

Badanie przepływu polimerowych kompozytów drzewnych w procesie wytłaczania jednoślindakowego z dozowanym zasilaniem

Krzysztof J. Wilczyński¹⁾, ^{*}, Kamila Buziak¹⁾

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2017.680

Streszczenie: Wykonano badania doświadczalne przepływu polimerowych kompozytów drzewnych w procesie wytłaczania jednoślindakowego z dozowanym zasilaniem wytłaczarki. Prowadzono proces wytłaczania kompozytów polipropylenowych (PP) z różnym udziałem masowym mączki drzewnej, w różnych warunkach technologicznych przetwórstwa i na różnym poziomie dozowania tworzywa. Na podstawie „zimnego eksperymentu” wytłaczania z zastosowaniem techniki „wyciągania ślimaka” oceniano przebieg uplastyczniania i przepływu kompozytu. Stwierdzono, że przepływ (tj. transport tworzywa w stanie stałym, uplastycznianie oraz przepływ tworzywa w stanie uplastycznionym) polimerowych kompozytów drzewnych w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem przebiega odmiennie niż przepływ w klasycznym procesie wytłaczania bez dozowania. Ponadto, różni się on od przepływu tworzyw termoplastycznych w procesie z dozowanym zasilaniem wytłaczarki. Mechanizm uplastyczniania w strefie niecałkowitego wypełnienia ślimaka jest podobny do mechanizmu uplastyczniania tworzyw termoplastycznych, polegającego na przewodzeniu. Natomiast uplastycznianie kompozytu w strefie całkowitego wypełnienia ślimaka jest zależne od zawartości mączki drzewnej w osnowie PP. W wypadku dużej zawartości mączki drzewnej nie obserwuje się znanego mechanizmu uplastyczniania Tadmora. Występuje wówczas mechanizm uplastyczniania jednokierunkowego. Mechanizm Tadmora uwidacznia się w wypadku mniejszej zawartości mączki drzewnej w kompozycie PP.

Słowa kluczowe: wytłaczanie jednoślindakowe z dozowaniem, polimerowe kompozyty drzewne, mechanizm uplastyczniania.

Study on the flow of wood plastic composites in the starve fed single screw extrusion

Abstract: Experimental studies have been performed on the flow of wood plastic composite in the starve fed single screw extrusion. The extrusion process of polypropylene (PP) composite with various wood flour content at different operating conditions and level of starvation has been investigated. Melting and flow of the material were evaluated using “Screw Pulling-out Technique”. It was stated that the flow of wood plastic composite (*i.e.*, conveying of the solid plastic material, melting and melt flow) in the starve fed extrusion is different from the flow of wood plastic composite in the flood fed extrusion. Also, it differs from the flow of thermoplastics in the starve fed extrusion. Melting in the partially filled region is similar to the melting of thermoplastics in this region, *i.e.*, it consists mainly in the conduction, while melting in the fully filled region is dependent on the wood flour content. At high content of wood flour, melting does not proceed according to the well-known Tadmor model, and one-dimensional melting is observed. At low wood flour content, the applicability of Tadmor model is clearly seen.

Keywords: starve fed single screw extrusion, wood plastics composites, melting.

Polimerowe kompozyty drzewne (ang. WPC, *Wood Plastic Composites*) pojawiły się na rynku tworzyw w latach dziewięćdziesiątych. Obecnie, światowa produkcja WPC wynosi ok. 4 mln ton. Kompozyty drzewne znajdują szerokie zastosowanie w gospodarce jako zamiennik drewna.

Są odporne na działanie warunków atmosferycznych, zwłaszcza wilgoci. Znaczenie mają głównie kompozyty na osnowie polipropylenu (PP), polietylenu dużej gęstości (HDPE) i poli(chlorku winylu) (PVC) [1–4], a podstawową technologią ich przetwórstwa jest wytłaczanie.

