

WYZNACZANIE LICZBY REYNOLDSA W POMIARACH REOMETRYCZNYCH

Arkadiusz Kloziński, Tomasz Sterzyński

Zakład Polimerów, Politechnika Poznańska
pl. M. Skłodowskiej-Curie 2, 60-965 Poznań, arkadiusz.klozinski@put.poznan.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono badania i ocenę wartości liczby Reynoldsa wyznaczonej w rzeczywistych warunkach przetwórczych, przy użyciu reometru wytłaczarkowego. Urządzenie pomiarowe stanowiła głowica wytłaczarska z wymiennymi dyszami. Badania przeprowadzono przy użyciu PE-LD, mieszaniny PE-LD/PE-MD oraz PE-MD.

Słowa kluczowe: pomiary reometryczne, liczba Reynoldsa, lepkość, polietylen

WSTĘP

Analiza przepływu uplastycznionego tworzywa polimerowego w kanałach narzędzi przetwórczych wymaga określenia jego charakteru. W większości przypadków przepływ ma charakter laminarny. Jednakże w przypadku płynów o niskiej lepkości, przepływających z dużym natężeniem przez kanały o dużych średnicach, przepływ „teleskopowy” koncentrycznych warstewek cylindrycznych może zostać zakłócony przez pojawienie się wirów i część energii mechanicznej zostanie wówczas rozproszona przez chaotyczne ruchy elementów płynu. Określona w takich przypadkach krzywa płynięcia odchyli się w kierunku osi naprężenia stycznego i nie będzie reprezentowała rzeczywistych właściwości reologicznych płynu [Kembłowski 1973, Sikora 1992, Ferguson i in. 1995].

Aby określić charakter ruchu płynu newtonowskiego ($n = 1$, $k = \eta$), posługujemy się liczbą Reynoldsa, określającą stosunek bezwymiarowy sił bezwładności do siły tarcia wewnętrznego płynu, zdefiniowaną równaniem [Kembłowski 1973, Ziolkowski 1982, Kembłowski i in. 1985, Menges 1990, Agassant i in. 1991, Sikora 1992, Ferguson i in. 1995, Sikora i in. 2003]:

$$Re = \frac{V_s D \rho}{\eta} \quad (1)$$

gdzie:

V_s – średnia liniowa prędkość przepływu płynu, m/s,

D – średnica kanału, m,
 ρ – gęstość płynu, kg/m^3 ,
 η – lepkość płynu, $\text{Pa}\cdot\text{s}$.

Przepływ jest laminarny, jeżeli obliczona liczba Reynoldsa ma wartość niższą od wartości krytycznej $Re_{kr} \leq 2100$, w przedziale $2100 < Re < 10^4$ występuje przepływ przejściowy, natomiast gdy $Re \geq 10^4$, przepływ staje się turbulentny [Kembłowski 1973, Ziołkowski 1982, Kembłowski i in. 1985, Ferguson i in. 1995, Sikora (red.) 2006].

W badaniach przepływów stopionych polimerów, traktowanych jako uogólnione płyny newtonowskie opisywane modelem potęgowym Ostwalda-de Waele, do określania charakteru przepływu wykorzystuje się liczbę Reynoldsa o następującej uogólnionej postaci [Kembłowski 1973, Ziołkowski 1982, Kembłowski i in. 1985, Sikora 1992, Ferguson i in. 1995, Sikora i in. 2003]:

$$Re_u = \frac{V_s^{2-n} D^n \rho}{k 8^{n-1}} \quad (2)$$

Uogólniona liczba Reynoldsa jest bardzo wygodnym kryterium charakteru ruchu, gdyż wartości liczbowe parametrów reologicznych n i k mogą być określone bezpośrednio na podstawie pomiarów reometrycznych. Dla płynów rozrzedzanych ścinaniem ($n < 1$) ze zmniejszaniem się wartości n wartość Re_{kr} nieznacznie wzrasta [Kembłowski 1973].

Wartość Re charakteryzująca przepływ tworzyw polimerowych jest zazwyczaj bardzo mała i w warunkach przetwórstwa mieści się w zakresie od 10^{-4} do 10^{-1} [Wilczyński i in. 1999, Sikora i in. 2003].

CEL BADAŃ

Celem pracy była ocena wartości liczby Reynoldsa, a tym samym określenie charakteru przepływu PE-LD, PE-MD oraz ich mieszaniny w rzeczywistych warunkach procesu wytłaczania.

