

EMIL SASIMOWSKI

Politechnika Lubelska  
Katedra Procesów Polimerowych  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
e-mail: e.sasimowski@pollub.pl

## Badania efektywności działania wyłaczarki nowej generacji

### Cz. I. WPŁYW UMIEJSCOWIENIA TULEI OBROTOWEJ CYLINDRA W UKŁADZIE UPLASTYCZNIAJĄCYM<sup>\*)</sup>

**Streszczenie** — Określano wpływ umiejscowienia tulei obrotowej cylindra w układzie uplastyczniającym wyłaczarki oraz zmian szybkości jej obrotów na przebieg procesu wyłaczania polietylenu małej gęstości (PE-LD). Badania realizowano na specjalnym stanowisku badawczym wyposażonym w wyłaczarkę z cylindrem o budowie segmentowej, umożliwiającą zmianę położenia segmentu z tuleją obrotową. W toku wyłaczania PE-LD przeprowadzono pomiary wybranych, określanych bezpośrednio i pośrednio, czynników charakteryzujących proces. Stwierdzono, że umiejscowienie tulei obrotowej cylindra w układzie uplastyczniającym decyduje o efektywności jej oddziaływania na przebieg wyłaczania. Korzystne zwiększenie, m.in. masowego natężenia przepływu wraz ze wzrostem szybkości obrotów tulei następuje w przypadku umieszczenia tulei w III strefie układu uplastyczniającego, w której współdziała ona ze śrubowym ciągłym kanałem ślimaka, płytkim, o stałej głębokości.

**Słowa kluczowe:** wyłaczanie, tuleja obrotowa cylindra, właściwości wyłoczyny, polietylen małej gęstości.

STUDIES IN THE EFFECTIVENESS OF A NEW GENERATION EXTRUDER. Part I. THE INFLUENCE OF THE LOCATION OF THE ROTATING SLEEVE OF THE BARREL IN THE PLASTICIZING SYSTEM

**Summary** — Studies on the influence of the position and the rotational speed of a rotating sleeve of the barrel in a plasticizing zone of an extruder on the extrusion of low density polyethylene (PE-LD) has been evaluated. The studies were performed with a specially developed extruder with a segmented barrel to enable the adjustment of the position of the rotating sleeve (Fig. 1). Measurements of selected characteristic extrusion parameters were performed during the process. From the obtained results it was found that the position of the rotating sleeve plays a crucial role in the plasticizing system and determines the effectiveness of the extrusion process (Figs. 2–10). Positioning the sleeve in zone III of the plasticizing system where it interacts with a shallow, continuous channel of constant depth of the screw leads to an advantageous increase, among others, of the mass flow and the sleeve rotational speed.

**Keywords:** extrusion, rotating sleeve of the barrel, properties of extrudates, low-density polyethylene.

Na efektywność i przebieg procesu wyłaczania korzystnie wpływa zastosowanie tulei obrotowej cylindra, powodując intensyfikację procesów zachodzących w układzie uplastyczniającym [1–4]. Model wykorzystanej w wymienionych pracach wyłaczarki zbudowano opierając się na oryginalnym, opatentowanym przez R. Siko-

rę i J. W. Sikorę rozwiązaniu konstrukcyjnym układu uplastyczniającego [5], będącym przedmiotem teoretycznych rozważań R. Sikory i E. Sasimowskiego [6, 7].

Prezentowane badania, stanowiące rozwinięcie zagadnień ujętych w wymienionych publikacjach, miały na celu określenie wpływu umiejscowienia tulei obrotowej cylindra w układzie uplastyczniającym oraz zmian szybkości jej obrotów, na charakterystykę procesu wyłaczania. Skonstruowanie i zastosowanie cylindra, o budowie umożliwiającej zmianę położenia segmentu z tuleją obro-

<sup>\*)</sup> Artykuł zawiera treść referatu przedstawionego w ramach XIV Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych”, Rzeszów – Krasieczyn, 15–17 czerwca 2009 r.

ową, jest oparte na własnej koncepcji autora. Badania obejmowały pomiary prowadzone podczas procesu wytłaczania polietylenu małej gęstości, wartości wybranych czynników określonych bezpośrednio i wyznaczenie na ich podstawie wielkości charakteryzujących ten proces, tj. masowego natężenia przepływu tworzywa i jednostkowego zużycia energii całkowitej doprowadzanej do wytłaczarki. Oceniono także wytrzymałość na rozciąganie oraz wskaźnik szybkości płynięcia próbek pobranych z wytworzonej wytłoczyny określając wpływ zmian warunków wytłaczania na ich wartości.

Prezentowana praca obejmująca również: Cz. II – Wpływ ukształtowania powierzchni wewnętrznej tulei obrotowej cylindra, Cz. III – Wpływ współdziałania tulei obrotowej z aktywną strefą rowkowaną cylindra, oraz Cz. IV – Porównanie funkcjonowania modelu wytłaczarki z jej prototypem, pozwala na kompleksową charakterystykę i ocenę działania badanej wytłaczarki.

## CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

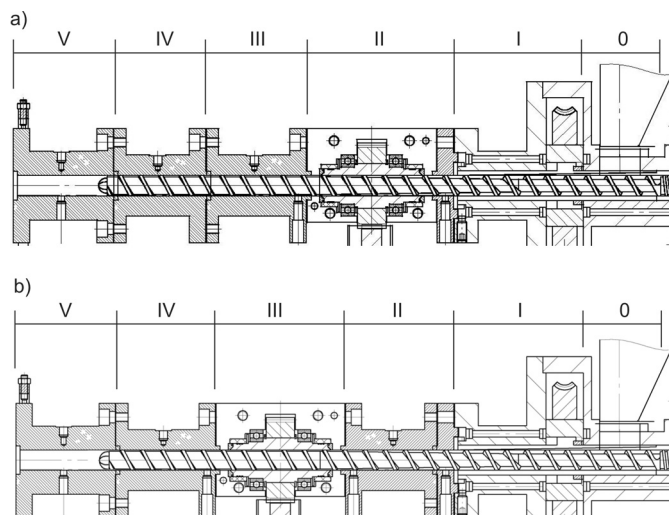
### Materiały

Do badań użyto polietylenu małej gęstości o nazwie handlowej Malen E i symbolu FG NX, 23-D006, wyprodukowanego w postaci granulatu przez firmę Basell Orlen Polyolefins Sp. z o.o. [8].

### Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem specjalnego stanowiska badawczego wykonanego w Instytucie Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwinków w Toruniu, według merytorycznej koncepcji i założeń konstrukcyjnych opracowanych w Katedrze Procesów Polimerowych Politechniki Lubelskiej. Stanowisko obejmowało wytłaczarkę z układem uplastyczniającym nowej konstrukcji [9] wyposażoną w głowicę wytłaczarską do wytłaczania płaskownika, czujniki ciśnienia i temperatury tworzywa przetwarzanego, układ pomiarowy do rejestracji i przetwarzania danych zintegrowany z komputerem, szafę sterowniczą, termostat wodny i inne elementy składowe. W wytłaczarce zastosowano ślimak klasyczny o średnicy  $D = 25$  mm i stosunku  $L/D = 24$ , przeznaczony do przetworstwa polietylenu małej gęstości.

Ślimak ten jest napędzany bezpośrednio przez nowoczesny elektryczny silnik momentowy Siemens 1FW3154, o mocy 15,7 kW, z układem elektronicznym sterowania Siemens SINAMICS S120m umożliwiającym bezstopniową regulację prędkości obrotowej ślimaka. W jednym z segmentów, z jakich zbudowano cylinder wytłaczarki umieszczono tuleję obrotową o długości  $5D$  z otworem wewnętrznym – takim samym, jak w pozostałych częściach składowych cylindra. Na powierzchni wewnętrznej tulei wykonano 6 rowków prostoliniowych o przekroju trójkątnym, każdy o głębokości 1,5 mm oraz kącie wierzchołkowym zawartym pomiędzy płaszczyz-



Rys. 1. Schemat z zaznaczonym podziałem na strefy grzejne 0–V układu uplastyczniającego wyposażonego w tuleję obrotową cylindra umieszczoną w strefie: a) II, b) III

Fig. 1. The scheme indicating the partitioning of the heating zones 0–V of the plasticizing system equipped with a rotational sleeve of the barrel positioned in zones II (a) and III (b)

nami tworzącymi rowek, wynoszącym  $65^\circ$ . Tuleja obrotowa cylindra jest napędzana poprzez przekładnię redukcyjną za pomocą trójfazowego indukcyjnego silnika elektrycznego (5,5 kW) z możliwością bezstopniowej regulacji prędkości.

Segmentowa budowa cylindra umożliwiała umieszczenie segmentu z tuleją obrotową w położeniu odpowiadającym II lub III strefie układu uplastyczniającego. W pierwszym z nich tuleja obrotowa współdziałała ze strefą ślimaka, w której następuje redukcja głębokości kanału śrubowego (rys. 1a), natomiast w drugim położeniu (rys. 1b) współdziałała z kanałem śrubowym ciągłym ślimaka, płytkim o stałej głębokości.

### Program badań

Dobrana na podstawie literatury [10–12], doświadczeń własnych oraz badań rozpoznawczych zadana wartość temperatury w poszczególnych strefach układu uplastyczniającego wytłaczarki wynosiła, odpowiednio,  $T_I = 80$  °C,  $T_{II} = 160$  °C,  $T_{III} = 170$  °C,  $T_{IV} = 180$  °C,  $T_V = 175$  °C, a temperatura głowicy wytłaczarskiej  $T_{VI} = 165$  °C oraz  $T_{VII} = 165$  °C. W strefie zasypu, chłodzonej wodą z termostatu, ustalono temperaturę  $T_0 = 40$  °C. Pomiary przeprowadzono w warunkach zastosowanej szybkości ślimaka  $n_s = 1,67; 3,33; 5,00; 6,67$  oraz  $8,33$  s<sup>-1</sup>, gdy tuleja obrotowa była nieruchoma bądź wówczas, gdy wykonywała ruch obrotowy w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka z szybkością  $n_c = 0,83; 1,66; 2,50$  oraz  $3,33$  s<sup>-1</sup>.

Każdorazowo po zmianie warunków wytłaczania, a przed przystąpieniem do pomiarów, stabilizowano proces, co w stopniu zadowalającym, w większości przy-

padków, następowało po upływie ok. 15 min. Jeżeli po upływie tego czasu obserwowano dalsze zachodzące zmiany rozkładu temperatury układu uplastyczniającego to czas stabilizacji wydłużano do 20, a nawet sporadycznie do 30 min.

Przyjęto, że proces wytłaczania dostatecznie charakteryzują następujące czynniki oznaczane bezpośrednio: masa odcinka pomiarowego wytłoczyny, temperatura ścianki cylindra w określonych miejscach układu uplastyczniającego oraz głowicy wytłaczarskiej, temperatura tworzywa przetwarzanego w kanale przepływowym przed głowicą wytłaczarską, ciśnienie tworzywa znajdującego się przed i za tuleją obrotową oraz przed głowicą wytłaczarską. Pośrednio wyznaczano: masowe natężenie przepływu przetwarzanego tworzywa, moc pobieraną przez wytłaczarkę oraz jednostkowe zużycie energii doprowadzonej do wytłaczarki.

