

# Komputerowe modelowanie procesów wytłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego – układy niekonwencjonalne ślimaków

Computer modeling for polymer processing. Counter-rotating twin screw extrusion – nonconventional screw configurations

ADRIAN LEWANDOWSKI  
KRZYSZTOF WILCZYŃSKI \*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.5-6.88

Przedstawiono zagadnienie komputerowego modelowania procesu wytłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego z zastosowaniem niekonwencjonalnych układów ślimakowych. Podano przykłady trójwymiarowego, nienewtonowskiego modelowania wybranych elementów niekonwencjonalnych. Zastosowano ogólnie zorientowany pakiet programów obliczeniowej mechaniki płynów CFD (*computational fluids dynamics*) – ANSYS Polyflow. Opisano metodę globalnego modelowania wytłaczania przeciwbieżnego, które ujmuje ten proces całościowo, z uwzględnieniem transportu tworzywa w stanie stałym, uplastyczniania tego tworzywa oraz jego przepływu po uplastycznieniu. Metoda ta bazuje na bezwymiarowych charakterystykach przepływowych ślimaków, definiujących zależności bezwymiarowego natężenia przepływu tworzywa i bezwymiarowego gradientu ciśnienia.

**SŁOWA KLUCZOWE:** polimery, wytłaczanie dwuślimakowe, modelowanie

*Computer modeling of counter-rotating twin screw extrusion with the use of nonconventional screw configurations has been presented. Some examples of three-dimensional, non-Newtonian modeling are shown. CFD generally oriented software ANSYS Polyflow has been used for modeling. Global modeling of counter-rotating extrusion is discussed which describes the process considering solid transport, melting and melt flow. The basis of this approach were screw pumping characteristics which defined the dimensionless flow rate and dimensionless pressure gradient.*

**KEYWORDS:** polymers, twin screw extrusion, modeling

Wytłaczanie jest podstawową i najbardziej masową technologią przetwórstwa tworzyw – nie tylko ze względu na szerokie wykorzystanie w produkcji wyrobów profilowych (np. rur, folii, płyt), lecz także z uwagi na fundamentalne zastosowania w procesach przygotowawczych przetwórstwa, tj. napełniania tworzyw, wzmocniania, granulacji i mieszania (*compounding*). Tego typu procesy przygotowawcze są charakterystyczne dla zdecydowanej większości tworzyw polimerowych. Wytłaczanie jest metodą coraz częściej spotykaną w przemyśle spożywczym – w fazie przetwórstwa materiały spożywcze są niejednokrotnie reologicznie podobne do materiałów polimerowych.

Proces wytłaczania może być realizowany w układach jednoślimakowych wytłaczarek bądź w układach dwuślimakowych, współbieżnych i przeciwbieżnych, z zasilaniem grawitacyjnym (bez dozowania tworzywa) lub

z dozowaniem tworzywa. Wytłaczarki jednoślimakowe są zwykle zasilane w sposób grawitacyjny, natomiast wytłaczarki dwuślimakowe – w sposób dozowany.

W procesie jednoślimakowym, z grawitacyjnym zasilaniem wytłaczarki, ślimak pobiera tworzywo z zasobnika bez ograniczeń, zatem jest tym tworzywem całkowicie wypełniony. W całej przestrzeni przepływu jest generowane ciśnienie, a wydajność wytłaczania zależy od prędkości obrotowej ślimaka. W procesie dwuślimakowym, przy zasilaniu z dozowaniem tworzywa, występują obszary niecałkowitego wypełnienia ślimaka, w których nie jest generowane ciśnienie. W tych obszarach można umieszczać dodatkowe zasobniki (dozowniki), które pozwalają na wprowadzanie napełniaczy, wzmocnień itp. Przy wytłaczaniu z dozowanym zasilaniem wydajność procesu nie zależy od prędkości obrotowej ślimaka, lecz jest określana przez wydajność urządzenia dozującego.

Obecnie projektowanie wytłaczania jest wspomagane komputerowymi symulacjami na podstawie globalnych modeli, które ujmują proces w sposób całościowy, tzn. z uwzględnieniem opisu: transportu tworzywa w stanie stałym, uplastyczniania tworzywa, przepływu tworzywa uplastycznionego. Takie modele umożliwiają prognozowanie przebiegu wytłaczania na podstawie warunków technologicznych procesu, postaci geometrycznej maszyny (wytłaczarki) i narzędzia (głowicy) oraz właściwości przetwarzanego materiału [1, 2]. Od dawna znane są modele wytłaczania jednoślimakowego z tradycyjnym zasilaniem grawitacyjnym, np. NEXTRUCAD (Mc Master University, Kanada), REX (Paderborn University, Niemcy) czy SSEM (Politechnika Warszawska) [3, 4]. Badania wytłaczania dwuślimakowego współbieżnego zostały podjęte później i doprowadziły do budowy globalnych modeli procesu, np. Akro-Co-Twin (The University of Akron, USA), SIGMA (Paderborn University, Niemcy) i Ludovic (CEMEF, Francja) [4, 5]. Badania wytłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego są prowadzone (m.in. przez autorów tego artykułu [6-9]) od niedawna, a ich efektem jest opracowanie jedynego jak dotąd całościowego modelu procesu [10-12]. Ten model został następnie rozwinięty, m.in. przez modelowanie numeryczne MES (z wykorzystaniem metod elementów skończonych) [13, 14]. Ostatnio zespół z udziałem autorów opracował pierwszy i na razie jedyny model wytłaczania jednoślimakowego z dozowanym zasilaniem wytłaczarki [15, 16].