Wiedza z zakresu reologii kompozytów drzewnych jest stosunkowo niewielka. Wiadomo, jak wynika z prac Li i Wolcotta [5–7], Xiao i Tzoganakisa [8–11], Vlachopoulos i Hristowa [12–14], Zolfaghariego [15] i Oksman

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

^{*} Autor do korespondencji; e-mail: wilczynski_k@wp.pl

Niskiej [3], że są to materiały nienewtonowskie, a ich lepkość zmniejsza się ze wzrostem zarówno szybkości ścinania, jak i temperatury. Właściwości reologiczne kompozytów zależą od ich składu. Zwiększenie zawartości mączki drzewnej wpływa na wzrost ich lepkości, a jednocześnie zmniejszenie sprężystości podczas przepływu. Materiały WPC wykazują granicę płynięcia oraz poślizg na ściankach kanału przepływu. Wiedza dotycząca przepływu polimerowych kompozytów drzewnych w procesie wytłaczania jest jeszcze uboższa – ogranicza się do prac Xiao i Tzoganakisa [9, 11]. Zasób informacji dotyczących modelowania procesu wytłaczania zaawansowanych tworzyw polimerowych, takich jak: mieszaniny polimerów, kompozyty polimerowe lub tworzywa napełnione, przedstawiono w publikacjach [16, 17].

W ostatnich latach autorzy podjęli prace obejmujące badanie przepływu polimerowych kompozytów drzewnych w procesie wytłaczania, w szczególności charakterystykę przepływu tych materiałów i możliwy mechanizm ich uplastycznienia [18, 19]. Prowadzone badania dotyczyły procesu klasycznego wytłaczania z zasilaniem grawitacyjnym, bez dozowania tworzywa. Celem niniejszej pracy było określenie mechanizmu uplastycznienia kompozytów drzewnych w procesie wytłaczania jednoślindakowego z dozowanym zasilaniem wytłaczarki.

Dopiero niedawno, na podstawie obszernych badań doświadczalnych [20], autorzy zaproponowali model uplastycznienia tworzyw termoplastycznych w procesie wytłaczania jednoślindakowego z dozowanym zasilaniem [21], a następnie opracowali całościowy model procesu [22]. Pierwotnie model ten opracowano dla ślimaków klasycznych, na dalszym etapie rozszerzono go na niekonwencjonalne rozwiązania konstrukcyjne ślimaków [23, 24]. Podjęto również badania modelowe procesu wytłaczania jednoślindakowego z dozowanym zasilaniem mieszanin polimerów [25–27].

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Program badań

Program badań obejmował wytłaczanie jednoślindakowe z dozowaniem polimerowych kompozytów drzewnych na osnowie polipropylenu o różnym udziale wagowym mączki drzewnej (25–75 %), w różnych warunkach przetwórstwa (temperatury i prędkości obrotowej ślimaka), przy różnym poziomie dozowania. Badania obejmowały ocenę mechanizmu uplastycznienia kompozytu oraz pomiar natężenia przepływu, ciśnienia, a także poboru prądu przez silnik wytłaczarki. Ocenę mechanizmu uplastycznienia prowadzono, stosując znaną technikę „zimnego eksperymentu” wytłaczania, polegającą na obserwacji próbek tworzywa zdjętych ze ślimaka wytłaczarki po jej zatrzymaniu i gwałtownym ochłodzeniu (ang. *Screw Pulling-out Technique*), np. [18].

Materiały

– Tworzywo WPC Lignocel® Compound BK firmy J. Rettenmaier & Söhne, o gęstości $\rho = 1,21 \text{ g/cm}^3$ i wskaźniku szybkości płynięcia (na podstawie badań własnych) $MFR = 0,86 \text{ g/10 min}$ (190 °C; 5,00 kg), zawierające 25 % mas. PP i 75 % mas. włókien drzewnych WF (mączki drzewnej); oznaczono go WF/PP_75/25.

Charakterystykę cieplno-mechaniczną tworzywa WPC Lignocel® przedstawiono w tabeli 1.

T a b e l a 1. Charakterystyka tworzywa WPC Lignocel® Compound BK

T a b l e 1. Characteristics of wood-polymer composite Lignocel® Compound BK

Właściwość	Wartość
Gęstość, g/cm^3	1,21
Wytrzymałość na zginanie, N/mm^2	85,75
Moduł sprężystości przy zginaniu, N/mm^2	8038
Wytrzymałość na rozciąganie, N/mm^2	41,75
Moduł sprężystości wzdłużnej, N/mm^2	6360
Udarność metodą Charpy'ego, kJ/m^2	10,97

– Polipropylen PP Eltex PHCW280N6970 firmy INEOS Olefins Europe, o gęstości $\rho = 0,928 \text{ g/cm}^3$, wskaźniku szybkości płynięcia $MFR = 20,0 \text{ g/10 min}$ (230 °C; 2,16 kg) i temperaturze topnienia $T_m = 160 \text{ °C}$.