## Metody badań

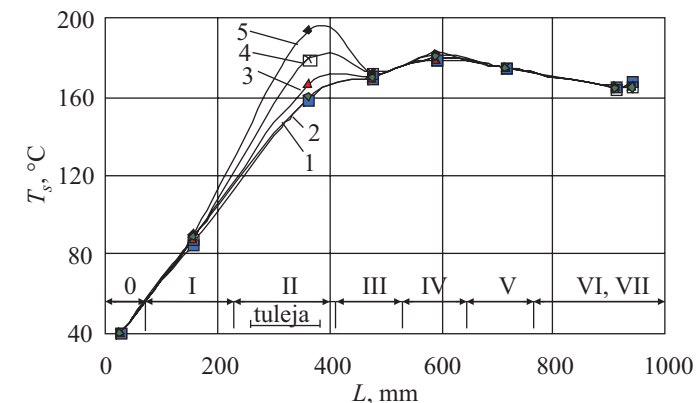
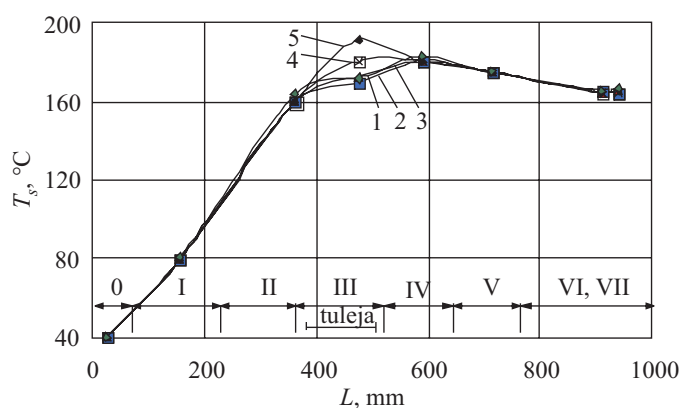
– Masowy wskaźnik szybkości płynięcia MFR (190 °C/2,16 kg) w g/10 min oznaczano zgodnie z PN-EN ISO 1133:2006. Próbkę pobierano losowo z całej partii przetwarzanego tworzywa oraz z wytłoczyny otrzymanej w warunkach najmniejszej oraz największej z badanych szybkości ślimaka i szybkości tulei obrotowej cylindra.

– Wytrzymałość na rozciąganie próbek wycinanych za pomocą wykrojnika z wytłoczyny uzyskanej w wymienionych warunkach określano wg PN-EN ISO 527-1, -3:1998.

## WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

### Temperatura ścianki cylindra

W obydwu strefach układu uplastyczniającego, w których umieszczano tuleję obrotową, wraz ze zwiększaniem szybkości jej obrotów następuje wyraźny wzrost temperatury ścianki cylindra. Przyczyną tego wzrostu jest ciepło tarcia wewnętrznego generowane bezpośrednio w przetwarzanym tworzywie, głównie w wyniku



Rys. 2. Temperatura ( $T_s$ ) ścianki cylindra układu uplastyczniającego i głowicy wytłaczarskiej w funkcji ich długości ( $L$ ); szybkość ślimaka ( $n_s$ ) = 8,33 s<sup>-1</sup>, szybkość tulei obrotowej cylindra ( $n_c$ ) umieszczonej w II strefie: 1 – 0,0 s<sup>-1</sup>, 2 – 0,83 s<sup>-1</sup>, 3 – 1,67 s<sup>-1</sup>, 4 – 2,50 s<sup>-1</sup>, 5 – 3,33 s<sup>-1</sup>, 0–V – strefy grzejne układu uplastyczniającego, VI, VII – strefy grzejne głowicy wytłaczarskiej

Fig. 2. The temperature ( $T_s$ ) of the barrel wall and the extruder head as a function of the length ( $L$ ) in the plasticizing system at a screw rotational speed ( $n_s$ ) of 8.33 s<sup>-1</sup>. The speed ( $n_c$ ) of the rotational sleeve of the barrel positioned in zone II: 1 – 0.00 s<sup>-1</sup>, 2 – 0.83 s<sup>-1</sup>, 3 – 1.67 s<sup>-1</sup>, 4 – 2.50 s<sup>-1</sup>, 5 – 3.33 s<sup>-1</sup>; the plasticizing system heating zones are marked 0–V, while VI and VII stand for the extruder heating zones

oddziaływania tulei obrotowej cylindra. Ogólny charakter rozkładu temperatury ścianki cylindra i głowicy wytłaczarskiej oraz przebiegu jej zmian w następstwie oddziaływania tulei obrotowej jest podobny w przypadku wszystkich badanych szybkości ślimaka.

Przykładowy przebieg zmian temperatury ścianki cylindra oraz głowicy wytłaczarskiej w przypadku umiejscowienia tulei obrotowej w II lub III strefie układu uplastyczniającego i szybkości ślimaka  $n_s = 8,33 \text{ s}^{-1}$ , przedstawiono na rys. 2 i 3. Gdy tuleję obrotową umieszczono w II strefie, temperatura ścianki cylindra wzrastała sukcesywnie wraz ze wzrostem szybkości obrotów tulei, od wartości zadanej 160 °C do 194 °C w warunkach naj-

Rys. 3. Temperatura ( $T_s$ ) ścianki cylindra układu uplastyczniającego i głowicy wytłaczarskiej w funkcji ich długości ( $L$ ); szybkość ślimaka ( $n_s$ ) = 8,33 s<sup>-1</sup>, szybkość tulei obrotowej cylindra ( $n_c$ ) umieszczonej w III strefie: 1 – 0,0 s<sup>-1</sup>, 2 – 0,83 s<sup>-1</sup>, 3 – 1,67 s<sup>-1</sup>, 4 – 2,50 s<sup>-1</sup>, 5 – 3,33 s<sup>-1</sup>, 0–V – strefy grzejne układu uplastyczniającego, VI, VII – strefy grzejne głowicy wytłaczarskiej

Fig. 3. The temperature ( $T_s$ ) of the barrel wall and the extruder head as a function of the length ( $L$ ) in the plasticizing system at a screw rotational speed ( $n_s$ ) of 8.33 s<sup>-1</sup>. The rotational speed ( $n_c$ ) of the sleeve of the barrel positioned in zone III: 1 – 0.00 s<sup>-1</sup>, 2 – 0.83 s<sup>-1</sup>, 3 – 1.67 s<sup>-1</sup>, 4 – 2.50 s<sup>-1</sup>, 5 – 3.33 s<sup>-1</sup>; the plasticizing system heating zones are marked 0–V, while VI and VII stand for the extruder head heating zones

większej z badanych szybkości tulei  $3,33 \text{ s}^{-1}$  oraz ślimaka  $8,33 \text{ s}^{-1}$ . Na skutek przewodzenia ciepła generowanego przez tuleję obrotową, temperatura ścianki w strefie ją poprzedzającej była wówczas wyższa od zadanej od kilku do maksymalnie  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . W pozostałych strefach cylindra oraz w głowicy wytłaczarskiej temperatura ścianki utrzymywała się na zadanym poziomie.

