikację obliczeń rozkładu ciśnienia przedstawiono na rys. 5 i 6. Ciśnienie było generowane jedynie w obszarze całkowitego wypełnienia ślimaka. Profil ciśnienia był dosyć dobrze przewidywany, zarówno w wypadku wytłaczania z dozowanym zasilaniem, jak i wytłaczania tradycyjnego, chociaż w odniesieniu do wytłaczania z zasilaniem grawitacyjnym ciśnienie było przeszacowane. Ciśnienie rośnie ze zwiększeniem natężenia przepływu, przy czym w obszarze niewypełnionego ślimaka jest równe zero. Największe wartości ciśnienia uzyskano w procesie wytłaczania tradycyjnego. Interesującym zjawiskiem jest znaczne zmniejszenie maksymalnego ciśnienia w wytłaczarce w wyniku niewielkiego zmniejszenia natężenia przepływu, od natężenia  $G_{FF}$  (wytłaczanie tradycyjne) do natężenia  $G_{SF,1}$  lub  $G_{SF,2}$  (wytłaczanie z dozowanym zasilaniem). Zużycie energii w tym wypadku z pewnością też będzie znacznie mniejsze.



Rys. 6. Wyniki: a) symulacji, b) pomiaru ciśnienia w procesie wytłaczania z prędkością obrotową ślimaka  $N = 30$  obr./min, zasilaniem grawitacyjnym  $G_{FF} = 10,7$  kg/h oraz zasilaniem dozowanym  $G_{SF,1} = 9$  kg/h i  $G_{SF,2} = 8$  kg/h  
 Fig. 6. Pressure: a) computation, b) measurement results for extrusion at the screw speed  $N = 30$  rpm, flood feeding  $G_{FF} = 10,7$  kg/h, starve feeding  $G_{SF,1} = 9$  kg/h and  $G_{SF,2} = 8$  kg/h

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzono badania symulacyjno-doświadczalne wytłaczania kompozytu drzewnego na podstawie polipropylenu. Na podstawie modelu komputerowego wytłaczania z dozowanym zasilaniem wykonano obliczenia symulacyjne uplastycznienia kompozytu, rozkładu ciśnienia i temperatury kompozytu oraz stopnia wypełnienia ślimaka. Wyniki symulacji zweryfikowano doświadczalnie. Jest to pierwsza całościowa symulacja tego typu procesu wytłaczania, obejmująca określenie przebiegu uplastycznienia tworzywa, rozkładu ciśnienia tworzywa oraz stopnia wypełnienia ślimaka.

Badania symulacyjno-doświadczalne wykazały, że ślimak wypełnia się całkowicie tworzywem jedynie w końcowej części wytłaczarki, przed głowicą wytłaczarską. Wielkość obszaru całkowitego wypełnienia ślimaka zależy od stosunku natężenia przepływu do prędkości obrotowej ślimaka. Stopień wypełnienia ślimaka zwiększa się wraz ze wzrostem natężenia przepływu tworzywa (przy stałej prędkości obrotowej ślimaka), a także zmniejszeniem prędkości obrotowej ślimaka (przy stałym na-

teżeniu przepływu tworzywa). Ciśnienie jest generowane jedynie w obszarze całkowitego wypełnienia ślimaka i rośnie wraz ze zwiększaniem natężenia przepływu tworzywa. Profil ciśnienia jest dobrze prognozowany.

Przedstawiony model dość dobrze opisuje proces wytłaczania kompozytów drzewnych, chociaż nie uwzględnia granicy płynięcia tworzywa i poślizgu na ściankach kanału przepływu. Warto rozważyć zastosowanie uogólnionej metody modelowania uplastyczniania tworzyw w procesie wytłaczania, niewymagającej znajomości mechanizmu uplastyczniania, polegającej na modelowaniu przepływu dwufazowego (płyn/ciało stałe) jako przepływu jednofazowego. Uzyskany w wyniku obliczeń rozkład temperatury definiuje obszary występowania tworzywa w stanie stałym lub płynnym. Do obliczeń można wówczas stosować narzędzia modelowania obliczeniowej mechaniki płynów (ang. CFD, *Computational Fluid Dynamics*), np. Ansys-Polyflow [46]. Taką koncepcję modelowania przedstawiono ostatnio w pracy [47].