– Kompozyt WPC i PP o udziale masowym składników 67 % WPC i 33 % PP zawierający 50 % mas. polipropylenu PP i 50 % mas. włókien drzewnych WF (mączki drzewnej); oznaczono go WF/PP_50/50.

– Kompozyt WPC i PP o udziale masowym składników 33 % WPC i 67 % PP zawierający 75 % mas. polipropylenu PP i 25 % mas. włókien drzewnych WF (mączki drzewnej); oznaczono go WF/PP_25/75.

Otrzymywanie kompozytów

Kompozyty WF/PP_50/50 oraz WF/PP_25/75 uzyskano w wyniku wytłaczania za pomocą głowicy granulującej. W celu odróżnienia tworzywa w stanie stałym od tworzywa uplastycznionego, część granulatu polipropylenu (3 % masy granulatu PP) zabarwiono przez dodanie 2 % mas. (w stosunku do masy barwionego PP) barwnika Clariant Remafin Orange CEK 070. Barwienie przeprowadzono w procesie wytłaczania, a zabarwione tworzywo poddano granulacji. Przed procesem wytłaczania kompozytów zabarwiony PP był suszony w temp. 90 °C przez 4 h.

Metodyka badań

Badania prowadzono na specjalistycznym stanowisku procesu wytłaczania z zastosowaniem wytłaczarki jednoślindakowej Metalchem T-45, w trybie klasycznego zasilania grawitacyjnego, tzn. bez dozowania tworzywa,

oraz z dozowanym zasilaniem tworzywa. Wykorzystano klasyczny ślimak trójstrefowy o średnicy $D = 45$ mm, stopniu sprężania $CR = 8/3$ i stosunku długości do średnicy $L/D = 27$ oraz głowicę do wytłaczania prętów o przekroju kołowym. Stanowisko opisano w [18].

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

W kolejnych strefach wytłaczarki wartości temperatury wynosiły:

– w wypadku kompozytu: $T_I = 160$ °C, $T_{II} = 180$ °C, $T_{III} = 190$ °C, $T_{IV} = 190$ °C, $T_C = 180$ °C,



Rys. 1. Wpływ dozowanego zasilania na wypełnienie ślimaka w procesie wytłaczania tworzywa WF/PP_75/25, z prędkością obrotową ślimaka $N = 80$ obr/min: a) $G = 22,41$ kg/h, $G/N = 0,280$, b) $G = 20,38$ kg/h, $G/N = 0,254$, c) $G = 19,85$ kg/h, $G/N = 0,246$

Fig. 1. Effect of starvation on the screw filling in the extrusion of WF/PP_75/25 composite, at screw speed $N = 80$ rpm: a) $G = 22.41$ kg/h, $G/N = 0.280$, b) $G = 20.38$ kg/h, $G/N = 0.254$, c) $G = 19.85$ kg/h, $G/N = 0.246$



Rys. 2. Wpływ dozowanego zasilania na wypełnienie ślimaka w procesie wytłaczania kompozytu WF/PP_50/50, z prędkością obrotową ślimaka $N = 80$ obr/min: a) $G = 22,15$ kg/h, $G/N = 0,277$, b) $G = 20,67$ kg/h, $G/N = 0,258$, c) $G = 19,55$ kg/h, $G/N = 0,244$

Fig. 2. Effect of starvation on the screw filling in the extrusion of WF/PP_50/50 composite, at screw speed $N = 80$ rpm: a) $G = 22.15$ kg/h, $G/N = 0.277$, b) $G = 20.67$ kg/h, $G/N = 0.258$, c) $G = 19.55$ kg/h, $G/N = 0.244$



Rys. 3. Wpływ dozowanego zasilania na wypełnienie ślimaka w procesie wytłaczania kompozytu WF/PP_25/75, z prędkością obrotową ślimaka $N = 80$ obr/min: a) $G = 21,93$ kg/h, $G/N = 0,274$, b) $G = 20,41$ kg/h, $G/N = 0,255$, c) $G = 19,23$ kg/h, $G/N = 0,240$

Fig. 3. Effect of starvation on the screw filling in the extrusion of WF/PP_25/75 composite, at screw speed $N = 80$ rpm: a) $G = 21.93$ kg/h, $G/N = 0.274$, b) $G = 20.41$ kg/h, $G/N = 0.255$, c) $G = 19.23$ kg/h, $G/N = 0.240$

– w wypadku PP: $T_I = 150$ °C, $T_{II} = 180$ °C, $T_{III} = 210$ °C, $T_{IV} = 220$ °C, $T_C = 220$ °C.

