

POLITECHNIKA POZNAŃSKA



**Modelowanie przepływu płynów nienewtonowskich w zakresie
minimalizacji strat energii**

ROZPRAWA DOKTORSKA

DYSCYPLINA:

INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA

Aleksandra NOWAKOWSKA

Promotor:

Prof. Dr hab. inż. Andrzej Frąckowiak

Promotor pomocniczy:

Dr inż. Bartosz Ziegler

POZNAŃ 2024

Podziękowania

Pragnę złożyć serdeczne podziękowania Panu prof. dr hab. inż. Andrzejowi Frąckowiakowi za nieocenioną pomoc udzieloną podczas przygotowywania pracy doktorskiej, za wyrozumiałość oraz motywację do działań podejmowanych na rzecz rozprawy.

Podziękowania składam także dr inż. Bartoszowi Zieglerowi za pomoc, fachowe rady oraz cenne sugestie, które zostały wdrożone w pracy naukowej.

Dziękuję także Panu prof. Dr hab. inż. Michałowi Ciałkowskiemu za nieocenioną pomoc, cenne wskazówki oraz liczne konsultacje naukowe.

Serdeczne podziękowania kieruję także do pracowników Zakładu Technologii Polimerów i Powłok Ochronnych Wydziału Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, a w szczególności ś. p. dr hab. Stanisławowi Zajchowskiemu, profesorowi Politechniki Bydgoskiej za ogromny wkład w rozpoczęcie doktoratu i liczne wskazówki.

Słowa podziękowania kieruję również do mojej rodziny oraz przyjaciół, którzy wspierali mnie duchowo i wielokrotnie służyli szczerą pomocą.

Streszczenie

Przedmiotem rozprawy jest analiza jednego ze sposobów rozwiązania problemu obniżenia strat energii podczas przepływu płynów nienewtonowskich. W pracy dokonano weryfikacji zagadnienia przy wykorzystaniu eksperymentu wizualizacyjnego, symulacji numerycznej oraz badania reometrem kapilarnym z autorskimi dyszami. Na podstawie badań przepływu wybranego płynu, którym jest polipropylen, stwierdzono, że modyfikacja kształtu dyszy bazowej daje pozytywne rezultaty związane ze zmniejszeniem strat ciśnienia, co oznacza również zmniejszenie strat energii. Dysze zostały zmodyfikowane poprzez wydłużenie sekcji zmiany przekroju dyszy oraz poprzez modyfikację ich kształtu opisanego wielomianem trzeciego stopnia. Dysza o zmodyfikowanym kształcie, która dała pewne oszczędności energetyczne, może być zastosowana w urządzeniach, które współpracują z przepływającymi płynami nienewtonowskimi.

We wstępie zawarto motywację do podjęcia tematu rozprawy oraz podstawowe pojęcia związane z płynami nienewtonowskimi. W dalszej części rozprawy analizie poddano dotychczasowe postępy w dziedzinie obranego zagadnienia. Rozdział trzeci zawiera cel i zakres pracy, czyli najważniejsze zadania podjęte na rzecz realizacji rozprawy. W kolejne trzech rozdziałach przedstawione zostały wyniki badań. W pierwszym z nich przedstawiono wyniki badań na autorskim stanowisku wizualizacyjnym z wymiennymi elementami kanału oraz porównano je z symulacjami numerycznymi przepływów. Drugi z tych rozdziałów zawiera symulacje numeryczne przepływu płynu nienewtonowskiego z użyciem sześciu geometrii – trzy dysze zbieżne oraz trzy dysze opisane równaniem wielomianowym. Ostatni z rozdziałów badawczych składa się z opisu procedury i wyników eksperymentu wykonanego za pomocą reometru kapilarnego, w którym zastosowano autorskie dysze utworzone w oparciu o geometrię zastosowaną w symulacji numerycznej. Rozdział siódmy porusza kwestię wpływu wytłaczania w nowo opracowanych kształtach na degradację materiału. W końcowej części pracy zawarto omówienie wyników wraz z wnioskami.

Abstract

The subject of the dissertation is the analysis of one of the ways to solve the problem of reducing energy losses during the flow of non-Newtonian fluids. The work verified the issue using a visualization experiment, numerical simulation and testing with a capillary rheometer with proprietary nozzles. Based on tests of the flow of the selected fluid, which is polypropylene,

it was found that modifying the shape of the base nozzle gives positive results related to reduced pressure losses, which also means reduced energy losses. The nozzles were modified by extending the section changing the nozzle cross-section and by modifying their shape described by a third-degree polynomial. A nozzle with a modified shape, which resulted in some energy savings, can be used in devices that operate with flowing non-Newtonian fluids.

The introduction contains the motivation for taking up the topic of the dissertation and the basic concepts related to non-Newtonian fluids. In the further part of the dissertation, the current progress in the field of the selected issue is analyzed. The third chapter contains the purpose and scope of the work, i.e. the most important tasks undertaken to complete the dissertation. The next three chapters present the research results. The first one presented the results of research on the author's visualization station with replaceable channel elements and compared them with numerical simulations of flows. The second of these chapters contains numerical simulations of non-Newtonian fluid flow using six geometries - three converging nozzles and three nozzles described by a polynomial equation. The last research chapter consists of a description of the procedure and results of the experiment performed using a capillary rheometer, which uses proprietary nozzles created based on the geometry used in the numerical simulation. The seventh chapter addresses the issue of the impact of extrusion in newly developed shapes on material degradation. The final part of the work contains a discussion of the results and conclusions.

Spis treści

Wykaz symboli i oznaczeń.....	8
WSTĘP.....	9
1. Terminologia zagadnień opisujących ruch płynów.....	15
1.1. Podstawowe pojęcia dotyczące płynów nienewtonowskich	15
1.2. Wybrane metody badania płynów	20
2. Analiza dotychczasowych postępów w dziedzinie omawianego zagadnienia.....	23
2.1. Reologia.....	23
2.2. Materiały biologiczne jako przedmiot badań reologicznych.....	23
2.3. Polimery jako przedmiot badań reologicznych	26
2.3.1. Degradacja i relaksacja polimerów	29
2.3.2. Przetwórstwo tworzyw polimerowych	30
2.3.3. Energetyczne aspekty przetwórstwa tworzyw sztucznych.....	37
3. Cel i zakres pracy	40
4. Wizualizacja przepływu płynu newtonowskiego i nienewtonowskiego.....	42
5. Symulacje numeryczne przy użyciu CFD	52
5.1. Środowisko CFD – charakterystyka	52
5.2. Geometria modelu badawczego.....	53
5.3. Tworzenie siatki elementów	58
5.4. Parametry wejściowe.....	65
5.5. Wyniki eksperymentu symulacyjnego.....	68
6. Wyniki badań eksperymentalnych	78
6.1. Specyfikacja aparatury zastosowanej w eksperymencie	78
6.2. Specyfikacja materiału zastosowanego w eksperymencie	80
6.3. Wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych w reometrze kapilarnym	84
7. Wpływ wytłaczania w kanale o nowym kształcie na degradację materiału.....	87
7.1. Wpływ temperatury – degradacja termiczna	87
7.2. Degradacja mechaniczna	87
8. Omówienie wyników i wnioski.....	91
ZAKOŃCZENIE.....	94
BIBLIOGRAFIA.....	97
SPIS RYSUNKÓW	104