Oddziaływanie tulei obrotowej umieszczonej w strefie III powoduje zwiększenie temperatury ścianki cylindra od wartości zadanej  $170 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $192 \text{ }^\circ\text{C}$  w warunkach największej badanej szybkości tulei  $3,33 \text{ s}^{-1}$  i szybkości ślimaka  $8,33 \text{ s}^{-1}$ . W strefach sąsiadujących bezpośrednio z tuleją zarejestrowane różnice w stosunku do wartości zadanych nie przekraczały  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Jak poprzednio, w pozostałych strefach cylindra oraz w głowicy wytłaczarskiej temperatura ścianki utrzymywała się na zadanym poziomie.

### Temperatura przetwarzanego tworzywa

Zależność temperatury przetwarzanego tworzywa w kanale przepływowym przed głowicą wytłaczarską od szybkości tulei obrotowej cylindra umiejscowionej w II lub III strefie układu uplastyczniającego, w warunkach różnej szybkości ślimaka, przedstawiono na rys. 4.

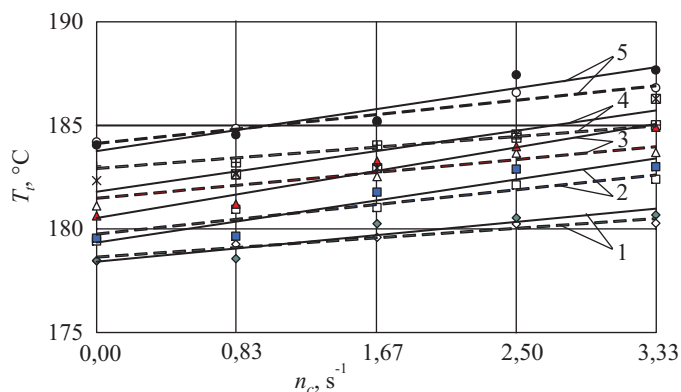
Zwiększanie szybkości tulei obrotowej w badanych warunkach powoduje wzrost temperatury tworzywa w kanale przepływowym. Wzrost ten jest intensywniejszy w przypadku umiejscowienia tulei obrotowej w III strefie i wynosi maksymalnie  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ , gdy zaś tuleja jest usytuowana w II strefie wzrost temperatury wynosi maksymalnie  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Zwiększanie szybkości samego ślimaka w badanym zakresie  $1,67\text{--}8,33 \text{ s}^{-1}$  także podnosi temperaturę przetwarzanego tworzywa. Gdy tuleja obrotowa pozostaje nieruchoma wzrost ten wynosi maksymalnie  $6 \text{ }^\circ\text{C}$ , a w warunkach największej szybkości obrotów tulei zwiększenie szybkości obrotów ślimaka powoduje wzrost temperatury przetwarzanego tworzywa maksymalnie o  $7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Wartość temperatury przetwarzanego tworzywa w kanale przepływowym rośnie pod wpływem ciepła generowanego w wyniku ścinania, na skutek oddziaływania zarówno tulei obrotowej, jak i ślimaka.

### Ciśnienie tworzywa

Na rysunkach 5 oraz 6 przedstawiono rozkład ciśnienia przetwarzanego tworzywa wzdłuż układu uplastyczniającego, w granicznych warunkach przetworstwa, w przypadku dwóch położenia tulei obrotowej.

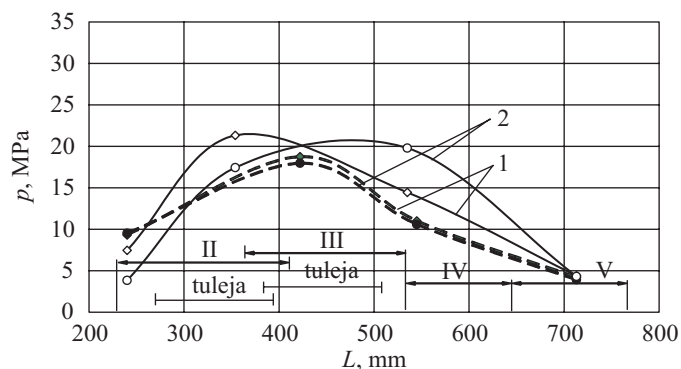
Gdy tuleja obrotowa znajdowała się w II strefie układu i obracał się tylko ślimak, wraz ze zwiększaniem szybkości jego obrotów następował wzrost ciśnienia tworzywa na całej długości układu uplastyczniającego. W wyniku zwiększenia szybkości ślimaka od  $1,67 \text{ s}^{-1}$  do  $8,33 \text{ s}^{-1}$  (por. rys. 5 i 6) wartość ciśnienia mierzona przed tuleją wzrosła o  $70 \%$ , za tuleją o  $43 \%$ , natomiast w kolejnych punktach pomiarowych, bliższych głowicy wytłaczar-