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Wpływ dozowanego zasilania na wypełnienie kanałów ślimaka w procesie wytwarzania badanych kompozytów z prędkością obrotową ślimaka $N = 80$ obr/min przedstawiają rys. 1–3. Widać wyraźnie, że wraz ze zmniejszaniem ilości doprowadzanego (dozowanego) do wytłaczarki tworzywa (ang. *starvation*) zmniejsza się przestrzeń całkowitego wypełnienia ślimaka. Oczywiście, zwiększa się wówczas przestrzeń ślimaka niewypełnionego, w której nie jest generowane ciśnienie. Warto zwrócić uwagę, że stopień wypełnienia ślimaka jest nie tyle funkcją masowego natężenia przepływu dozowanego tworzywa (G), co funkcją stosunku masowego natężenia przepływu G do prędkości obrotowej ślimaka N , czyli G/N .

W początkowej części ślimaka tworzywo gromadzi się przy aktywnym zwoju i zagęszcza się stopniowo, przy czym zagęszczanie następuje od strony zwoju atakującego. Prostokąty na rys. 1–3 wskazują obszar, w którym tworzywo było bardzo luźno związane (słabo zagęszczone) i odpadało od ślimaka przy wyciąganiu z wytłaczarki.

Rysunki 4–6 przedstawiają wpływ prędkości obrotowej ślimaka na wypełnienie ślimaka w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem, na poziomie odpowiadającym 90 % wydajności uzyskiwanej w wytłaczaniu bez dozowania, kompozytów o różnej zawartości mączki drzewnej. Wyniki badań wskazują, że stopień wypełnienia ślimaka zwiększa się wraz ze wzrostem stosunku masowego natężenia przepływu tworzywa do prędkości obrotowej ślimaka (G/N).

Na podstawie obserwacji próbek tworzywa zdjętych ze ślimaka można określić mechanizm uplastycznienia kompozytu w wytłaczarce (rys. 7). W obszarze niewypełnionego ślimaka tworzywo gromadzi się w aktywnej części kanału i uplastycznianie zachodzi tu w wyniku przewodzenia w całej masie tworzywa, tak jak w wy-



Rys. 4. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na wypełnienie ślimaka w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem tworzywa WF/PP_75/25, na poziomie odpowiadającym 90 % wydajności wytłaczania bez dozowania: a) $N = 20$ obr/min, $G = 7,21$ kg/h, $G/N = 0,361$, b) $N = 50$ obr/min, $G = 13,81$ kg/h, $G/N = 0,276$, c) $N = 80$ obr/min, $G = 19,85$ kg/h, $G/N = 0,248$

Fig. 4. Effect of rotational screw speed on the screw filling in the extrusion of WF/PP_75/25 composite with 90 % starvation (feed rate corresponding to 90 % of flood feed rate): a) $N = 20$ rpm, $G = 7.21$ kg/h, $G/N = 0.361$, b) $N = 50$ rpm, $G = 13.81$ kg/h, $G/N = 0.276$, c) $N = 80$ rpm, $G = 19.85$ kg/h, $G/N = 0.248$



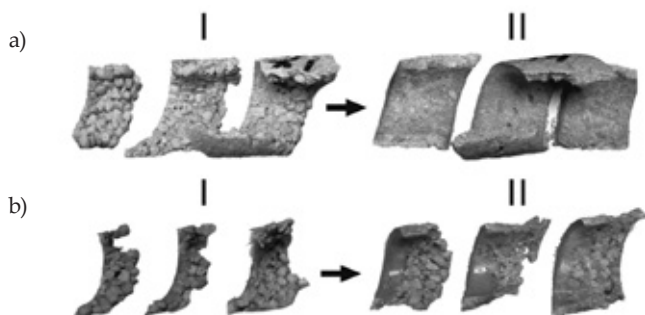
Rys. 5. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na wypełnienie ślimaka w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem kompozytu WF/PP_50/50, na poziomie odpowiadającym 90 % wydajności wytłaczania bez dozowania: a) $N = 20$ obr/min, $G = 6,61$ kg/h, $G/N = 0,331$, b) $N = 50$ obr/min, $G = 13,56$ kg/h, $G/N = 0,271$, c) $N = 80$ obr/min, $G = 19,55$ kg/h, $G/N = 0,244$