SPIS TABEL	109
------------------	-----

Wykaz symboli i oznaczeń

Λ_c – stała Carreau [s]

N_c – wykładnik Carreau [-]

$\dot{m}$ – strumień masy [kg/s]

η_0 – lepkość graniczna przy bardzo małej szybkości ścinania [Pa·s]

η_∞ - lepkość graniczna przy bardzo dużej szybkości ścinania [Pa·s]

τ_y – granica płynięcia [Pa]

A – powierzchnia kanału [m²]

c_w – ciepło właściwe [J/kg·K]

F – siła [N]

$\dot{\gamma}$ - szybkość ścinania [1/s]

H – wysokość [m]

k – współczynnik konsystencji [N·s/m²]

MFI – wskaźnik szybkości płynięcia [g/min]

MVR – objętościowy wskaźnik płynięcia [cm³/10 min]

n – wskaźnik płynięcia [-]

P – ciśnienie [Pa]

Re – liczba Reynoldsa [-]

t – temperatura [°C]

T – temperatura [K]

Δl – odległość między poszczególnymi warstwami płynu [m]

Δv – różnica prędkości [m/s]

Λ – czas charakterystyczny [s]

λ – przewodność cieplna [W/(mK)]

ρ – gęstość [kg/m³]

τ – naprężenie styczne [Pa]

η - lepkość dynamiczna [Pa·s]

WSTĘP

Otoczające nas substancje występują w postaci trzech stanów skupienia – jako ciała stałe, ciecze oraz gazy. Jedną z cech wspólnych cieczy i gazów jest to, że określane są mianem płynów, gdyż nie mają one zdolności do przeciwstawiania się odkształceniom, tak jak to robią ciała stałe. Ciecze oraz gazy różnią natomiast to, że ciecze są mało ściśliwe, podczas gdy gazy cechują się dużą ściśliwością. Ponadto, ciecze trudno zmieniają objętość.

Ze względu na to, że ciecz jest płynem, może się ona dopasowywać do kształtu naczynia, w którym się znajduje. Tak samo dzieje się podczas przepływu dowolnej cieczy, która w miarę „swoich” możliwości dopasowuje się do geometrii przewodów hydraulicznych. Przewodom tym, zależnie od zastosowania, nadawany jest odpowiedni kształt, który warunkowany jest przede wszystkim przez właściwości przepływającej cieczy oraz parametry przepływu takie jak ciśnienie czy prędkość. Zazwyczaj stosowane są kształty charakteryzujące się nieskomplikowaną geometrią.

W zależności od relacji między naprężeniami ścinającymi a szybkością ścinania płyny można podzielić na newtonowskie, które cechują się proporcjonalnością naprężeń do szybkości ścinania, i nienewtonowskie, których naprężenia nie są proporcjonalne do szybkości ścinania. Podstawowym płynem newtonowskim jest woda, natomiast z płynami nienewtonowskimi można spotkać się w urządzeniach takich jak:

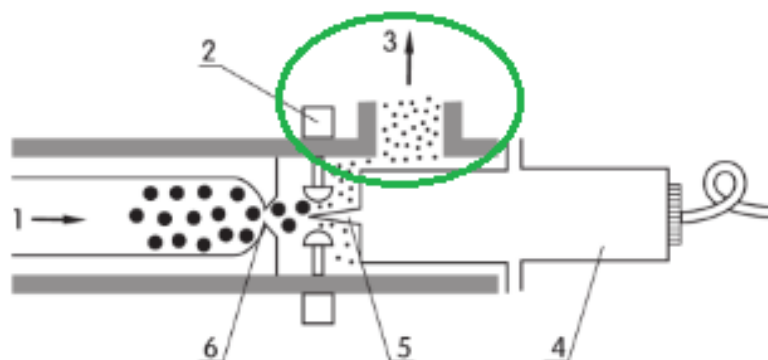
- wtryskarki,
- wycłaczarki,
- maszyny z wtryskiem/przepływem kleju lub farby (rys. 1),
- maszyny do produkcji i przetwarzania żywności (rys. 2 i rys. 3, [85]),
- maszyny do tłoczenia olejów i smarów (rys. 4, [84] i rys. 5, [83]).

Badania zaprezentowane w niniejszej pracy mają na celu minimalizację strat ciśnienia podczas przepływu płynów nienewtonowskich, a więc pozyskanie oszczędności w postaci energii. Zastosowanie nieprawidłowej geometrii kanału może powodować negatywne skutki w postaci strat ciśnienia, a przy zastosowaniu w przepływie szczególnych substancji, może dojść do degradacji materiału. Przedmiotem badań są parametry związane z przepływem cieczy nienewtonowskich dla zadanej geometrii dyszy oraz ciśnienia, lepkości i temperatury płynu.

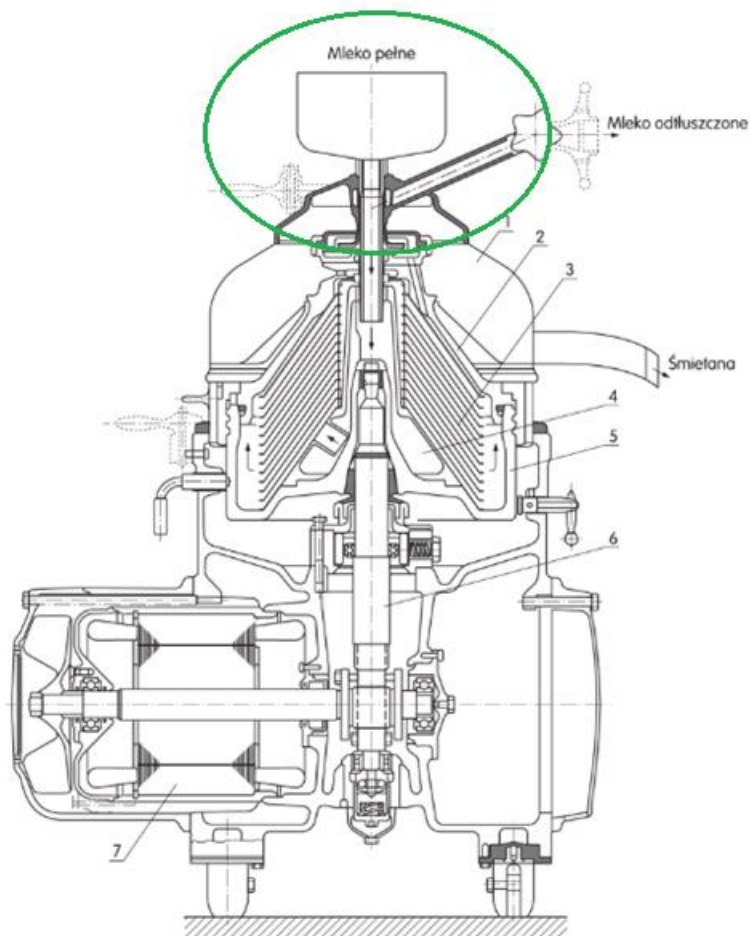
Metody wybranego obszaru badań obejmują symulacje przeprowadzane na stanowisku badawczym i wizualizacyjnym oraz symulacje numeryczne. Użycie kilku różnych metod badawczych pozwoli na dokładniejszą weryfikację wyników.