METODYKA

Badania przeprowadzono przy użyciu reometru wytłaczakowego (extrusimetru) z głowicą z wymiennymi dyszami o przekroju kołowym (tab. 1). Opis stanowiska badawczego zaprezentowano we wcześniejszych publikacjach [Kloziński i in. 2005, 2007]. W badaniach zastosowano polietylen małej gęstości o nazwie handlowej Malen E, oznaczony symbolem FABS 23-D 022 (Basell Orlen Polyolefins Sp. z o.o.), o $MFI_{(190;2,16)} = 1,81$ g/10 min, polietylen średniej gęstości PE-MD o nazwie handlowej Finathene®, oznaczony symbolem HF513 (Atofina S.A.), o $MFI_{(190;2,16)} = 0,11$ g/10 min oraz mieszaninę PE-LD/PE-MD, o stosunku masowym składników 1/1, $MFI_{(190;2,16)} = 1,11$ g/10 min. Temperatura pomiarowa wszystkich materiałów wynosiła $170 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Pomiary przeprowadzono w zakresie szybkości obrotowej ślimaka v w przedziale od $0,17$ do $0,76$ s^{-1} .

Tabela 1. Wymiary kanału dysz pomiarowych

Table 1. Dimensions of the measuring dies

Długość dyszy L , mm	Średnica dyszy D , mm					
20	2	3	4	5	8	10
30						

WYNIKI BADAŃ

Liczbę Reynoldsa określano na podstawie oceny maksymalnej prędkości przepływu (V_{max}), którą wyznaczano w oparciu o całkowity spadek ciśnienia (Δp_c). Zakresy maksymalnej prędkości przepływu (V_{max}) oraz wyznaczone na jej podstawie wartości liczby Reynoldsa (Re_{max}), uzyskane podczas przepływu analizowanych polimerów zestawiono w tabeli 2.

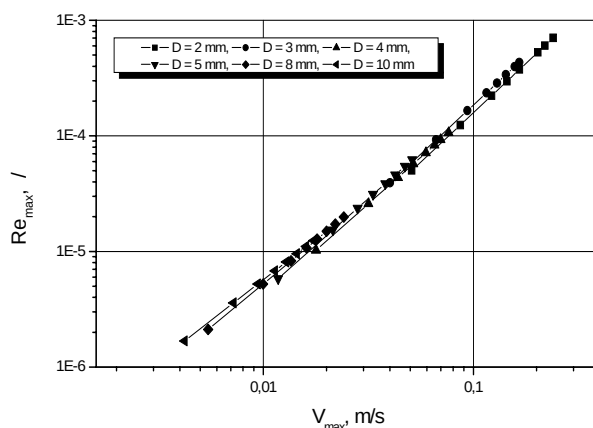
Tabela 2. Wartości maksymalnej prędkości przepływu (V_{max}) oraz liczby Reynoldsa (Re_{max})Table 2. Values of maximum flow velocity (V_{max}) and Reynolds number (Re_{max})

Materiał	Dysze $L = 20$ mm		Dysze $L = 30$ mm	
	V_{max} , m/s	Liczba Reynoldsa Re_{max}	V_{max} , m/s	Liczba Reynoldsa Re_{max}
PE-LD FABS	0,007±0,441	$2,5 \cdot 10^{-5} \div 5,1 \cdot 10^{-3}$	0,006±0,346	$1,5 \cdot 10^{-5} \div 3,61 \cdot 10^{-3}$
PE-LD/PE-MD	0,005±0,241	$4,6 \cdot 10^{-6} \div 8,4 \cdot 10^{-4}$	0,004±0,261	$3,3 \cdot 10^{-6} \div 1,4 \cdot 10^{-4}$
PE-MD HF513	0,004±0,210	$1,8 \cdot 10^{-6} \div 7,0 \cdot 10^{-4}$	0,004±0,259	$1,7 \cdot 10^{-6} \div 8,8 \cdot 10^{-4}$

Jak wynika z zestawionych wartości liczby Reynoldsa, pomimo dość dużych prędkości, przepływ wszystkich analizowanych materiałów polimerowych ma charakter laminarny. Obliczone wartości Re_{max} w znacznym stopniu odbiegają od wartości krytycznej, określającej początek zakłóceń przepływu. We wszystkich analizowanych przypadkach Re_{max} mieściła się w zakresach, które podaje literatura jako charakterystyczne dla przetwórstwa tworzyw polimerowych metodą wytłaczania [Wilczyński i in. 1999, Sikora i in. 2003].