## Wytłaczanie dwuślimakowe przeciwbieżne

Wytłaczanie dwuślimakowe jest ważnym działem przetwórstwa tworzyw polimerowych. Wytłaczarki dwuślimakowe znajdują zastosowanie m.in. w produkcji wyrobów

\* Dr inż. Adrian Lewandowski (a.lewandowski@wip.pw.edu.pl), prof. dr hab. inż. Krzysztof Wilczyński (k.wilczynski@wip.pw.edu.pl) – Politechnika Warszawska

profilowych (wyłaczanie przeciwbieżne) oraz w procesach przygotowawczych przetwórstwa, takich jak napełnianie tworzyw, wzmacnianie i granulacja (wyłaczanie współbieżne).

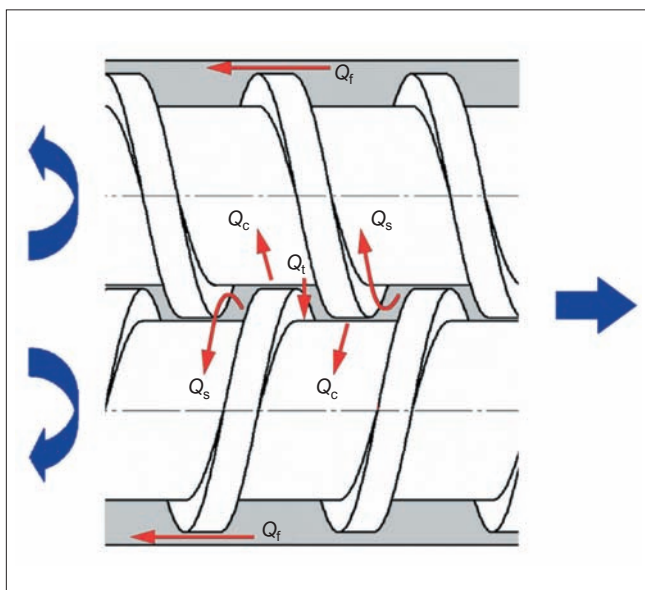
Wyłaczanie współbieżne i przeciwbieżne opisano w pracach [17, 18], gdzie przedstawiono też podstawy modelowania tych procesów. Zwrócono uwagę na zasadniczą odmienną wyłaczania przeciwbieżnego od wyłaczania współbieżnego.

Przepływ tworzywa w wyłaczarce dwuślimakowej przeciwbieżnej jest złożony. Różni się nie tylko od przepływu w wyłaczarce jednoślimakowej, lecz także od przepływu w wyłaczarce dwuślimakowej współbieżnej. Podstawą tego przepływu jest mechanizm wyporu (*positive displacement*), który nie występuje w innych odmianach wyłaczania.

Podstawę wyłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego stanowią klasyczne elementy ślimakowe, ściśle się zazębiające. W takim przypadku przepływ w wyłaczarce przeciwbieżnej jest realizowany w zamkniętej przestrzeni, w komorze mającej kształt litery C – tzw. komorze C (*C-chamber*). Występują tu również różnego typu przepływy przeciekowe (*leakage flows*), schematycznie przedstawione na rys. 1.

Można wyróżnić:

- przepływ walcowy  $Q_c$  (*calendering flow*), zachodzący między rdzeniem jednego ślimaka a wierzchołkami uzwojenia drugiego ślimaka,
- przepływ wierzchołkowy  $Q_f$  (*flight flow*), zachodzący między wierzchołkami uzwojenia ślimaka a ścianką cylindra,



Rys. 1. Schemat wyłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego. Przepływy przeciekowe:  $Q_c$  – przepływ walcowy,  $Q_f$  – przepływ wierzchołkowy,  $Q_t$  – przepływ ciśnieniowy,  $Q_s$  – przepływ boczny [10]

- przepływ ciśnieniowy międzyślimakowy  $Q_t$  (*tetrahedron flow*), przez czworosieczną szczelinę między ściankami uzwojenia ślimaków,
- przepływ boczny  $Q_s$  (*side flow*), zachodzący między bocznymi powierzchniami uzwojenia ślimaków.

W stosunku do konwencjonalnych konfiguracji układów dwuślimakowych można przeprowadzić nawet uproszczoną, analityczną analizę przepływu [1]. Wyłaczarki spotykane w praktyce przemysłowej są jednak zwykle zbudowane z elementów niekonwencjonalnych. Modelowanie przepływu w takich konfiguracjach jest trudne i wymaga złożonych, czasochłonnych obliczeń numerycznych. Przykład układu dwuślimakowego niekonwencjonalnego – utworzonego z elementów sprężających, transportujących i ścinających – pokazano na rys. 2.

## Modelowanie przepływu

Wiarygodne modelowanie przepływu tworzywa w wyłaczarce dwuślimakowej przeciwbieżnej jest możliwe jedynie w przestrzeni trójwymiarowej, z zastosowaniem MES. W tym celu wykorzystano program ANSYS Polyflow [19, 20]. Metodę modelowania przedstawiono na przykładzie elementu ścinającego (rys. 3). Podstawą do modelowania stanowi wyodrębnienie trzech obszarów analizy przepływu: podobszaru płynu (przestrzeni przepływu między ścianką cylindra a rdzeniami ślimaków) oraz dwóch podobszarów ciała stałego (ślimaków I i II).