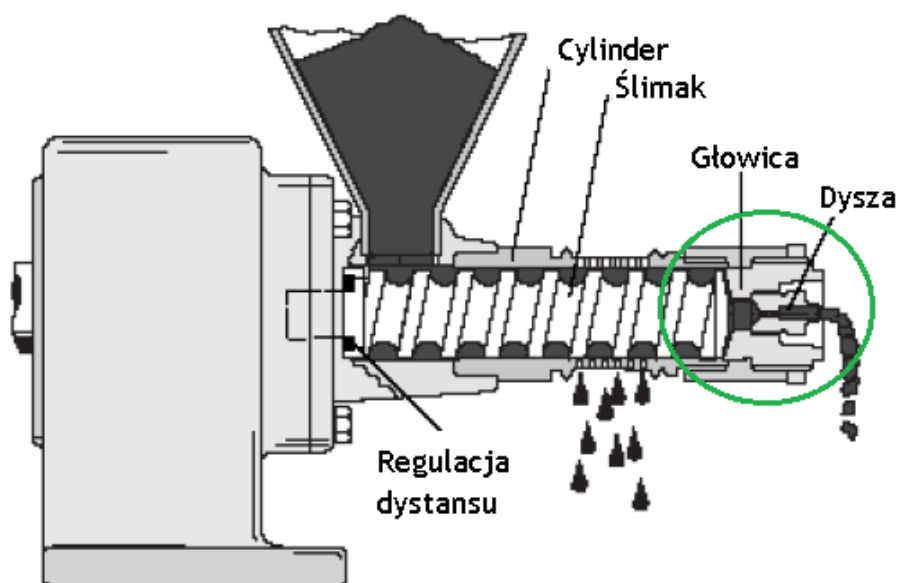
Rys. 1. Dysza w maszynie drukarskiej do oprawiania książek



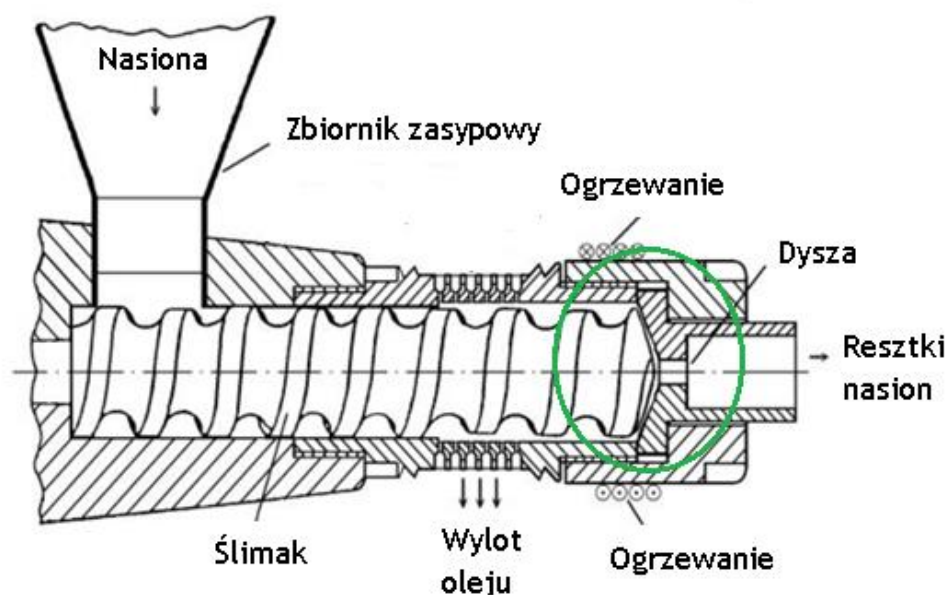
Rys. 2. Homogenizator ultrasoniczny (1 – doprowadzenie surowca, 2 – stroiciel, 3 – odprowadzenie produktu, 4 – czujnik, 5 – płytka drgająca, 6 – szczelina)



Rys. 3. Schemat półzamkniętej wirówki odtłuszczającej do mleka Westfalia (1 – obudowa bąka, 2 – pokrywa bąka, 3 – talerze, 4 – krzyż rozdzielczy, 5 – podstawa bąka, 6 – krzyż rozdzielczy, 7 – silnik elektryczny)



Rys. 4. Przekrój prasy olejowej Komet



Rys. 5. Prasa do tłoczenia oleju

W celu prawidłowego i bezproblemowego przeprowadzenia badań, konieczny jest dobór odpowiedniego płynu nienewtonowskiego. Pierwszym z wyróżnionych do weryfikacji płynów jest krew. Cechuje się ona gęstością podobną do wody, dzięki czemu wyniki wizualizacji mogłyby zostać odniesione do przepływu tego właśnie płynu. Wyniki wizualizacji mogłyby zostać następnie wykorzystane w badaniach przepływowych przez naczynia krwionośne. Jednakże ze względu na wymagania techniczne, jakie niesie za sobą weryfikacja przepływu krwi (konieczność utrzymania płynu w niskiej temperaturze), niezbędne jest podjęcie dalszych poszukiwań.

Kolejnym z wytypowanych płynów nienewtonowskich możliwych do zastosowania na stanowisku wizualizacyjnym i badawczym jest woda morska o znacznym zasoleniu, której nienewtonowski charakter potęguje występowanie alg i sinic wydzielających polimerowe substancje. Niestety znaczna odległość od źródła naturalnego środowiska badań wymusza porzucenie tego materiału jako płynu badawczego.