Fig. 5. Effect of rotational screw speed on the screw filling in the extrusion of WF/PP_50/50 composite with 90 % starvation: a) $N = 20$ rpm, $G = 6.61$ kg/h, $G/N = 0.331$, b) $N = 50$ rpm, $G = 13.56$ kg/h, $G/N = 0.271$, c) $N = 80$ rpm, $G = 19.55$ kg/h, $G/N = 0.244$



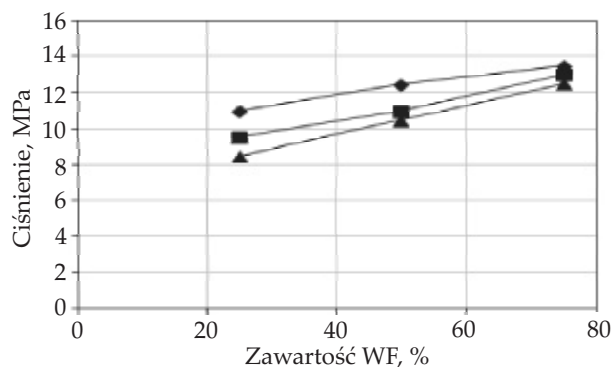
Rys. 6. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na wypełnienie ślimaka w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem kompozytu WF/PP_25/75, na poziomie odpowiadającym 90 % wydajności wytłaczania bez dozowania: a) $N = 20$ obr/min, $G = 6,25$ kg/h, $G/N = 0,313$, b) $N = 50$ obr/min, $G = 12,86$ kg/h, $G/N = 0,257$, c) $N = 80$ obr/min, $G = 19,23$ kg/h, $G/N = 0,240$

Fig. 6. Effect of rotational screw speed on the screw filling in the extrusion of WF/PP_25/75 composite with 90 % starvation: a) $N = 20$ rpm, $G = 6.25$ kg/h, $G/N = 0.313$, b) $N = 50$ rpm, $G = 12.86$ kg/h, $G/N = 0.257$, c) $N = 80$ rpm, $G = 19.23$ kg/h, $G/N = 0.240$



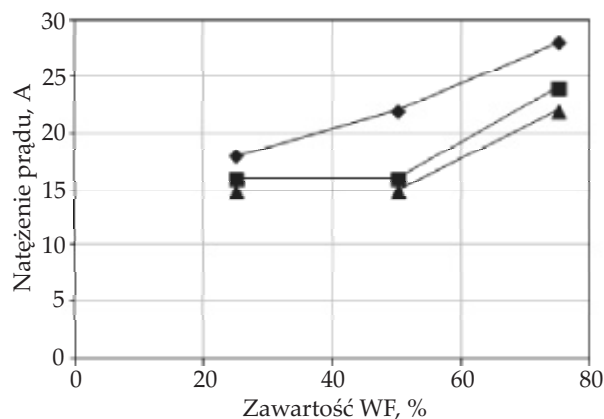
Rys. 7. Mechanizm uplastyczniania tworzywa w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem, na poziomie odpowiadającym 95 % wydajności wytłaczania bez dozowania, kompozytu WPC o różnej zawartości mączki drzewnej: a) WF/PP_75/25, b) WF/PP_50/50, I – strefa nie wypełnionego ślimaka, II – strefa wypełnionego ślimaka

Fig. 7. Melting mechanism of WPC composites with various wood flour content in the extrusion with 95 % starvation: a) WF/PP_75/25, b) WF/PP_50/50, I – partially filled region of the screw, II – fully filled region of the screw



Rys. 8. Wpływ poziomu dozowania i zawartości mączki drzewnej na ciśnienie wytłaczania w procesie wytłaczania kompozytów WF/PP_75/25, WF/PP_50/50, WF/PP_25/75, z prędkością obrotową ślimaka $N = 80$ obr/min; ◆ FF – wytłaczanie z zasilaniem grawitacyjnym (Flood Fed), ■ 95 % – wytłaczanie z dozowanym zasilaniem na poziomie 95 % wydajności uzyskiwanej w procesie wytłaczania bez dozowania, ▲ 90 % – wytłaczanie z dozowanym zasilaniem na poziomie 90 % wydajności uzyskiwanej w procesie wytłaczania bez dozowania