#### LITERATURA

- [1] Bledzki A.K., Reihmane S., Gassan J.J.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **1998**, 37, 451. <http://dx.doi.org/10.1080/03602559808001373>
- [2] Oksman Niska K., Sain M.: "Wood-Polymer Composites", Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Cambridge 2008.
- [3] Zajchowski S., Ryszkowska J.: *Polimery* **2009**, 54, 674.
- [4] Li T.Q., Wolcott M.P.: *Polymer Engineering and Science* **2005**, 45, 549. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20308>
- [5] Li T.Q., Wolcott M.P.: *Polymer Engineering and Science* **2006**, 46, 114. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20432>
- [6] Li T.Q., Wolcott M.P.: *Polymer Engineering and Science* **2006**, 46, 464. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20505>
- [7] Xiao K., Tzoganakis C.: *ANTEC Plastics Annual Technical Conference, Conference Proceedings* **2002**, 38, 252.
- [8] Xiao K., Tzoganakis C.: *ANTEC Plastics Annual Technical Conference, Conference Proceedings* **2003**, 39, 197.
- [9] Xiao K., Tzoganakis C.: *ANTEC Plastics Annual Technical Conference, Conference Proceedings* **2004**, 40, 448.
- [10] Hristov V., Takács E., Vlachopoulos J.: *Polymer Engineering and Science* **2006**, 46, 1204. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20592>
- [11] Santi R.C., Hage E.Jr., Vlachopoulos J., Correa C.A.: *International Polymer Processing* **2009**, 24, 346. <http://dx.doi.org/10.3139/217.2238>
- [12] Lewandowski K., Piszczek K., Zajchowski S., Mirowski J.: *Polymer Testing* **2016**, 51, 58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.02.004>
- [13] Wilczyński K.J.: *Polimery* **2018**, 63, 213. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.3.5>
- [14] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A. i in.: *International Polymer Processing* **2015**, 30, 113. <http://dx.doi.org/10.3139/217.3007>
- [15] Wilczyński K., Buziak K., Bartnik M.: *Polimery* **2016**, 61, 195. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.195>
- [16] Ariffin A., Ahmad M.S.B.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **2011**, 50, 395. <http://dx.doi.org/10.1080/03602559.2010.543228>
- [17] 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>
- [18] Tadmor Z.: *Polymer Engineering and Science* **1966**, 6, 185. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760060303>
- [19] Tadmor Z., Duvdevani I., Klein I.: *Polymer Engineering and Science* **1967**, 7, 198. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760070313>
- [20] Tadmor Z., Klein I.: "Engineering Principles of Plasticating Extrusion", Van Nostrand Reinhold, New York 1970.
- [21] Acur E.E., Vlachopoulos J.: *Polymer Engineering and Science* **1982**, 22, 1084. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760221706>
- [22] Potente H., Hanhart W., Schöppner V.: *International Polymer Processing* **1993**, 8, 335. <http://dx.doi.org/10.3139/217.930335>
- [23] Wilczyński K.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **1999**, 38, 581. <http://dx.doi.org/10.1080/03602559909351602>
- [24] Altinkaynak A., Gupta M., Spalding M.A., Crabtree S.L.: *International Polymer Processing* **2011**, 26, 182. <http://dx.doi.org/10.3139/217.2419>
- [25] Bawiskar S., White J.L.: *International Polymer Processing* **1995**, 10, 105. <http://dx.doi.org/10.3139/217.950105>
- [26] Bawiskar S., White J.L.: *International Polymer Processing* **1997**, 12, 331. <http://dx.doi.org/10.3139/217.970331>
- [27] Bawiskar S., White J.L.: *Polymer Engineering and Science* **1998**, 38, 727. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.10238>
- [28] Potente H., Melish U.: *International Polymer Processing* **1996**, 11, 101. <http://dx.doi.org/10.3139/217.960101>
- [29] Potente H., Bastian M., Flecke J.: *Advances Polymer Technology* **1999**, 18, 147. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2329\(199922\)18:2<147::AID-ADV5>3.0.CO;2-X](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1098-2329(199922)18:2<147::AID-ADV5>3.0.CO;2-X)
- [30] Vergnes B., Della Valle G., Delamare L.: *Polymer Engineering and Science* **1998**, 38, 1781. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.10348>
- [31] Hong M.H., White J.L.: *International Polymer Processing* **1999**, 14, 136. <http://dx.doi.org/10.3139/217.1538>
- [32] Wilczyński K., White J.L.: *International Polymer Processing* **2001**, 16, 257. <http://dx.doi.org/10.3139/217.1645>
- [33] Wilczyński K., White J.L.: *Polymer Engineering and Science* **2003**, 43, 1715.