Następną substancją, wytypowaną dzięki podjęciu współpracy z Zakładem Technologii Polimerów i Powłok Ochronnych Wydziału Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, został polimer z grupy poliolefin, czyli polipropylen. Materiał ten w temperaturze pokojowej jest ciałem stałym, jednak w podwyższonej temperaturze, staje się płynem nienewtonowskim. Polipropylen jest materiałem popularnym i łatwo dostępnym. Posiada on także właściwości odpowiednie do tego, by wykorzystać go w badaniach numerycznych i eksperymentalnych, gdyż cechuje się łatwą

obróbką oraz dużą wytrzymałością termiczną i mechaniczną. Przeprowadzenie eksperymentu na stanowisku badawczym z wykorzystaniem polipropylenu wymaga podgrzania materiału do odpowiedniej temperatury. Jest to możliwe do zrealizowania dzięki podjętej z Politechniką Bydgoską współpracy.

Układ pracy jest następujący: w rozdziale pierwszym wyjaśnione zostały najważniejsze pojęcia związane z płynami nienewtonowskimi. Przedstawiono podział płynów nienewtonowskich oraz omówiono poszczególne ich rodzaje. Opisano również problem lepkości płynów nienewtonowskich i wyszczególniono najczęściej wykorzystywane modele reologiczne. W rozdziale tym zawarto również wybrane metody badania płynów.

Rozdział drugi zawiera analizę dotychczasowego stanu zagadnienia, opracowaną na podstawie prac badawczych oraz publikacji naukowych. Omówiono tematykę dotyczącą pojęcia reologii i przepływu krwi. Poruszono także kwestię właściwości wody morskiej jako płynu nienewtonowskiego. W dalszym etapie rozważaniom poddano polimery jako materiały będące przedmiotem badań przepływowych. W tej części pracy skupiono się na właściwościach polimerów, ich degradacji oraz przetwórstwie.

Rozdział trzeci prezentuje cel i zakres pracy, czyli najważniejsze zadania dotyczące przeprowadzenia badań.

Kolejne trzy rozdziały zostały utworzone w oparciu o wykonane badania wizualizacyjne, symulacje numeryczne oraz badania eksperymentalne. W rozdziale czwartym wykonano symulację na autorskim stanowisku wizualizacyjnym z wymiennymi elementami kanałów. Do badań wykorzystano wodę z opiłkami proszku aluminiowego w celu analizy charakteru przepływającego płynu. Wizualizację uzupełniono o wyniki symulacji komputerowej, w której odzwierciedlono geometrię kanałów zastosowaną na stanowisku laboratoryjnym. W wynikach symulacji zestawiono przepływ dwóch płynów – newtonowskiego (wody) oraz nienewtonowskiego (wodny roztwór karboksymetylocelulozy) w celu ich porównania.

Rozdział piąty zawiera procedurę wykonania badań oraz wyniki uzyskane przy wykorzystaniu symulacji komputerowej w środowisku CFD (ang. Computational Fluids Dynamics). Zadanyymi parametrami przepływu jest geometria dyszy, właściwości fizyczne płynu nienewtonowskiego, model lepkości płynu, prędkość płynu na wlocie do dyszy oraz temperatura. W badaniu tym użyto sześciu różnych geometrii kanału – trzy dysze zbieżne oraz trzy dysze opisane równaniem wielomianowym. Wynikiem symulacji jest rozkład ciśnienia oraz prędkości płynu.

W rozdziale szóstym przedstawiono specyfikację aparatury niezbędnej do przeprowadzenia badań na stanowisku laboratoryjnym – w reometrze kapilarnym, a także charakterystykę

polipropylenu – materiału użytego w próbach badawczych. W rozdziale tym zaprezentowano także autorskie dysze, które służą jako elementy wymienne, umieszczane w reometrze. Wynikiem badania są wartości ciśnienia uzależnione od zadanego przepływu oraz kształtu dyszy.

Rozdział siódmy porusza kwestię wpływu wytłaczania w nowo powstałych kształtach na degradację materiału. Analiza dotyczy degradacji termicznej oraz mechanicznej.

W końcowej części pracy zawarto omówienie wyników badań, czyli zbioru danych pozyskanych w symulacji komputerowej i badaniach na stanowisku laboratoryjnym – reometrze. Elementem wspólnym obu badań jest geometria sekcji badawczej. Na podstawie zestawienia wyników sformułowano odpowiednie wnioski.

1. Terminologia zagadnień opisujących ruch płynów

1.1. Podstawowe pojęcia dotyczące płynów nienewtonowskich

Płynem według definicji znajdującej się w słowniku języka polskiego, jest substancja niemająca określonej postaci, przyjmująca kształt zbiornika, do którego jest wprowadzona [1]. Płynem może być zatem ciecz lub gaz. Trzeci ze stanów skupienia, czyli stan stały, nie może być zaliczany jako płyn, ponieważ substancja taka ma określony kształt i trudno zmienić jej objętość – jest mało ściśliwa.

Ciecz to substancja płynna o określonej objętości, ale bez określonej postaci, przybierająca kształt naczynia, w którym się znajduje [2]. W przeciwieństwie do gazów, które nie mają określonej objętości [4], ciecz to nieściśliwe ciało w ciekłym stanie skupienia [3]. Gazy zawsze wypełniają równomiernie cały pojemnik, w którym się znajdują, jednak tym różnią się od cieczy, że są ściśliwe. Ciecze nie mają określonego kształtu.

Ciecz newtonowska to ciecz, która cechuje się liniową zależnością naprężenia ścinającego od szybkości ścinania. Oznacza to, że lepkość cieczy newtonowskiej zależy jedynie od tych dwóch czynników:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

gdzie:

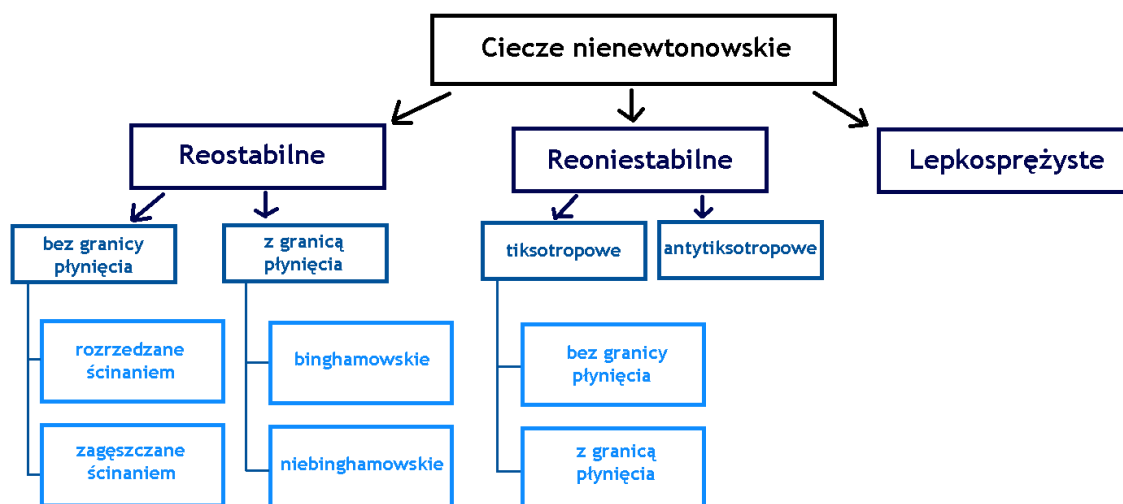
η - lepkość dynamiczna [Pa·s],

τ – naprężenie [Pa],

$\dot{\gamma}$ - szybkość ścinania [1/s].

Zależność lepkości cieczy newtonowskiej od szybkości ścinania jest stała w ustalonych warunkach temperatury i ciśnienia.

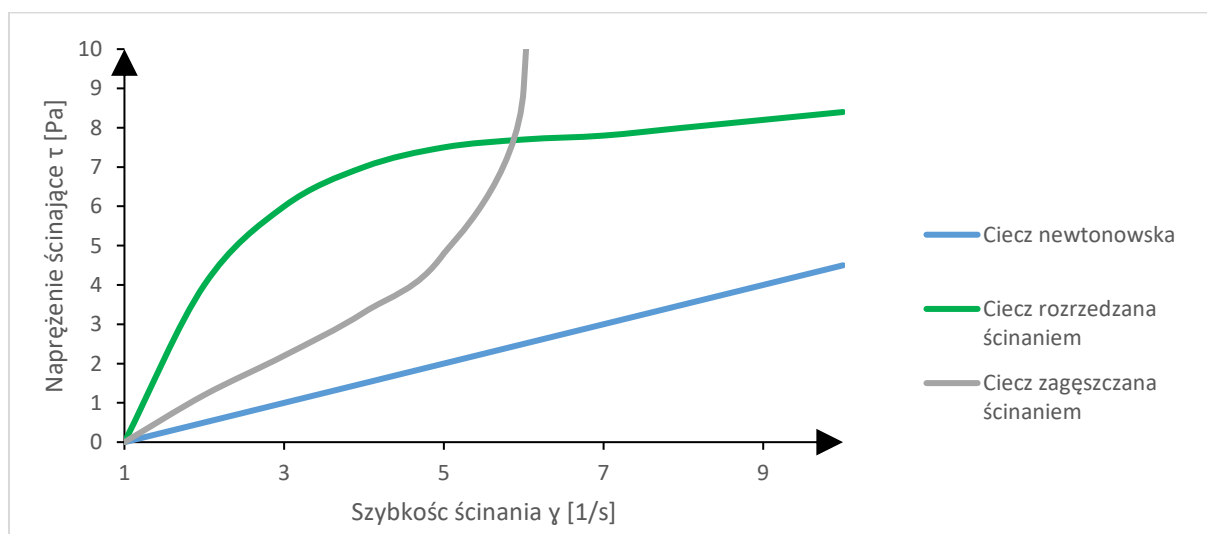
Ciecz nienewtonowska to płyn, którego lepkość nie jest stała w czasie. Jest to każdy płyn, który nie spełnia hydrodynamicznego prawa Newtona mówiącego o tym, że naprężenie ścinające w płynie jest wprost proporcjonalne do występującej w cieczy szybkości ścinania, natomiast współczynnik proporcjonalności, którym jest lepkość, jest parametrem charakteryzującym dany rodzaj płynu. Wykres zależności naprężenia ścinającego od szybkości ścinania nie jest funkcją liniową dla takiego płynu. Płynem nienewtonowskim można wobec tego nazwać taki płyn, który podczas płynięcia nie spełnia prostej proporcjonalności naprężenia stycznego z prędkością ścinania. Ciecze nienewtonowskie zasadniczo dzielone są na trzy grupy: ciecze reostabilne, reoniestabilne oraz lepkosprężyste (rys. 6), [6].



Rys. 6. Podział cieczy nienewtonowskich, [6]

Ciecze reostabilne to ciecze, których właściwości reologiczne nie zależą od czasu ścinania. Zmiana prędkości ścinania powoduje zmianę lepkości tej cieczy. Ciecze reostabilne inaczej nazywane są cieciami nieobdarzonymi „pamięcią”. Dzieli się na ciecze bez granicy płynięcia i ciecze z granicą płynięcia (inaczej nazywane plastycznymi lub lepkoplastycznymi). Granica płynięcia to graniczna wartość naprężenia stycznego, po przekroczeniu której płyn zaczyna płynąć [7]. Ciecze bez granicy płynięcia (rys. 7), dzielą się na:

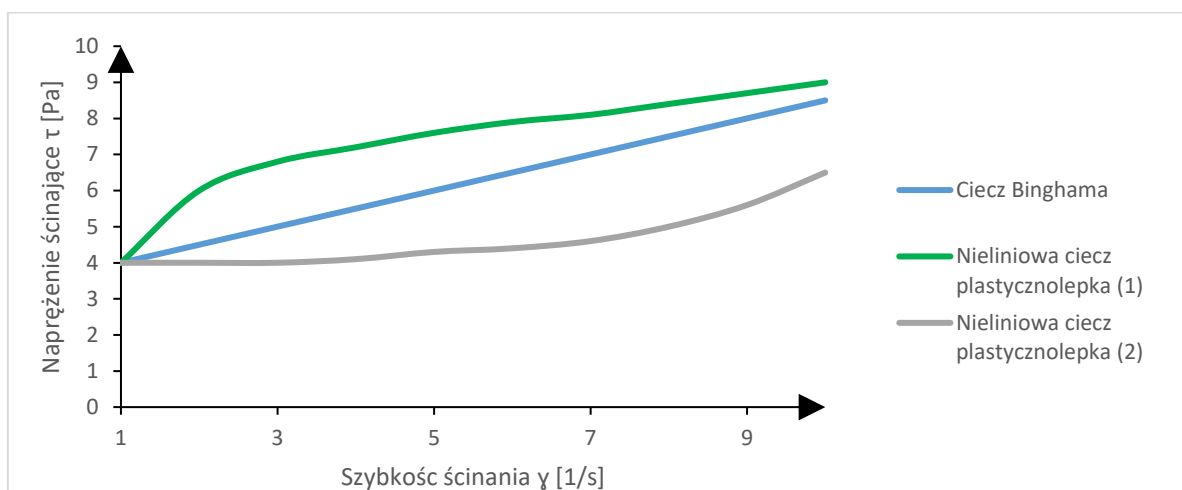
- 1) ciecze rozrzedzane ścinaniem (inaczej pseudoplastyczne) – są to ciecze, dla których obserwuje się zmniejszenie lepkości przy wzroście prędkości ścinania,
- 2) ciecze zagęszczane ścinaniem (inaczej dylatacyjne) – są to ciecze, dla których obserwuje się wzrost lepkości przy wzroście prędkości ścinania.