Rozpatrywane zagadnienie zdefiniowano jako trójwymiarowy, izotermiczny przepływ nienewtonowski. Przyjęto model cieczy potęgowej:

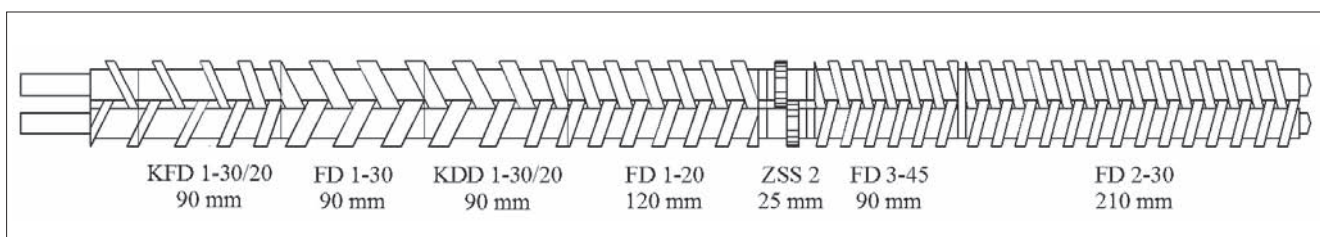
$$\tau = m \dot{\gamma}_D^{n-1} 2\mathbf{D}$$

gdzie:  $\tau$  – tensor ekstra-naprężenia;  $\dot{\gamma}_D$  – uogólniona prędkość ścinania;  $\mathbf{D}$  – tensor prędkości odkształcenia;  $m$ ,  $n$  – parametry równania potęgowej ( $m$  – współczynnik konsystencji w  $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ ,  $n$  – bezwymiarowy wykładnik płynięcia).

W analizowanym przypadku przyjęto współczynnik konsystencji  $m = 1,1 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$  oraz wykładnik płynięcia  $n = 0,4$ .

Przepływ jest ograniczony pięcioma powierzchniami (BS1÷BS5), na których określono następujące warunki brzegowe (rys. 4):

- **BS1** (wlot do przestrzeni przepływu) – warunek *inflow*:  $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_0$ . Warunek *inflow* (wpływ) zakłada istnienie rozwiniętego przepływu na danej granicy i jest realizowany przez podanie objętościowego natężenia przepływu  $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_0$ .
- **BS2** (wylot z przestrzeni przepływu) – warunek *outflow*, *normal forces and tangential velocities imposed* ( $\mathbf{f}_n$  &  $\mathbf{v}_s$ ):  $\mathbf{f}_n = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{v}_s = \mathbf{0}$ . Warunek *outflow* (wyptyw) oznacza



Rys. 2. Przykład układu dwuślimakowego niekonwencjonalnego: KFD – element sprężający, luźno zazębiający się; FD – element transportujący, ściśle zazębiający się; KDD – element sprężający, ściśle zazębiający się; ZSS – element ścinający

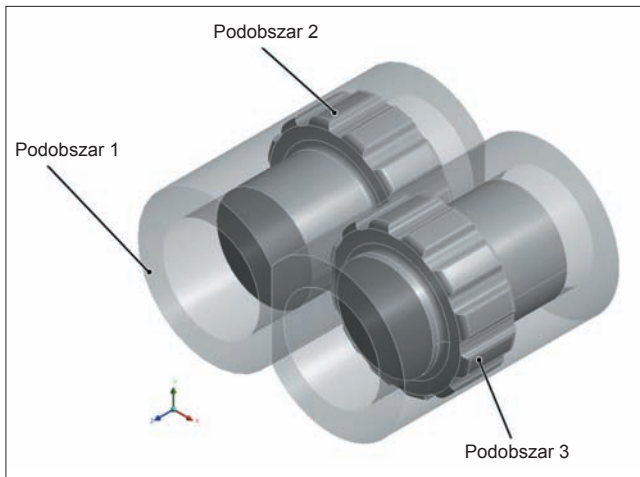
ciągłość przepływu u wylotu z obszaru przepływu i znikanie składowej normalnej gęstości siły oraz składowej poprzecznej prędkości (w stosunku do kierunku przepływu). Warunek  $f_n = 0$ ,  $v_s = 0$  oznacza (łącznie z warunkiem BS1), że w przepływie zostanie wygenerowane ciśnienie.

- **BS3** (wewnętrzna powierzchnia przestrzeni przepływu – powierzchnia rdzenia ślimaka I) – warunek *cartesian velocity imposed* ( $v_x, v_y, v_z$ ):  $\omega = \mathbf{N}$ . Warunek *cartesian velocity imposed* definiuje sztywne przesunięcie lub obrót rozpatrywanej granicy. Warunek obrotu wymaga zdefiniowania współrzędnych osi obrotu i podania prędkości kątowej (prędkości obrotowej ślimaka)  $\omega$ .

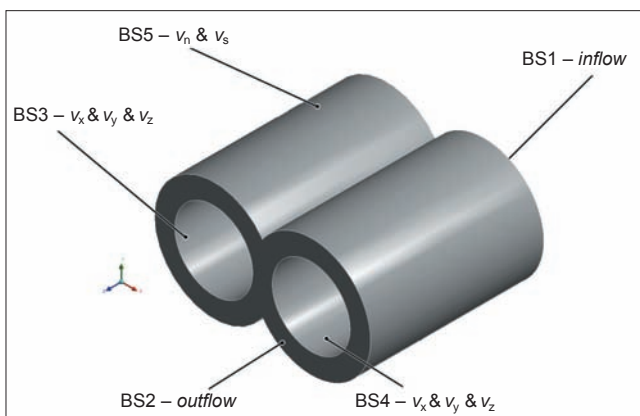
- **BS4** (wewnętrzna powierzchnia przestrzeni przepływu – powierzchnia rdzenia ślimaka II) – warunek *cartesian velocity imposed* ( $v_x, v_y, v_z$ ):  $\omega = -\mathbf{N}$ .