Rys. 4. Temperatura ( $T_p$ ) przetwarzanego tworzywa w kanale przepływowym ślimaka przed głowicą wytłaczarską w funkcji szybkości tulei obrotowej cylindra ( $n_c$ ), w warunkach różnej szybkości obrotów ślimaka ( $n_s$ ): 1 –  $1,67 \text{ s}^{-1}$ , 2 –  $3,33 \text{ s}^{-1}$ , 3 –  $5,00 \text{ s}^{-1}$ , 4 –  $6,67 \text{ s}^{-1}$ , 5 –  $8,33 \text{ s}^{-1}$ ; tuleja obrotowa cylindra umieszczona w II strefie układu uplastyczniającego – linie przerywane, w III strefie – linie ciągłe

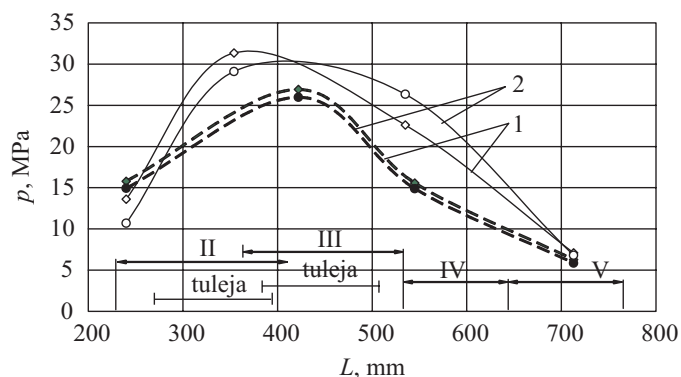
Fig. 4. The temperature ( $T_p$ ) of the processed polymer in the flow channel before reaching the extrusion head as a function of the barrel sleeve rotational speed ( $n_c$ ) under conditions of varying screw rotational speed ( $n_s$ ): 1 –  $1.67 \text{ s}^{-1}$ , 2 –  $3.33 \text{ s}^{-1}$ , 3 –  $5.00 \text{ s}^{-1}$ , 4 –  $6.67 \text{ s}^{-1}$ , 5 –  $8.33 \text{ s}^{-1}$ ; rotational sleeve of barrel positioned in zone II – dashed lines, zone III positioning – solid line

skiej, przyrost ciśnienia wyniósł  $42 \%$  oraz  $50 \%$ . Wprawienie, usytuowanej w II strefie układu, tulei cylindra w ruch obrotowy o kierunku przeciwnym do kierunku



Rys. 5. Ciśnienie ( $p$ ) tworzywa w funkcji długości ( $L$ ) układu uplastyczniającego; szybkość ślimaka ( $n_s$ ) =  $1,67 \text{ s}^{-1}$ , szybkość tulei obrotowej cylindra ( $n_c$ ): 1 –  $0,00 \text{ s}^{-1}$ , 2 –  $3,33 \text{ s}^{-1}$ ; tuleja obrotowa cylindra umieszczona w II strefie – linie przerywane, w III strefie – linie ciągłe, II–V – strefy grzejne układu uplastyczniającego

Fig. 5. Polymer pressure ( $p$ ) as a function of the length ( $L$ ) of the plasticizing system at a screw rotational speed of  $1.67 \text{ s}^{-1}$ ; the rotational speed of the barrel sleeve ( $n_c$ ): 1 –  $0.00 \text{ s}^{-1}$ , 2 –  $3.33 \text{ s}^{-1}$ ; rotational sleeve of barrel positioned in zone II – dashed line, zone III positioning – solid line, II–V – heating zones of the plasticizing system



Rys. 6. Ciśnienie ( $p$ ) tworzywa w funkcji długości ( $L$ ) układu uplastyczniającego; szybkość ślimaka ( $n_s$ ) =  $8,33 \text{ s}^{-1}$ , szybkość tulei obrotowej cylindra ( $n_c$ ): 1 —  $0,00 \text{ s}^{-1}$ , 2 —  $3,33 \text{ s}^{-1}$ ; tuleja obrotowa cylindra w II strefie — linie przerywane, w III strefie — linie ciągłe, II–V — strefy grzejne układu uplastyczniającego

Fig. 6. Polymer pressure ( $p$ ) as a function of the length ( $L$ ) of the plasticizing system at a screw rotational speed ( $n_s$ ) of  $8.33 \text{ s}^{-1}$ ; the rotational speed of the barrel sleeve ( $n_c$ ): 1 —  $0.00 \text{ s}^{-1}$ , 2 —  $3.33 \text{ s}^{-1}$ ; rotational sleeve of barrel positioned in zone II — dashed line, zone III positioning — solid line, II–V — heating zones of the plasticizing system

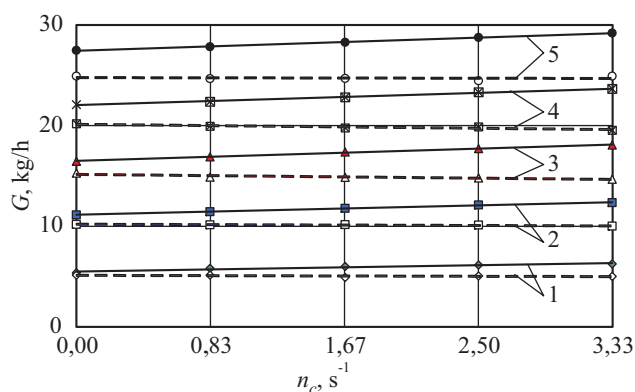
obrotów ślimaka spowodowało tylko nieznaczne (maks. 1,2 MPa) obniżenie ciśnienia tworzywa przetwarzanego na całej długości układu uplastyczniającego.