Rys. 7. Krzywe płynięcia cieczy bez granicy płynięcia w zestawieniu z cieczą newtonowską, [6]

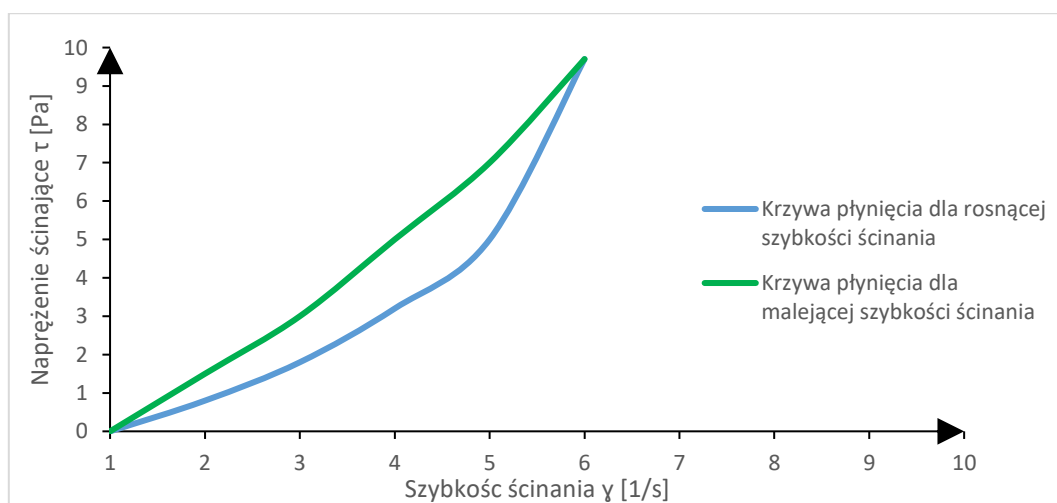
Podział cieczy z granicą płynięcia (rys. 8), jest następujący:

- 1) ciecze binghamowskie – płyny, w przypadku których występuje minimalne naprężenie, poniżej którego płyn nie może płynąć (wówczas płyn zachowuje się jak sprężyste ciało stałe); krzywa płynięcia tego rodzaju cieczy jest prostoliniowa,
- 2) ciecze niebinghamowskie – płyny, które zaczynają płynąć, gdy naprężenie ścinające przekroczy pewną wartość graniczną; krzywa płynięcia tego rodzaju cieczy nie jest linią prostą.



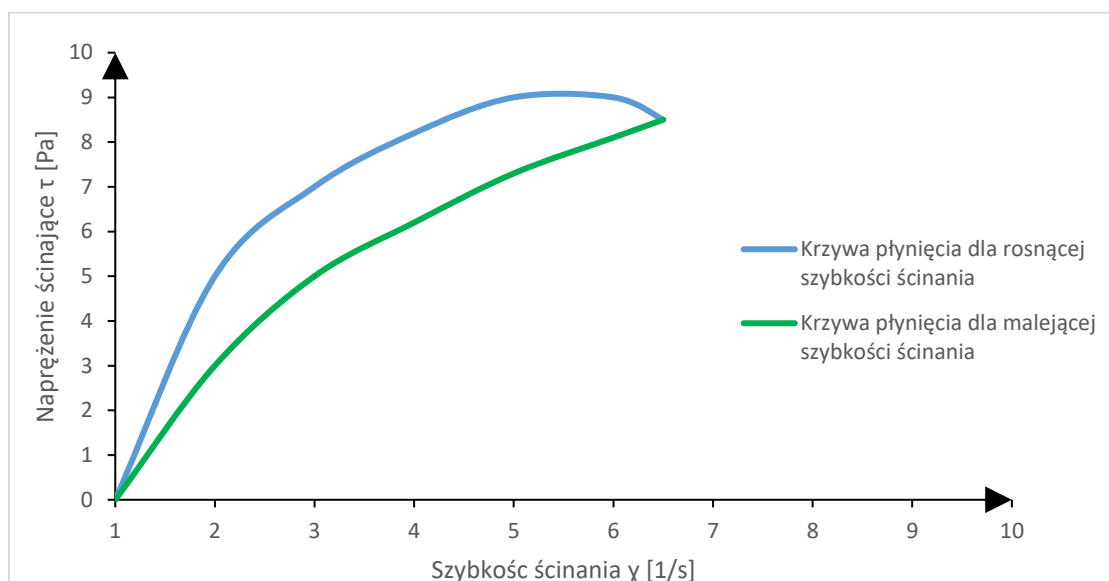
Rys. 8. Krzywe płynięcia cieczy z granicą płynięcia, [6]

Ciecze reoniestabilne to kolejna grupa cieczy nienewtonowskich, których właściwości reologiczne zależą od czasu ścinania. Przy utrzymaniu stałej prędkości ścinania przez pewien czas lepkość tej cieczy zwiększa się (ciecze antytiksotropowe) lub zmniejsza się (ciecze tiksotropowe). Przebieg krzywej płynięcia dla cieczy antytiksotropowej przedstawiono na rys. 9.