Fig. 8. Effect of starvation and wood flour content on the extrusion pressure in the extrusion of WF/PP_75/25, WF/PP_50/50 and WF/PP_25/75 composites at screw speed $N = 80$ rpm: ◆ FF – flood fed extrusion, ■ 95 % – starve fed extrusion at feed rate corresponding to 95 % of flood feed rate, ▲ 90 % – starve fed extrusion at feed rate corresponding to 90 % of flood feed rate



Rys. 9. Wpływ poziomu dozowania i zawartości mączki drzewnej na pobór prądu w procesie wytłaczania kompozytów WF/PP_75/25, WF/PP_50/50, WF/PP_25/75, z prędkością obrotową ślimaka $N = 80$ obr/min; ◆ FF – wytłaczanie z zasilaniem grawitacyjnym (Flood Fed), ■ 95 % – wytłaczanie z dozowanym zasilaniem na poziomie 95 % wydajności uzyskiwanej w procesie wytłaczania bez dozowania, ▲ 90 % – wytłaczanie z dozowanym zasilaniem na poziomie 90 % wydajności uzyskiwanej w procesie wytłaczania bez dozowania

Fig. 9. Effect of starvation and wood flour content on the amperage in the extrusion of WF/PP_75/25, WF/PP_50/50 and WF/PP_25/75 composites at screw speed $N = 80$ rpm: ◆ FF – flood fed extrusion, ■ 95 % – starve fed extrusion at feed rate corresponding to 95 % of flood feed rate, ▲ 90 % – starve fed extrusion at feed rate corresponding to 90 % of flood feed rate

padku wytłaczania z dozowanym zasilaniem tworzyw klasycznych [20]. W tym obszarze mechanizm uplastyczniania nie zależy od składu kompozytu. Natomiast w obszarze ślimaka wypełnionego mechanizm uplastyczniania jest zależny od składu kompozytu. W odniesieniu do kompozytu z mniejszą zawartością mączki drzewnej obserwuje się klasyczny mechanizm Tadmora (rys. 7), zgodnie z którym tworzywo uplastycznione gromadzi się przy aktywnym zwoju ślimaka. W odniesieniu do kompozytu z większym udziałem mączki drzewnej mechanizm Tadmora się nie ujawnia, możemy więc postulować uplastycznianie jednokierunkowe, podobnie jak w wypadku wytłaczania kompozytów WPC bez dozowania [19].

Stwierdzono, że w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem w istotnym stopniu zmniejsza się ciśnienie w głowicy wytłaczarskiej (rys. 8), a także pobór prądu (rys. 9), co wskazuje na mniejsze zużycie energii w wypadku takiego sposobu zasilania wytłaczarki i potwierdza wcześniejsze obserwacje autorów, odnoszące się do wytłaczania tworzyw klasycznych [20]. Wykazano też, że nawet niewielka zmiana natężenia przepływu (rzędu kilku procent), poniżej wartości granicznej, odpowiadającej stanowi „głodowania”, powoduje wyraźne (rzędu 20–30 %) zmniejszenie ciśnienia i poboru prądu przez wytłaczarkę.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzono badania procesu wytłaczania z dozowanym zasilaniem polipropylenowych kompozytów drzewnych. Dokonano oceny przebiegu uplastyczniania i przepływu kompozytu. Stwierdzono, że przepływ kompozytów polimerowo-drzewnych w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem różni się od przepływu takich kompozytów w procesie klasycznym z zasilaniem grawitacyjnym. Różni się także od przepływu tworzyw termoplastycznych w procesie z dozowanym zasilaniem wytłaczarki. Uplastycznianie w strefie niecałkowitego wypełnienia ślimaka przebiega tak jak uplastycznianie tworzyw termoplastycznych – w wyniku przewodzenia. Uplastycznianie kompozytu WPC w strefie całkowitego wypełnienia ślimaka jest zależne od zawartości mączki drzewnej w osnowie PP. W wypadku kompozytu z dużą zawartością mączki drzewnej nie obserwuje się klasycznego mechanizmu uplastyczniania Tadmora, występuje wówczas mechanizm uplastyczniania jednokierunkowego. Mechanizm Tadmora uwidacznia się w wypadku kompozytu WPC z mniejszą zawartością mączki drzewnej.