- **BS5** (zewnątrzna powierzchnia przestrzeni przepływu – ścianka cylindra) – warunek *normal and tangential velocities imposed* ( $v_n$  &  $v_s$ ):  $\mathbf{v}_n = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{v}_s = \mathbf{0}$ . Tego typu warunek definiuje składowe prędkości normalnej i stycznej na danej granicy ( $v_n = 0$ ,  $v_s = 0$  oznacza, że granicę stanowi nieruchoma ściana, na której nie występuje poślizg).

Przepływ modelowano w programie ANSYS Polyflow v. 15.0 [19]. Model geometryczny zbudowano z elementów tetragonalnych (w przypadku obracających się ślimaków) oraz elementów heksagonalnych (w przypadku płynu). Pracę wykonano z wykorzystaniem infrastruktury PLGrid. Obliczenia prowadzono na superkomputerze HP/Supermicro Hydra, z wykorzystaniem ośmiu procesorów 2,8 GHz oraz pamięci 204 800 MB RAM. Obliczenia



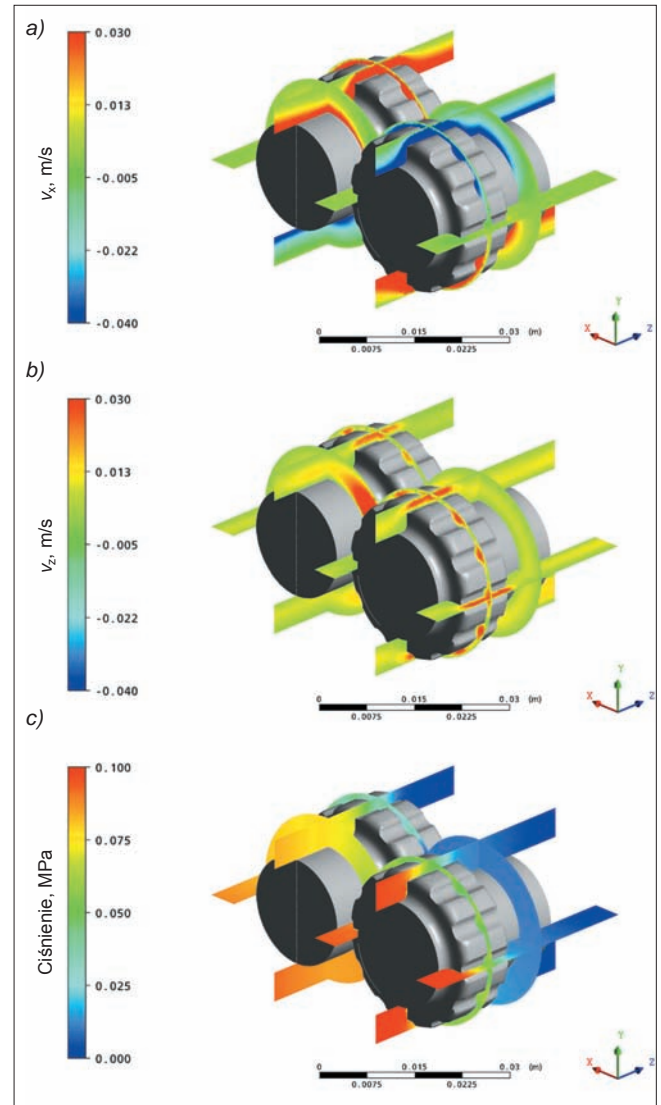
Rys. 3. Schemat układu ślimakowego. Podobszary: 1 (płynu), 2 (ciała stałego – ślimaka I) oraz 3 (ciała stałego – ślimaka II)



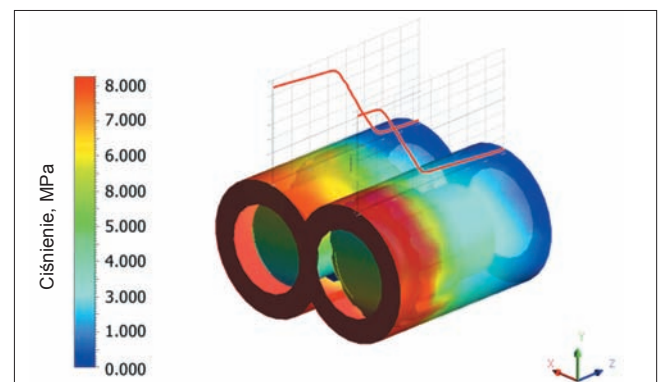
Rys. 4. Warunki brzegowe przepływu w procesie wytłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego

były czasochłonne – dla modelu zbudowanego z ok. 1 mln elementów (80 tys. elementów tetragonalnych i 900 tys. elementów heksagonalnych) trwały od kilku do kilkunastu godzin. Przykładowe wyniki modelowania przedstawiono na rys. 5-9.

Wyniki modelowania przepływu przez element ścinający pokazano na rys. 5 i 6, a przez element sprężający ściśle zazębiający się – na rys. 7 i 8. Przedstawiono rozkłady składowych prędkości w kierunku obwodowym  $v_x$  i wzdłużnym  $v_z$ , a także rozkłady ciśnienia.