Odmienny przebieg zmian ciśnienia tworzywa wzdłuż układu zaobserwowano wówczas, gdy tuleję obrotową cylindra umieszczono w jego III strefie (linie ciągłe na rys. 5 i 6). Nawet gdy tuleja była nieruchoma, w następstwie oddziaływania rowków wykonanych na jej powierzchni wewnętrznej, przebieg linii zmian ciśnienia jest inny od występującego w przypadku umiejscowienia tulei w II strefie układu. Mianowicie, początkowo ciśnienie jest mniejsze niż występujące w poprzednio omawianym przypadku, wyraźny wzrost wartości następuje przed i za tuleją obrotową, przed głowicą wylączarską natomiast ciśnienie tworzywa przybiera ponownie wartości zbliżone do odnotowanych w warunkach, gdy tuleja była umieszczona w II strefie. Podobnie jak poprzednio, zwiększanie szybkości obrotów ślimaka z  $1,67 \text{ s}^{-1}$  do  $8,33 \text{ s}^{-1}$  skutkuje wzrostem ciśnienia tworzywa na całej długości układu uplastyczniającego. Tym razem maksymalne zwiększenie ciśnienia w kolejnych punktach pomiarowych w kierunku głowicy wytaczarskiej wyniosło, odpowiednio, 82 %, 47 %, 57 % oraz 62 %. Obroty tulei cylindra umieszczonej w III strefie układu, obracającej się w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka, w sposób wyraźny wpływają na przebieg linii zmian ciśnienia przetwarzanego tworzywa. Wraz ze zwiększaniem szybkości obrotów tulei ciśnienie tworzywa przed nią znacznie spada, za tuleją natomiast następuje sukcesywny jego wzrost. Maksymalne zmiany ciśnienia tworzywa zaobserwowano, gdy szybkość tulei obrotowej była największa ( $3,33 \text{ s}^{-1}$ ). Ciśnienie tworzywa mierzone bezpośrednio przed nią obniżyło się wówczas o 18 %,

gdy szybkość ślimaka wynosiła  $1,67 \text{ s}^{-1}$  oraz o 7 %, kiedy ślimak obracał się z szybkością  $8,33 \text{ s}^{-1}$ . Natomiast za tuleją obrotową wartość ciśnienia w tych warunkach zwiększyła się, odpowiednio, o 37 % i 17 %. Obracająca się tuleja obrotowa nie miała natomiast wyraźnego wpływu na ciśnienie przetwarzanego tworzywa mierzone przed głowicą wylączarską.

### Natężenie przepływu tworzywa

Tuleja obrotowa cylindra umieszczona w II strefie badanego układu uplastyczniającego nie ma wpływu na masowe natężenie przepływu ( $\dot{G}$ ) wylączanego tworzywa (rys. 7). Zaobserwowano natomiast proporcjonalne powiększanie się wartości  $\dot{G}$  wraz ze wzrostem szybkości obrotów ślimaka. Wyniki wskazują, że pięciokrotne zwiększenie szybkości ślimaka (od  $1,67 \text{ s}^{-1}$  do  $8,33 \text{ s}^{-1}$ ), powoduje również pięciokrotny wzrost masowego natężenia przepływu, od  $5,1 \text{ kg/h}$  do  $24,9 \text{ kg/h}$ .



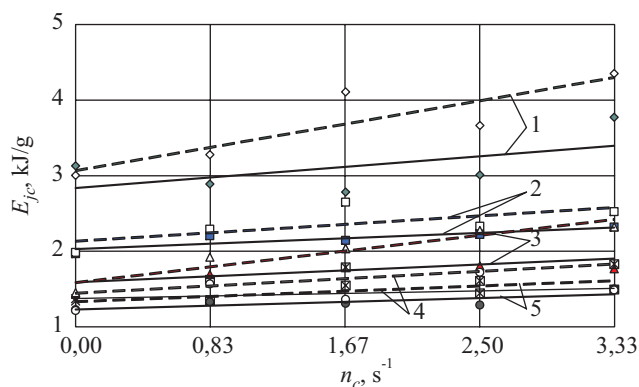
Rys. 7. Masowe natężenie przepływu ( $\dot{G}$ ) tworzywa w funkcji szybkości tulei obrotowej cylindra ( $n_c$ ), szybkość obrotów ślimaka ( $n_s$ ): 1 —  $1,67 \text{ s}^{-1}$ , 2 —  $3,33 \text{ s}^{-1}$ , 3 —  $5,00 \text{ s}^{-1}$ , 4 —  $6,67 \text{ s}^{-1}$ , 5 —  $8,33 \text{ s}^{-1}$ ; tuleja obrotowa cylindra w II strefie układu uplastyczniającego — linie przerywane, w III strefie — linie ciągłe

Po umieszczeniu tulei obrotowej cylindra w III strefie układu uplastyczniającego, nawet wówczas gdy była ona nieruchoma, następuje zwiększenie masowego natężenia przepływu. Wzrost ten w stosunku do wartości uzyskanych w poprzednim przypadku wynosi 4,8 %, 9,3 %, 7,9 %, 9,6 % oraz 10,3 %, w odniesieniu do kolejnych wartości szybkości ślimaka. Obserwowane zjawisko jest głównie następstwem oddziaływania rowków wykonanych na wewnętrznej powierzchni tulei obrotowej. Wzrost szybkości obrotów tulei cylindra powoduje zwiększanie natężenia przepływu tworzywa. W warunkach największej badanej szybkości tulei obrotowej

cyindra wynoszącej  $3,33 \text{ s}^{-1}$  następuje wzrost  $\dot{G}$  o 16,2 %; 10,9 %; 9,9 %; 7,0 % oraz 6,3 %, odpowiednio, w przypadku kolejnych szybkości ślimaka. Im większa jest szybkość obrotów ślimaka, tym mniejszy jest proporcjonalny przyrost natężenia przepływu, wynikający z oddziaływania obracającej się z taką samą szybkością tulei obrotowej cylindra.

### Jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do wylączarki

Jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do wylączarki zwiększa się proporcjonalnie w miarę wzrostu szybkości, umieszczonej w II strefie układu uplastyczniającego, tulei obrotowej cylindra w następstwie wzrostu mocy doprowadzanej do układu napędowego tulei obrotowej, przy niezmiennym masowym natężeniu przepływu tworzywa (rys. 8).