- <http://dx.doi.org/10.1002/pen.10145>
- [34] Wilczyński K., Jiang Q., White J.L.: *International Polymer Processing* **2007**, 22, 198.  
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2001>
- [35] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polimery* **2011**, 56, 45.
- [36] Wilczyński K., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polymer Engineering and Science* **2012**, 52, 449.  
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.22103>
- [37] Lewandowski A., Wilczyński K.J., Nastaj A., Wilczyński K.: *Polymer Engineering and Science* **2015**, 55, 2838.  
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.24175>
- [38] Wilczyński K., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polymer Engineering and Science* **2012**, 52, 1258.  
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.23076>
- [39] Wilczyński K., Nastaj A., Wilczyński K.J.: *International Polymer Processing* **2013**, 28, 34.  
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2640>
- [40] Wilczyński K.J., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.: *Polymer Engineering and Science* **2014**, 54, 2362.  
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.23797>
- [41] Wilczyński K.J., Lewandowski A., Nastaj A., Wilczyński K.: *International Polymer Processing* **2016**, 31, 82.  
<http://dx.doi.org/10.3139/217.3154>
- [42] Wilczyński K.J., Lewandowski A., Nastaj A., Wilczyński K.: *Advances in Polymer Technology* **2017**, 46, 23.  
<http://dx.doi.org/10.1002/adv.21873>
- [43] Wilczyński K.J., Nastaj A.: *Polimery* **2015**, 60, 199.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.199>
- [44] Wilczyński K.J., Lewandowski A., Wilczyński K.: *Polymer Engineering and Science* **2016**, 56, 1349.  
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.24368>
- [45] Wilczyński K.J., Lewandowski A., Nastaj A., Wilczyński K.: *Advances in Polymer Technology* **2017**, 36, 23.  
<http://dx.doi.org/10.1002/adv.21570>
- [46] Wilczyński K., Tyszkiewicz A.: *Polimery* **1996**, 41, 107.
- [47] Lewandowski A., Wilczyński K.: *Polimery* **2018**, 63, 444.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.6.5>

Otrzymano 3 XII 2017 r.

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
zaprasza do udziału

w 14. Środkowo-Europejskiej Konferencji

**RECYKLING I ODZYSK  
INNOWACYJNE TECHNOLOGIE MATERIAŁÓW POLIMEROWYCH  
NAUKA – PRZEMYSŁ 2018**

Szczecin/Eberswalde (Niemcy), 24–26 września 2018 r.

**Tematyka konferencji:**

- zagadnienia prawno-organizacyjne, logistyczne recyklingu i odzysku materiałów
- technologie utylizacji
- maszyny i urządzenia
- kształtowanie właściwości i nowe aplikacje
- technologia przetwórstwa tworzyw i kompozytów polimerowych
- biomasa, biomateriały, biokompozyty
- odzysk i oszczędność energii

**Program naukowy konferencji obejmuje:** sesje konferencyjne w Szczecinie i w Eberswalde oraz zwiedzanie nowoczesnego Zakładu Termicznej Utylizacji Odpadów w Szczecinie

**Organizatorzy:**

prof. dr hab. inż. Andrzej K. Błędzki  
dr hab. inż. Zenon Tartakowski, prof. nadzw.

**Opłata konferencyjna:** 1100 zł + 23 % VAT. Opłata obejmuje koszty pobytu, zakwaterowanie w pokoju 2-os. (możliwość dopłaty do pokoju 1-os.), przejazd, program fakultatywny, materiały konferencyjne.

**Informacje:** dr hab. inż. Zenon Tartakowski, prof. nadzw., tel.: 91 449 49 59, 609 322 410,  
e-mail: [recykling2018@gmail.com](mailto:recykling2018@gmail.com)

**Adres do korespondencji:** Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Instytut Inżynierii Materiałowej, 70-310 Szczecin, Al. Piastów 19, RECYKLING 2018