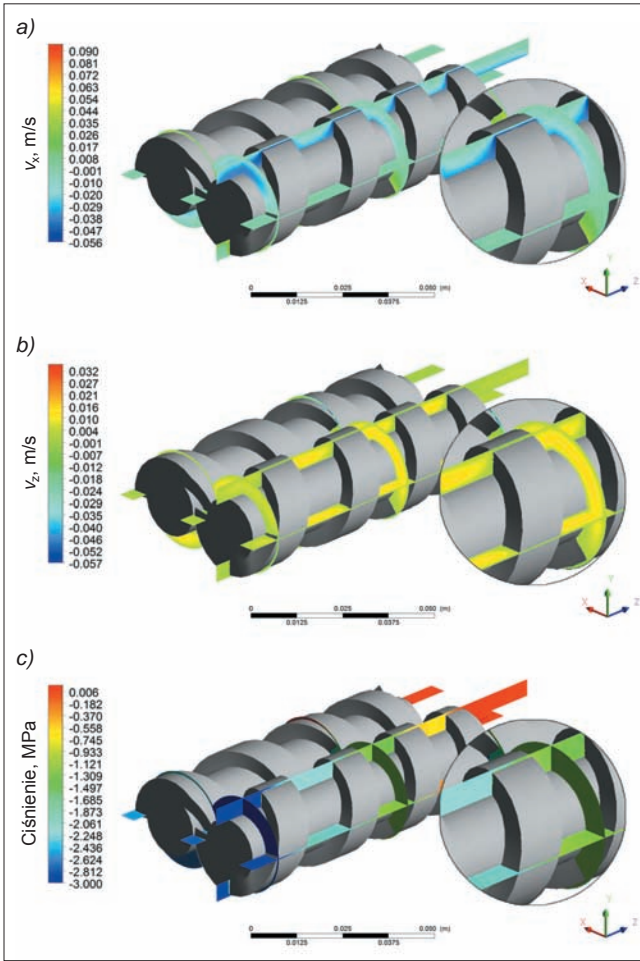


Rys. 5. Rozkład prędkości i ciśnienia w elemencie ścinającym ZSS: a) składowa  $v_x$ , b) składowa  $v_z$ , c) ciśnienie



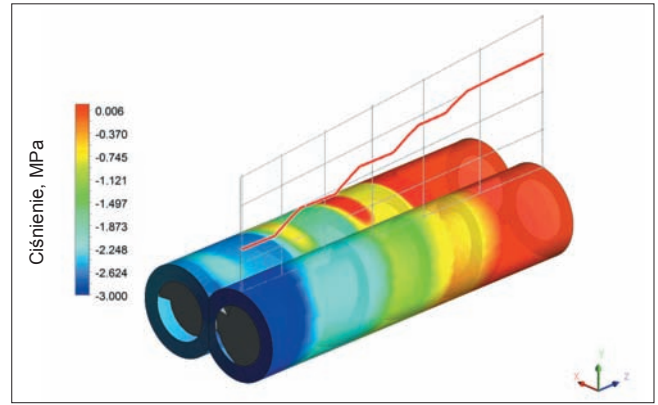
Rys. 6. Profil ciśnienia w elemencie ścinającym ZSS





Rys. 7. Rozkład prędkości i ciśnienia w elemencie sprężającym KDD: a) składowa  $v_x$ , b) składowa  $v_z$ , c) ciśnienie

Z punktu widzenia analizy przepływu w wylączarce przeciwbieżnej podstawowe znaczenie ma rozkład składowej prędkości  $v_x$  (stycznej do rdzenia ślimaka) oraz  $v_z$  (skierowanej wzdłuż osi ślimaków). Zgodnie z nałożonymi warunkami brzegowymi (ruchomy ślimak, nieruchomy cylinder, brak poślizgu) składowa prędkości  $v_x$  płynu przy powierzchni rdzenia ślimaka jest równa prędkości obwodowej rdzenia, natomiast prędkość płynu