Rys. 8. Jednostkowe zużycie energii całkowitej doprowadzanej do wylączarki ( $E_{jc}$ ), w funkcji szybkości tulei obrotowej cylindra ( $n_c$ ) umieszczonej w II (linie przerywane) oraz III (linie ciągłe) strefie układu uplastyczniającego; szybkość obrotów ślimaka ( $n_s$ ): 1 –  $1,67 \text{ s}^{-1}$ , 2 –  $3,33 \text{ s}^{-1}$ , 3 –  $5,00 \text{ s}^{-1}$ , 4 –  $6,67 \text{ s}^{-1}$ , 5 –  $8,33 \text{ s}^{-1}$

Fig. 8. Specific total energy consumption ( $E_{jc}$ ) of the extruder as a function of the barrel screw rotational speed positioned in zone II (dashed line) and zone III (solid line) of the plasticizing system at a screw rotational speed of: 1 –  $1.67 \text{ s}^{-1}$ , 2 –  $3.33 \text{ s}^{-1}$ , 3 –  $5.00 \text{ s}^{-1}$ , 4 –  $6.67 \text{ s}^{-1}$ , 5 –  $8.33 \text{ s}^{-1}$

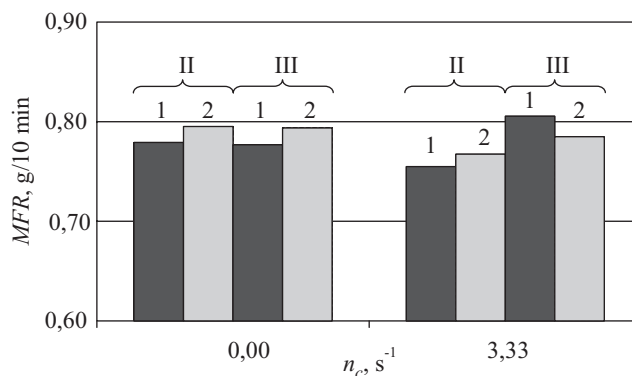
Zastosowane większe szybkości ślimaka powodują natomiast spadek jednostkowego zużycia energii wynikający z przewagi wzrostu natężenia przepływu tworzywa nad wzrostem strumienia doprowadzanej energii. Pięciokrotne zwiększenie szybkości ślimaka przy nieruchomej tulei obrotowej cylindra spowodowało spadek jednostkowego zużycia energii całkowitej o 60 %. Zjawisko to występuje także w procesie konwencjonalnym [13].

W przypadku, gdy tuleja obrotowa cylindra jest umieszczona w III strefie układu uplastyczniającego jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do wylączarki wraz ze zwiększaniem szybkości obrotów tulei nie zmie-

nia się, lub obserwowany wzrost jest wyraźnie mniejszy niż odnotowany wówczas, gdy tuleja jest umieszczona w II strefie. Jest to efekt zwiększenia masowego natężenia przepływu tworzywa, jak również energetycznie sprawniejszego niż nagrzewanie za pomocą grzejników, procesu generowania ciepła tarcia w tworzywie przetwarzanym [14–17] w wyniku oddziaływania tulei obrotowej cylindra.

### Masowy wskaźnik szybkości płynięcia

Wartości masowego wskaźnika szybkości płynięcia próbek pobranych z wytłoczyny otrzymanej w skrajnych warunkach szybkości obrotów ślimaka oraz tulei cylindra umieszczonej zarówno w II, jak i w III strefie układu, przedstawiono na rys. 9. Średnia arytmetyczna obliczona z uzyskanych, mało różniących się wartościami MFR wyniosła  $0,782 \pm 0,006 \text{ g/10 min}$ , a odchylenie stan-



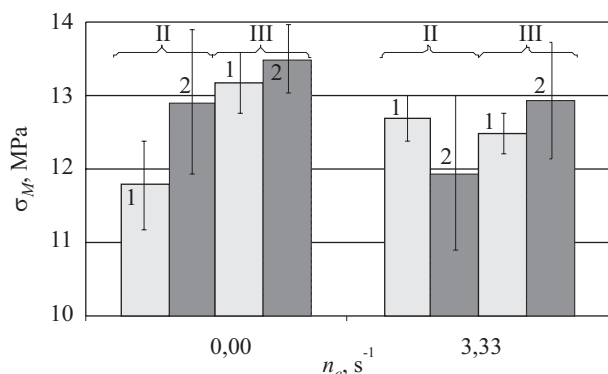
Rys. 9. Masowy wskaźnik szybkości płynięcia (MFR) wytłoczyny wytworzonej w skrajnych warunkach szybkości obrotów tulei cylindra ( $n_c$ ) umieszczonej w II bądź III strefie układu uplastyczniającego przy szybkości obrotów ślimaka ( $n_s$ ): 1 –  $1,67 \text{ s}^{-1}$ , 2 –  $8,33 \text{ s}^{-1}$

Fig. 9. The mass flow rate (MFR) of the extrudate processed at the lowest and highest values of the rotational speed ( $n_c$ ) of the barrel sleeve positioned in zones II and III of the plasticizing system, and the screw rotational speed ( $n_s$ ) of: 1 –  $1.67 \text{ s}^{-1}$ , 2 –  $8.33 \text{ s}^{-1}$

dardowe  $0,016 \text{ g/10 min}$ . Średnia z pomiarów masowego wskaźnika szybkości płynięcia 10 próbek granulatu pobranych losowo z całej partii tworzywa przed procesem wytłaczania wyniosła  $0,787 \pm 0,002 \text{ g/10 min}$ , odchylenie standardowe zaś tylko  $0,005 \text{ g/10 min}$ . Można zatem przyjąć, że w przetwarzanym tworzywie w procesie wytłaczania nie nastąpiły niekorzystne zmiany.