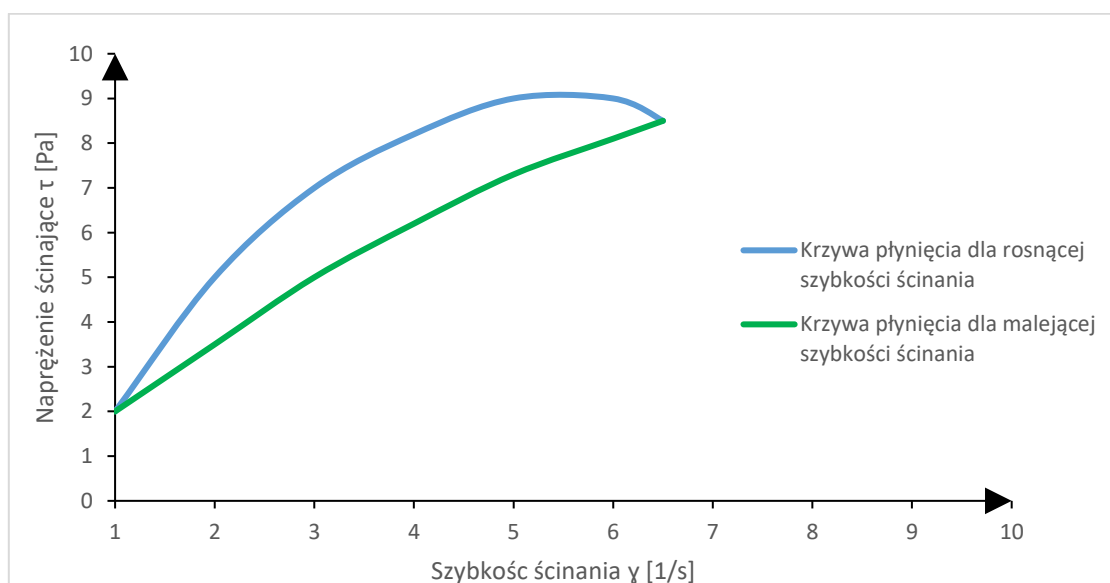
Rys. 9. Krzywe płynięcia cieczy antytiksotropowej, [6]

Ciecze tiksotropowe dzielą się na ciecze z granicą płynięcia oraz ciecze bez granicy płynięcia. Przebieg krzywej płynięcia dla cieczy tiksotropowej bez granicy płynięcia przedstawiono na rys. 10.



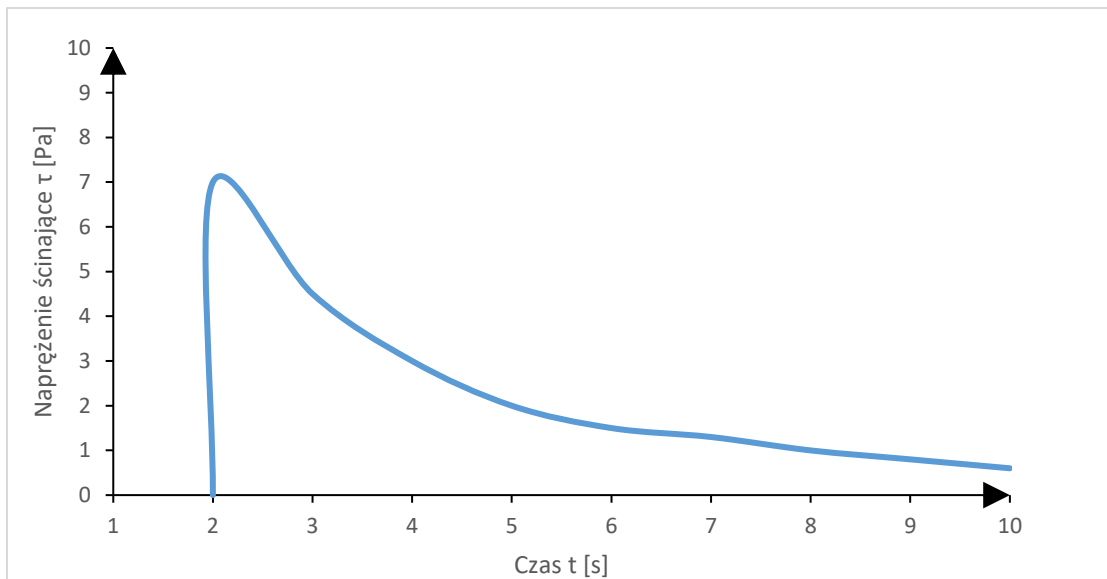
Rys. 10. Krzywe płynięcia cieczy tiksotropowej bez granicy płynięcia, [6]

Przebieg krzywej płynięcia dla cieczy tiksotropowej z granicą płynięcia przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Krzywe płynięcia cieczy tiksotropowej z granicą płynięcia, [6]

Ciecze lepkosprężyste to ostatnia grupa cieczy nienewtonowskich, które wykazują cechy cieczy lepkiej oraz cechy sprężyste, co jest charakterystyczne dla ciał stałych. Płyną one nawet przy dowolnych małych naprężeniach, a więc są cieciami. Wykazują jednakże dodatkowe cechy ciał stałych w postaci sprężystego powrotu po usunięciu siły powodującej ruch (rys. 12).



Rys. 12. Przebieg relaksacji napężenia po skokowym przyroście odkształcenia w czasie t dla cieczy lepkosprężystej, [6]

Lepkość, czyli parametr opisujący charakter przepływu cieczy nienewtonowskiej, to stosunek naprężeń ścinających do szybkości ścinania. Napężenie ścinające to wartość pewnej siły działającej na określonej powierzchni kanału bądź naczynia. Wartość tę można wyznaczyć ze wzoru:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

gdzie:

F – siła [N],

A – powierzchnia kanału [m^2],

natomiast szybkość ścinania to stosunek różnicy prędkości między poszczególnymi warstwami płynu do odległości między nimi

$$\gamma = \frac{\Delta v}{\Delta l} \quad (3)$$

gdzie:

Δv – różnica prędkości [m/s],

Δl – odległość między poszczególnymi warstwami płynu [m].

Ciecze nienewtonowskie cechują się różną lepkością, na którą wpływ mają:

- rodzaj płynu, ponieważ od niego zależy lepkość/gęstość – im bardziej lepki płyn, tym trudniejsze do pokonania siły tarcia wewnętrznego między ściankami a płynem
- temperatura płynu – wraz ze wzrostem temperatury lepkość cieczy maleje, a dla gazów zachodzi odwrotna zależność.

- c) ciśnienia – wraz ze wzrostem ciśnienia lepkość dynamiczna cieczy maleje, a gazów rośnie.
- d) prędkości przepływu – dla płynów nienewtonowskich lepkość zmienia się wraz ze zmianą prędkości przepływu. Płynów newtonowskich ta zależność nie dotyczy.
- e) geometrii naczynia, w którym znajduje się płyn (średnica przewodu, długość, przeszkody, kolanka, chropowatość ścianek, itp.) – im więcej przeszkód, tym większe straty ciśnienia.

Do rozwiązywania zagadnień związanych z przepływem płynów newtonowskich oraz nienewtonowskich stosuje się modele reologiczne. Najczęściej wykorzystywane i najpopularniejsze z nich to:

- a) model Newtona

$$\tau = \eta\gamma \quad (4)$$

- b) model Binghama

$$\tau = \tau_y + \eta\gamma \quad (5)$$

- c) model Carreau

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = [1 + (\Lambda_c \gamma)^2]^{-N_c} \quad (6)$$

- d) model Herschela-Bulkleya

$$\tau = \tau_y + k\gamma^n \quad (7)$$

- e) model Ostwalda-de Waele'a

$$\tau = k\gamma^n \quad (8)$$

Wyznaczenie parametrów reologicznych oraz wykorzystanie powyższych zależności pozwala na opisanie praktycznych przypadków przepływu płynów nienewtonowskich [7].