Rys. 8. Profil ciśnienia w elemencie sprężającym KDD

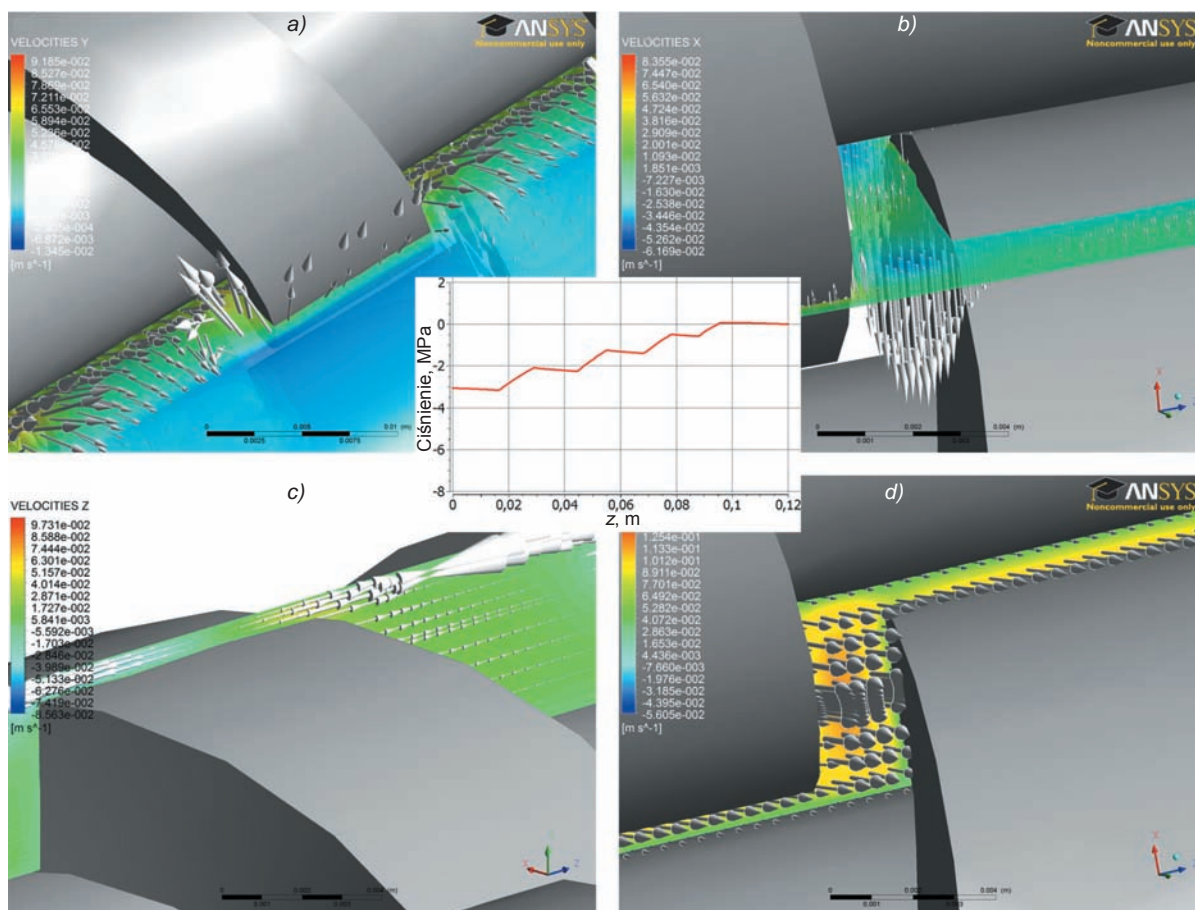
na ścianie cylindra jest równa zero. Trzeba jednak pamiętać, że rzeczywisty przepływ tworzywa w wylączarce zachodzi względem ślimaka – tak, jak gdyby układ współrzędnych był umieszczony na powierzchni rdzenia ślimaka.

Przepływ tworzywa w elemencie ścinającym ZSS jest przepływem ciśnieniowo-wleczonym, przy czym nie występuje tu generowanie ciśnienia. Aby wywołać taki przepływ, konieczne jest wytworzenie odpowiedniego, ujemnego gradientu ciśnienia. Warto zwrócić uwagę na poziomy profil ciśnienia w cylindrycznej części elementu i profil opadający w części rowkowanej. Profile ciśnienia w ślimakach są względem siebie przesunięte.

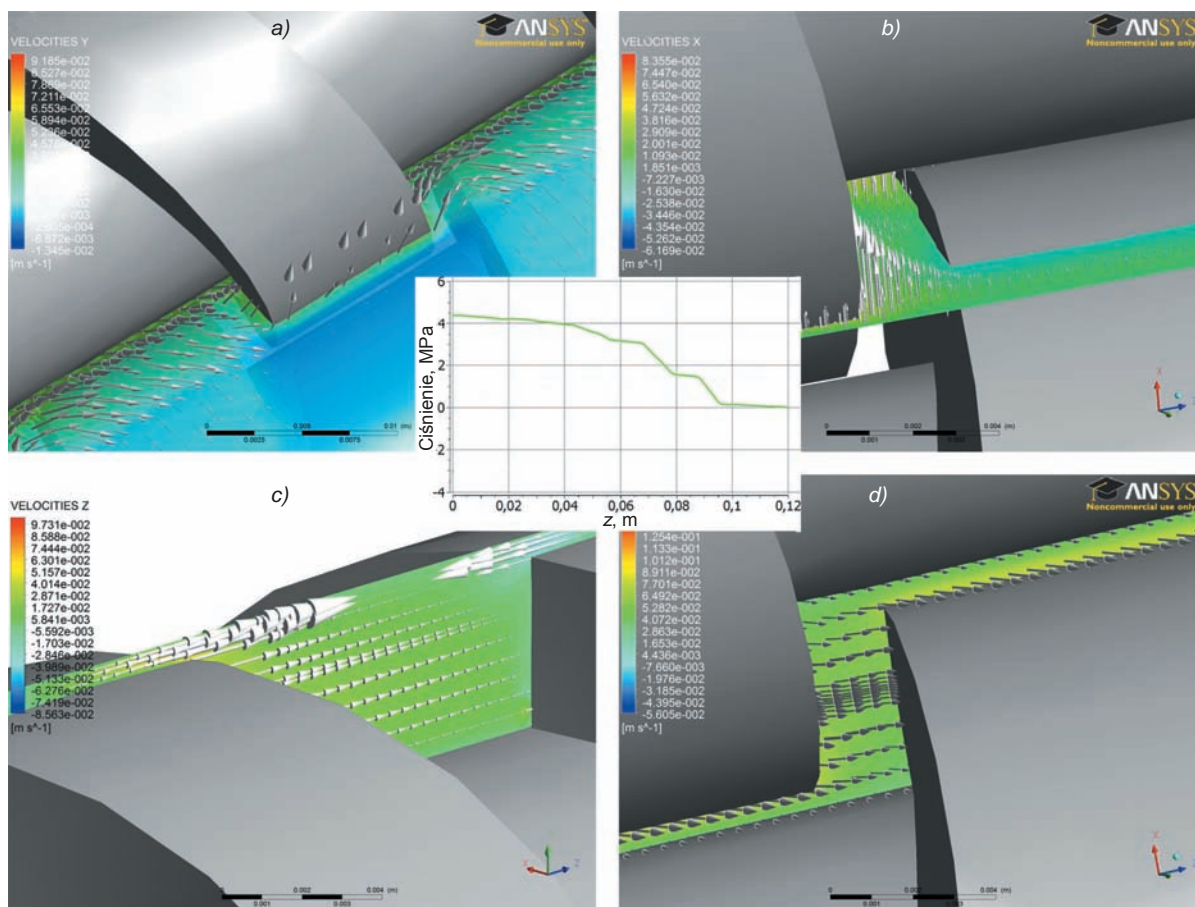
Przepływ tworzywa w elemencie sprężającym KDD zachodzi w komorze C, o zmniejszającej się objętości. Tu również występują wspomniane wcześniej przepływy przeciekowe. W elemencie KDD jest generowane ciśnienie (dodatni gradient ciśnienia). Uwagę zwraca charakterystyczny dla procesów ślimakowych „piłowy” wykres ciśnienia, ze wzrostem ciśnienia w szczelinie między wierzchołkami uzwojenia ślimaka a cylindrem oraz spadkiem ciśnienia w przestrzeni kanału ślimaka.