### Wytrzymałość na rozciąganie

Na rys. 10 przedstawiono średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie (z zaznaczonymi wartościami standardowymi odchył), próbek pobranych z wytło-



Rys. 10. Wytrzymałość na rozciąganie ( $\sigma_M$ ) wytłoczyny wytworzonej w skrajnych warunkach szybkości obrotów tulei cylindra ( $n_c$ ) umieszczonej w II bądź III strefie układu uplastyczniającego przy szybkości obrotów ślimaka ( $n_s$ ): 1 – 1,67 s<sup>-1</sup>, 2 – 8,33 s<sup>-1</sup>

Fig. 10. The values of tensile strength ( $\sigma_M$ ) of the extrudate processed at the lowest and highest values of the rotational speed ( $n_c$ ) of the barrel sleeve positioned in zones II and III of the plasticizing system, and the screw rotational speed ( $n_s$ ) of: 1 – 1.67 s<sup>-1</sup>, 2 – 8.33 s<sup>-1</sup>

czyzny otrzymanej w skrajnych warunkach szybkości obrotów ślimaka oraz tulei cylindra, umiejscowionej zarówno w II, jak i w III strefie układu uplastyczniającego.

Przeprowadzona analiza wariancji ANOVA [18] wykazała istotny ( $p < 0,05$ ) wpływ umiejscowienia tulei obrotowej ( $p = 0,004071$ ) oraz szybkości tulei obrotowej ( $p = 0,037068$ ) na wytrzymałość badanych próbek. Wykonany następnie test *post-hoc* Tukeya wykazał znaczące różnice pomiędzy średnią wytrzymałością na rozciąganie próbek wytłoczyny wytworzonej w warunkach największej szybkości ślimaka  $n_s = 8,33$  s<sup>-1</sup> oraz nieruchomej, umieszczonej w III strefie układu tulei obrotowej a wytrzymałością próbek otrzymanych z najmniejszą szybkością obrotów ślimaka  $n_s = 1,67$  s<sup>-1</sup> i nieruchomą tuleją znajdującą się w strefie II ( $p = 0,019891$ ), oraz wytrzymałością próbek uzyskanych z największą szybkością obrotów zarówno ślimaka  $n_s = 8,33$  s<sup>-1</sup>, jak i tulei cylindra  $n_c = 3,33$  s<sup>-1</sup> umiejscowionej w II strefie układu uplastyczniającego ( $p = 0,048389$ ).

Stwierdzono, że umieszczenie tulei obrotowej w III strefie układu uplastyczniającego i obracanie jej z największą z badanych szybkością (korzystne pod względem natężenia przepływu oraz jednostkowego zużycia energii), nie powoduje pogorszenia wytrzymałości na rozciąganie ( $\sigma_M$ ) otrzymanej wytłoczyny, a w stosunku do wartości  $\sigma_M$  próbek wytworzonych w przypadku, gdy tuleja znajduje się w II strefie, nawet istotnie ją zwiększa.

#### PODSUMOWANIE

Stwierdzono, że umieszczenie tulei obrotowej cylindra w układzie uplastyczniającym ma decydujący wpływ na przebieg i efektywność procesu wytłaczania polietylenu małej gęstości. Tylko w przypadku umiesz-

czenia tulei cylindra w III strefie układu uplastyczniającego obserwuje się korzystne oddziaływanie wraz ze wzrostem szybkości jej obrotów. W strefie tej tuleja obrotowa współdziała z płytkim, śrubowym kanałem ciągłym ślimaka, o stałej głębokości.

Zastosowanie tulei obrotowej cylindra wytłaczarki w sposób znaczący zmienia wybrane wielkości charakteryzujące proces wytłaczania, mianowicie:

- generując powstawanie ciepła w przetwarzanym tworzywie powoduje wzrost jego temperatury oraz wzrost temperatury ścianki cylindra układu uplastyczniającego w strefie, w której umieszczono tuleję obrotową;

- obniża ciśnienia przetwarzanego tworzywa przed tuleją oraz znacznie zwiększa ciśnienie za nią, dzięki temu intensyfikuje przepływ tworzywa;

- wraz ze wzrostem szybkości obrotów tulei następuje wyraźny wzrost masowego natężenia przepływu wytłaczanego tworzywa.

Autor dziękuje Panu Prof. dr hab. inż. Robertowi Sikorze za inspirację i opiekę naukową nad badaniami, w ramach których przygotowany został niniejszy artykuł, a Instytutowi Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników w Toruniu za wykonanie stanowiska badawczego oraz pomoc przy badaniach.

#### LITERATURA

- Sasimowski E.: „Analiza procesu wytłaczania z obrotowym segmentem cylindra wytłaczarki”, dysertacja doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2004.
- Sikora J. W., Sasimowski E.: *Kunstst. Int.* 2006, 7, 104.
- Sikora J. W., Sasimowski E.: *Kunstst. Int.* 2006, 9, 89.
- Sasimowski E.: *Polimery* 2008, 53, 47.
- Pat. pol.* 185 728 (1998).
- Sikora R., Sasimowski E.: *Polimery* 2000, 45, 141.
- Sikora R., Sasimowski E.: *Int. Polym. Process.* 2000, 15, 221.
- [http://www.basellorlen.pl/pliki\\_tds/pliki\\_tds\\_eng/LDPE\\_MALEN\\_E/Malen E FGNX 23-D006.doc](http://www.basellorlen.pl/pliki_tds/pliki_tds_eng/LDPE_MALEN_E/Malen E FGNX 23-D006.doc)
- Zgłosz. pat.* P-383 596 (2008).
- Hansen F., Knappe W., Potente H.: „Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik. II Extrusionsanlagen”, Carl Hanser Verlag, München – Wien 1986.
- Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
- White J. L., Potente H.: „Screw extrusion”, Carl Hanser Verlag, Munich 2003.
- Stasiak J.: *Polimery* 2005, 50, 881.
- Sikora J. W.: *Polimery* 1997, 42, 565.
- Rauwendaal Ch., Sikora J. W.: *Int. Polym. Process.* 2000, 15, 133.
- Sikora J. W.: *Polimery* 2006, 51, 285.
- Rauwendaal Ch.: „Polymer Extrusion”, Hanser Verlag, Munich 2001.
- Dobosz M.: „Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań”, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.