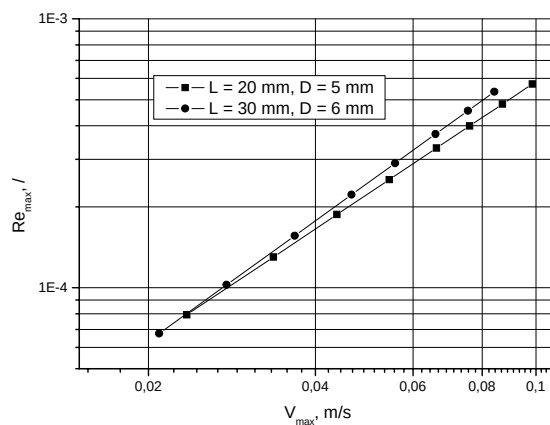
W przeprowadzonej analizie porównawczej uzyskanych liczb Reynoldsa stwierdzono bezpośredni wpływ wymiarów kanału dyszy (D , L) na wartość Re_{max} . Na rysunku 1 przedstawiono wykresy zależności $Re_{max} = f(V_{max})$ uzyskane podczas przepływu PE-MD przez dysze o długości $L = 20$ mm i zmiennych średnicach. Jak wynika z przebiegu krzywych (rys. 1), na skutek zmian średnicy dyszy uzyskuje się różne zakresy prędkości przepływu oraz różne zakresy liczby Reynoldsa. Wyższe wartości Re_{max} występują podczas przepływu przez dysze o mniejszej średnicy. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że zakresy prędkości polimeru uzyskane dla analizowanych dysz pokrywają się ze sobą w pewnych obszarach wartości, dotyczy to dysz o zbliżonej wartości średnicy, np. 2 z 3 mm, 3 z 4 itd. Jednakże takiej samej wartości V_{max} , uzyskanej dla dwóch różnych dysz odpowiadają zróżnicowane wartości liczby Reynoldsa. Na zmianę charak-

teru przepływu w przypadku uplastycznionych tworzyw polimerowych wpływa również długość kanału przepływowego. Zmianę tę można zauważyć już przy różnicy długości równej 10 mm, czego potwierdzenie stanowi rysunek 2, przedstawiający wykres zależności $Re_{max} = f(V_{max})$, wyznaczony podczas przepływu PE-LD przez dysze o długości $L = 20$ i 30 mm o średnicy $D = 5$ mm. Podobne położenie krzywych uzyskano dokonując zestawienia dla innych średnic dysz przy wszystkich trzech rodzajach materiału badawczego. Większe wartości liczby Reynoldsa we wszystkich przypadkach uzyskano podczas przepływu przez dysze o długości $L = 30$ mm.



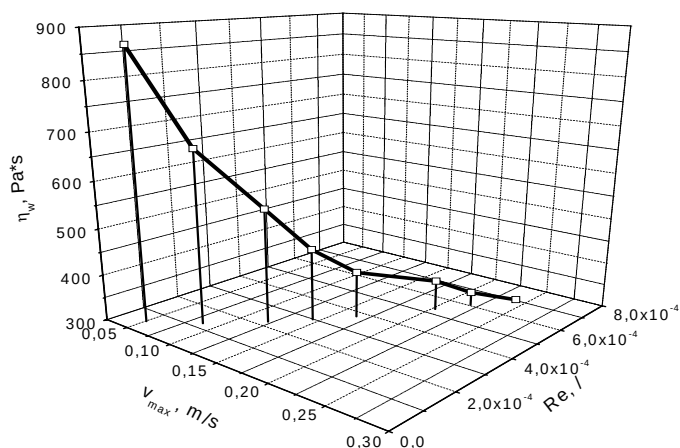
Rys. 1. Wykres zależności liczby Reynoldsa (Re_{max}) w funkcji prędkości przepływu (V_{max}), przy PE-MD w warunkach przepływu przez dysze długości $L = 30$ mm, średnica ($D = 2, 3, 4, 5, 8, 10$ mm)

Fig. 1. Reynolds number (Re_{max}) versus flow velocity (V_{max}) of PE-MD for flow through the dies of length $L = 30$ mm and diameter $D = 2, 3, 4, 5, 8, 10$ mm



Rys. 2. Wykres zależności liczby Reynoldsa (Re_{max}) w funkcji prędkości przepływu (V_{max}), uzyskany dla PE-LD w warunkach przepływu przez dysze o długości $L = 20$ i 30 mm i średnicy $D = 5$ mm

Fig. 2. Reynolds number (Re_{max}) versus flow velocity (V_{max}) of PE-LD for flow through the dies of length $L = 20, 30$ mm and diameter $D = 5$ mm



Rys. 3. Wykres zależności liczby Reynoldsa (Re_{max}) w funkcji prędkości przepływu (V_{max}) oraz w funkcji lepkości skorygowanej, uzyskany dla PE-MD podczas przepływu przez dyszę długości $L = 20$ mm średnicy $D = 2$ mm

Fig. 3. Reynolds number (Re_{max}) versus flow velocity (V_{max}) and versus corrected viscosity of PE-MD for flow through the die of length $L = 20$ mm and diameter $D = 2$ mm