Szczególnie interesujące są wyniki symulacji przepływów przeciekowych, pokazane na rys. 9 i 10. Dzięki odpowiedniemu zamodelowaniu przestrzeni przepływu udało się zidentyfikować wszystkie przepływy przeciekowe. Wyraźnie widać, jak zmienia się ich charakter wraz ze zmianą gradientu ciśnienia w przestrzeni przepływu.





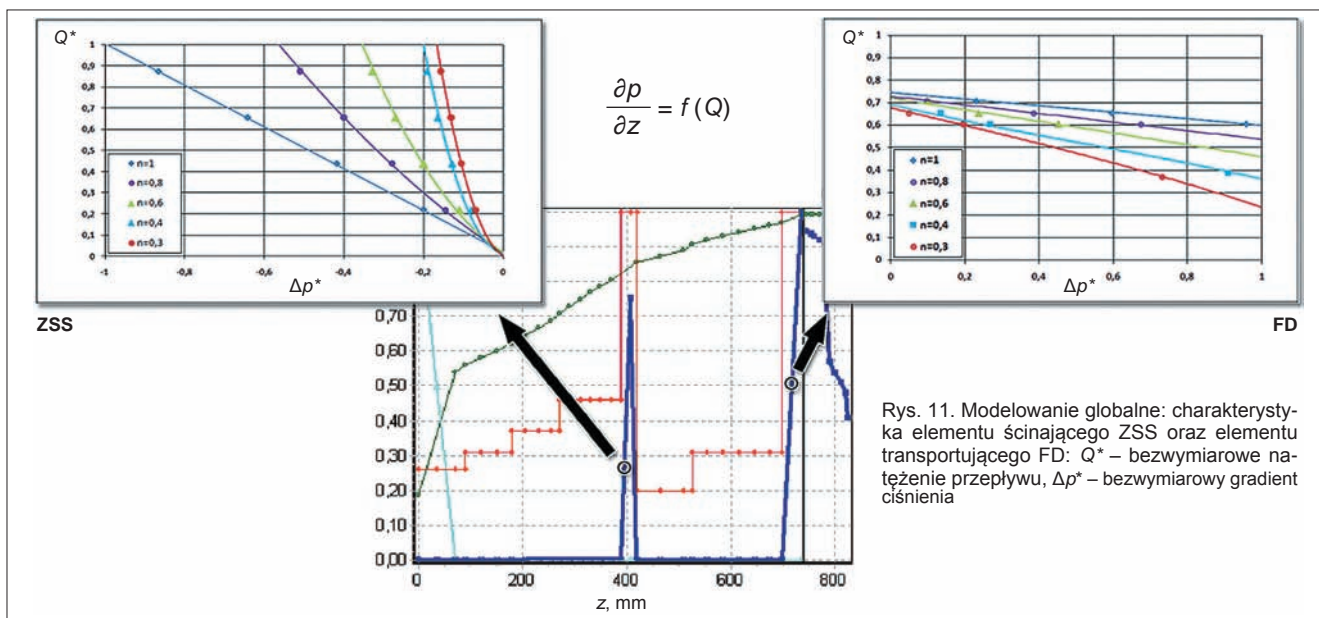
Rys. 9. Przepływy przeciekowe w elemencie sprężającym przy dodatnim gradiencie ciśnienia: a) przepływ walcowy, b) przepływ ciśnieniowy, c) przepływ wierzchołkowy, d) przepływ boczny



Rys. 10. Przepływy przeciekowe w elemencie sprężającym przy ujemnym gradiencie ciśnienia: a) przepływ walcowy, b) przepływ ciśnieniowy, c) przepływ wierzchołkowy, d) przepływ boczny







Rys. 11. Modelowanie globalne: charakterystyka elementu ścinającego ZSS oraz elementu transportującego FD:  $Q^*$  – bezwymiarowe natężenie przepływu,  $\Delta p^*$  – bezwymiarowy gradient ciśnienia

## Modelowanie globalne procesu wytłaczania

Modelowanie globalne obejmuje kompletny opis procesu wytłaczania z uwzględnieniem: transportu tworzywa w stanie stałym, uplastyczniania tworzywa oraz przepływu uplastycznionego tworzywa (w cylindrze i głowicy wylączarki) [10, 11, 14, 16]. Takie modelowanie wymaga całościowych obliczeń (w wielokrotnych pętlach iteracyjnych) w celu określenia punktu pracy wylączarki, definiowanego natężeniem przepływu tworzywa (wydajnością wytłaczania) i ciśnieniem wytłaczania. W tym przypadku zasochłonne obliczenia numeryczne MES nie znajdują zastosowania. Można jednak na ich podstawie opracować charakterystyki przepływowe ślimaków (zależności bezwymiarowego natężenia przepływu od bezwymiarowego gradientu ciśnienia). Pozwalają one na wyznaczenie gradientu ciśnienia dla danego natężenia przepływu. Te zależności można aproksymować odpowiednimi modelami regresyjnymi, a następnie implementować je do całościowego modelu procesu.