Ze względu na odmienny mechanizm uplastyczniania oraz odmienną charakterystykę przepływu, z pośliżgiem na ściankach cylindra, ślimaka i głowicy, a także z granicą płynięcia, modelowanie procesu wytłaczania kompozytów polimerowo-drzewnych wymaga odmiennego podejścia niż modelowanie wytłaczania tworzyw termoplastycznych.

LITERATURA

- [1] Bledzki A.K., Reihmane S., Gassan J.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **1998**, 37, 451.
<http://dx.doi.org/10.1080/03602559808001373>
- [2] Klyosov A.A.: “Wood-Plastic Composites”, Interscience Publishers, John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey 2007.
- [3] Oksman Niska K., Sain M.: “Wood-Polymer Composites”, Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Cambridge 2008.
- [4] Zajchowski S., Ryszkowska J.: *Polimery* **2009**, 54, 674.
- [5] Li T.Q., Wolcott M.P.: *Polymer Engineering and Science* **2005**, 45, 549.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.20308>
- [6] Li T.Q., Wolcott M.P.: *Polymer Engineering and Science* **2006**, 46, 114.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.20432>
- [7] Li T.Q., Wolcott M.P.: *Polymer Engineering and Science* **2006**, 46, 464.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.20505>
- [8] Xiao K., Tzoganakis C.: *ANTEC 2002: Plastics-Annual Technical Conference, Conference Proceedings* **2002**, 38, 252.
- [9] Xiao K., Tzoganakis C.: *ANTEC 2003: Plastics-Annual Technical Conference, Conference Proceedings* **2003**, 39, 197.
- [10] Xiao K., Tzoganakis C.: *ANTEC 2003: Plastics-Annual Technical Conference, Conference Proceedings* **2003**, 39, 975.
- [11] Xiao K., Tzoganakis C.: *ANTEC 2004: Plastics-Annual Technical Conference, Conference Proceedings* **2004**, 40, 448.
- [12] Hristov V., Takács E., Vlachopoulos J.: *Polymer Engineering and Science* **2006**, 46, 1204.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.20592>
- [13] Vlachopoulos J., Hristov V.: “Rheology of Wood-Polymer Composites”, Proceedings of the Regional PPS Meeting, B1, Pretoria, RPA 2006.
- [14] Santi R.C., Hage Jr. E., Vlachopoulos J., Correa C.A.: *International Polymer Processing* **2009**, 24, 346.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2238>
- [15] Zolfaghari A., Behraves A.H., Shakouri E., Soury E.: *Polymer Engineering and Science* **2010**, 50, 543.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.21567>
- [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] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A. i in.: *International Polymer Processing* **2015**, 30, 113.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.3007>
- [19] Wilczyński K., Buziak K., Bartnik M.: *Polimery* **2016**, 61, 195.

- <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.195>
- [20] Wilczyński K., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polymer Engineering and Science* **2012**, 52, 1258.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.23076>
- [21] Wilczyński K., Nastaj A., Wilczyński K.J.: *International Polymer Processing* **2013**, 28, 34.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2640>
- [22] Wilczyński K.J., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.: *Polymer Engineering and Science* **2014**, 54, 2362.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.23797>
- [23] Wilczyński K.J., Lewandowski A., Nastaj A., Wilczyński K.: *Advanced in Polymer Technology* **2017**, 36, 23.
<http://dx.doi.org/10.1002/adv.21570>
- [24] Wilczyński K.J., Lewandowski A., Nastaj A., Wilczyński K.: *International Polymer Processing* **2016**, 31, 82.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.3154>
- [25] Wilczyński K.J., Nastaj A.: *Polimery* **2015**, 60, 199.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.199>
- [26] Wilczyński K.J., Nastaj A.: *Polimery* **2016**, 61, 279.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.279>
- [27] Wilczyński K.J., Nastaj A.: *Polimery* **2016**, 61, 357.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.357>
- [28] Campbell G.: *ANTEC 2011: Plastics-Annual Technical Conference, Conference Proceedings* **2011**, 47, 1367.

Otrzymano 21 IX 2016 r.