Można wnioskować, że różnica wartości liczby Reynoldsa dla takiej samej wartości prędkości przepływu przez dysze o takiej samej średnicy, lecz różnej długości jest konsekwencją zróżnicowania lepkości przepływającego polimeru. Jak wykazano we wcześniejszej publikacji [Kłodziński i in. 2007], dla dysz o długości $L = 30$ mm uzyskiwano większe wartości objętościowego natężenia przepływu oraz mniejsze wartości lepkości polimeru. Zróżnicowanie wykazywał również wykładnik płynięcia (n) oraz gęstość polimeru, czyli elementy składowe równania określającego wartość maksymalnej liczby Reynoldsa – równanie (2). Wzrost wartości Re_{max} jest odwrotnie proporcjonalny do wzrostu lepkości polimeru, co można zauważyć w przebiegu krzywej przedstawionej na rysunku 3, wyznaczonej dla PE-MD podczas przepływu przez dyszę o długości $L = 20$ mm i średnicy $D = 2$ mm. Jak wynika z przebiegu krzywej, wartość liczby Reynoldsa rośnie wraz ze wzrostem prędkości przepływu, któremu towarzyszy spadek lepkości polimeru.

WNIOSKI

W trakcie pomiarów prowadzonych przy maksymalnych prędkościach przepływu potwierdzono wpływ właściwości reologicznych zastosowanych dwóch typów polietyleny i ich mieszaniny (tab. 1) na wartość liczb Reynoldsa. Najwyższe wartości tej liczby uzyskano dla PE-LD, niższe dla mieszaniny, natomiast najniższe wartości Re_{max} cechują przepływ PE-MD.

W myśl danych z literatury [Ziołkowski 1982, Kembłowski i in. 1985], dwa przepływy charakteryzujące się tą samą liczbą Reynoldsa uważa się je za podobne, niezależnie od bezwzględnych wartości poszczególnych składowych parametrów. Z tego też powodu liczba Reynoldsa stanowi wielkość porównawczą szeroko stosowaną w analizie przepływów w narzędziach przetwórczych [Sikora i in. 2003, Bociąga i in. 2004]. Określanie liczby Reynoldsa powinno stanowić więc uzupełnienie przeprowadzanych badań w zakresach charakterystyk reologicznych, jako potwierdzenie laminarnego lub burzliwego charakteru przepływu płynu.

PIŚMIENNICTWO

- Agassant J.F. i in. 1991. *Polymer Processing – Principles and Modeling*. Wyd. Hanser Publishers.
- Bociąga E., Sikora R. 2004. Kryteria podobieństwa przepływów tworzyw polimerowych w zimnych kanałach form wtryskowych. *Polimery* 49, 36.
- Ferguson J., Kembłowski Z. 1995. *Reologia stosowana płynów*. Wyd. Marcus, Łódź.
- Kembłowski Z., 1973. *Reometria płynów nienewtonowskich*. WNT, Warszawa.
- Kembłowski Z., Michałowski S., Strumiłło C., Zarzycki R. 1985. *Podstawy teoretyczne inżynierii chemicznej i procesowej*. WNT, Warszawa.
- Kloziński A., Sterzyński T. 2005. Ocena poprawki Bagleya na podstawie pomiarów w linii wytłaczarskiej. *Polimery* 50, 455.
- Kloziński A., Sterzyński T. 2007. Ocena poprawek w pomiarach reometrycznych polietylenu. Cz. I. Poślizg przy ścianie kanału. *Polimery* 52, 583.
- Kloziński A., Sterzyński T. 2007. Ocena poprawek w pomiarach reometrycznych polietylenu. Cz. II. Wykładnik płynięcia, poprawka Rabinowitscha. *Polimery* 52, 855.
- Menges G. 1990. *Werkstoffkunde Kunststoffe*. Wyd. Carl Hanser Verlag Manchen Wien.
- Sikora R. (red.), 2006. *Przetwórstwo tworzyw polimerowych*. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne. Wyd. Politechniki Lubelskiej Lublin.
- Sikora R. 1992. *Podstawy przetwórstwa tworzyw polimerowych*. Wyd. Politechniki Lubelskiej Lublin.
- Sikora R., Bociąga E. 2003. Podobieństwo przepływów tworzyw polimerowych w kanałach narzędzi przetwórczych. *Polimery* 48, 753.
- Wilczyński K., Łaczyński B., Szymaniak Z. 1999. Modelowanie zjawiska rozszerzania strugi polimerów za pomocą systemu POLYFLOW. *Polimery* 44, 683.
- Ziołkowski Z. 1982. *Podstawowe procesy inżynierii chemicznej – przenoszenie pędu, ciepła i masy*. WNT, Warszawa.

EVOLUATION OF THE REYNOLDS NUMBER IN RHEOLOGICAL MEASUREMENTS

Summary. This paper present the investigation of Reynold's number determined in an extrusion process. The measurements were realized by use of an extrusion head with exchangeable dies. The polymer used in this study is a commercial PE-LD, blend of PE-LD with PE-MD (ratio 1:1) and PE-MD.

Key words: rheological measurements, Reynolds number, viscosity, polyethylene