Przykład takiego postępowania przedstawiono na rys. 11. Zastosowano tu charakterystyki elementów: ścinającego ZSS oraz transportującego FD. Wynika z nich, że element transportujący FD ma bardzo dużą zdolność generowania ciśnienia, podczas gdy element ścinający ZSS nie wykazuje takiej zdolności.

## Podsumowanie

Przedstawiona metodyka modelowania pozwala na lokalną analizę (w obrębie wybranego elementu ślimakowego) przepływu tworzywa w procesie wytłaczania przeciwbieżnego, a także na analizę globalną, umożliwiającą wyznaczenie rozkładu ciśnienia i temperatury tworzywa w wylączarce oraz określenie przebiegu uplastyczniania tworzywa i stopnia wypełnienia ślimaków. Taka analiza dostarcza więc informacji na temat termomechanicznych warunków przepływu tworzywa i stanowi podstawę do projektowania procesu wytłaczania. Ma duże znaczenie w badaniu przepływu zaawansowanych tworzyw polimerowych – np. mieszanin polimerów, tworzyw napełnionych czy kompozytów polimerowych. W ich przypadku termomechaniczne warunki przepływu mają decydujący wpływ na jakość wytwarzanych i przetwarzanych materiałów. Bez znajomości tych warunków nie można racjonalnie zaprojektować procesu wytłaczania.

## LITERATURA

1. Rauwendaal Ch. "Polymer Extrusion". Munich: Hanser, 2014.
2. Tadmor Z., Gogos C.G. "Principles of Polymer Processing". New York: Wiley, 2006.
3. Altinkaynak A., Gupta M., Spalding M.A., Crabtree S.L. "Melting in a Single Screw Extruder: Experiments and 3D Finite Element Simulations". *International Polymer Processing*. 26 (2011): pp. 182÷196.
4. Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.J. "Multipurpose Computer Model for Screw Processing of Plastics". *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 51 (2012): pp. 626÷633.
5. Teixeira C., Gaspar-Cunha A., Covas J.A. "Flow and Heat Transfer along the Length of a Corotating Twin Screw Extruder". *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 51 (2012): pp. 1567÷1577.
6. Hong M.H., White J.L. "Fluid Mechanics of Intermeshing Counter-Rotating Twin Screw Extruder". *International Polymer Processing*. 13 (1998): pp. 342÷346.
7. Hong M.H., White J.L. "Simulation of Flow in an Intermeshing Modular Counter-Rotating Twin Screw Extrusion". *International Polymer Processing*. 14 (1999): pp. 136÷143.
8. Wilczyński K., White J.L. "Experimental Study of Melting in an Intermeshing Counter-Rotating Twin Screw Extruder". *International Polymer Processing*. 16 (2001): pp. 257÷262.
9. Wilczyński K., White J.L. "Melting Model for Intermeshing Counter-Rotating Twin Screw Extruders". *Polymer Engineering & Science*. 43 (2003): pp. 1715÷1726.
10. Wilczyński K., Jiang Q., White J.L. "A Composite Model for Melting, Pressure and Fill Factor Profiles in a Metered Fed Closely Intermeshing Counter-Rotating Twin Screw Extruder". *International Polymer Processing*. 22 (2007): pp. 198÷203.
11. Jiang Q., White J.L., Yang J. "A Global Model for Closely Intermeshing Counter-Rotating Twin Screw Extruders with Flood Feeding". *International Polymer Processing*. 25 (2010): pp. 223÷235.
12. Jiang Q., Yang J., White J.L. "Simulation of Screw Pumping Characteristics for Intermeshing Counter-Rotating Twin Screw Extruders". *Polymer Engineering & Science*. 51 (2011): pp. 37÷42.
13. Wilczyński K., Lewandowski A., Wilczyński K.J. "Experimental Study of Melting of LDPE/PS Polyblend in an Intermeshing Counter-Rotating Twin-Screw Extruder". *Polymer Engineering & Science*. 52 (2012): pp. 449÷458.
14. Lewandowski A., Wilczyński K.J., Nastaj A., Wilczyński K. "A Composite Model for an Intermeshing Counter-Rotating Twin-Screw Extruder and Its Experimental Verification". *Polymer Engineering & Science*. 55 (2015): pp. 2838÷2848.
15. Wilczyński K., Nastaj A., Wilczyński K.J. "Melting Model for Starve Fed Single Screw Extrusion of Thermoplastics". *International Polymer Processing*. 28 (2013): pp. 34÷42.
16. Wilczyński K.J., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K. "A Composite Model for Starve Fed Single Screw Extrusion of Thermoplastics". *Polymer Engineering & Science*. 54 (2014): pp. 2362÷2374.
17. White J.L., Kim E.M. "Twin Screw Extrusion. Technology and Principles". Munich: Hanser, 2010.
18. White J.L., Potente H. "Screw Extrusion. Science and Technology". Munich: Hanser, 2003.
19. www.ansys.com/products/polyflow.
20. Goger A., Vlachopoulos J., Thompson M.R. "Negative Pressures in Modeling Rotating Polymer Processing Machinery Are Meaningless But They Are Telling Something". *International Polymer Processing*. 29 (2014): pp. 295÷297.