1.2. Wybrane metody badania płynów

Tak jak wcześniej wspomniano, ciecz nienewtonowska to substancja, która nie spełnia hydrodynamicznego prawa Newtona. Wśród najczęściej spotykanych płynów posiadających takie właściwości można wymienić roztwory stopionych polimerów (tworzywa sztuczne), zawiesiny skrobi, farby, krew, preparaty krwiozastępcze, syropy, produkty spożywcze

(keczup, majonez, śmietana, sery, jogurty), kremy kosmetyczne oraz zawiesiny minerałów z gęsto uporządkowanymi cząsteczkami [9].

Mówiąc o badaniu przepływu cieczy bierze się pod uwagę badane parametry oraz wybraną metodę. Mierzone są wielkości charakteryzujące płyn, czyli temperatura, objętość cieczy, ciśnienie, prędkość, czas przepływu itp. Wśród metod badających przepływ płynów można wyróżnić:

- metody teoretyczne (rozwiązanie sformułowanego problemu przy wykorzystaniu tradycyjnych obliczeń, analizowanie danych, porównywanie, dedukcja itp.),
- metody eksperymentalne (oprzyrządowanie laboratoryjne, symulacje, itp.).

Jedną z metod badania charakteru przepływu cieczy jest metoda wizualizacji. Jest to ogólna nazwa graficznych sposobów tworzenia, analizowania i przekazywania informacji przy wykorzystaniu środków wizualnych. Wizualizacja ma ogromny wpływ na prowadzenie współczesnych badań naukowych, gdyż jest bardzo często wykorzystywana w wielu dyscyplinach takich jak technika, medycyna, dydaktyka, a także sztuka. Wizualizacja ułatwia rozpoznanie i zrozumienie wielu skomplikowanych zjawisk i procesów, gdyż wszelkie dane są przedstawiane w formie, która jest łatwo przyswajalna dla przeciętnego odbiorcy. Wizualizacja jest formą przeprowadzania badań, która wciąż się rozwija. Jest także jedną z metod badawczych niezwykle użytecznych w badaniach modelowych, a także stawianiu i weryfikacji jakościowej hipotez naukowych i technicznych. W dynamice płynów wizualizacja polega na dobraniu metod badawczych w taki sposób, by możliwe było zobrazowanie zachowania się płynu podczas jego przemieszczania się. Pozwala to na uzyskanie ilościowych oraz jakościowych informacji na ten temat. Niestety jednym z problemów wizualizacji płynów jest ich przezroczystość (przykładem jest woda lub powietrze), co uniemożliwia obserwację. Rozwiązaniem w tej sytuacji jest nadanie przepływającemu płynowi takich cech fizycznych, które umożliwiają bezpośrednią obserwację poszczególnych torów elementów płynu (I grupa metod wizualizacji) lub wykorzystanie zmian właściwości optycznych płynu spowodowanych jego ruchem, co daje możliwość obserwacji i rejestracji przy wykorzystaniu specjalistycznej aparatury optycznej (II grupa metod wizualizacji). Do metod I grupy wizualizacji zalicza się:

- wprowadzenie do strumienia cieczy strug zabarwionych tej cieczy,
- wprowadzenie do strumienia cieczy strugi o innej cieczy o zbliżonej gęstości wywołującej świecenie (chemiluminescencja),
- wprowadzenie do powietrza strug dymu,
- wprowadzenie do strumienia płynu opiłków proszku aluminiowego,

- wprowadzenie do strumienia powietrza cienkich krótkich nitek jedwabnych, które umożliwiają obserwacje opływu w bezpośrednim sąsiedztwie ciała.

Metody grupy II to:

- metoda smug, tzw. Schlieren,
- metoda cieni,
- metoda interferometryczna.

Do wizualizacji badań służy również specjalistyczne oprogramowanie. W dynamice płynów stosuje się modele komputerowe, czyli metody numeryczne, które wykorzystują matematyczne opisy ruchu (np. równania Naviera-Stokesa) oraz nieliniowe równania różniczkowe. Ze względu na złożoność zjawisk występujących w mechanice płynów prowadzeniem analiz wykorzystujących metody numeryczne zajmuje się obliczeniowa mechanika płynów (ang. Computational Fluids Dynamics – CFD). Dzięki temu możliwe jest modelowanie takich zjawisk jak wiry, czy oderwanie warstw granicznych płynu oraz badanie zjawisk zachodzących na granicy dwóch ośrodków mieszających się ze sobą [11].

Dzięki podejmowaniu badań związanych z przepływami, można uzyskać rozkład prędkości poruszającego się płynu, a także rozkład temperatury oraz ciśnienia, co pozwala poznać charakter przepływu, a na jego podstawie przewidzieć i korelować pewne zjawiska, prognozować zagrożenia, sterować przepływem płynu oraz kontrolować stan przepływającej cieczy.

2. Analiza dotychczasowych postępów w dziedzinie omawianego zagadnienia

2.1. Reologia

Reologia to dział mechaniki, który opisuje odkształcenia ciał pod wpływem naprężeń. Odkształceniom tym mogą ulegać ciała stałe, ciecze oraz gazy. Idealne ciała stałe odkształcają się w sposób sprężysty. W takim przypadku energia zużyta do wywołania odkształcenia zostaje całkowicie odzyskana po usunięciu naprężeń. Idealne ośrodki płynne, takie jak ciecze i gazy, deformują się w sposób nieodwracalny – płyną. Jednak ciała rzeczywiste, spotykane w przyrodzie, nie są ani idealnymi ciałami stałymi, ani idealnymi ośrodkami płynnymi [10].

Reologia zajmuje się badaniem zależności pomiędzy odkształceniami ciał a siłami wywołującymi te odkształcenia. Reologia opisuje także zachowanie się ciał idealnych, ale również rzeczywistych, które łączą cechy ciał stałych i płynnych oraz odbiegają właściwościami od płynów newtonowskich. W znaczeniu reologicznym nie jest istotny ruch ciała (płynu) jako całości, lecz jedynie przemieszczanie się jednych jego cząstek względem innych. Innymi słowy, przedmiotem zainteresowania reologii jest zmiana wzajemnego położenia elementów danej cieczy podczas jej przepływu [6].

2.2. Materiały biologiczne jako przedmiot badań reologicznych

Jednym z wcześniej podanych przykładów płynów nienewtonowskich jest krew. Jest to jeden z najważniejszych elementów budujących organizm ludzki i zwierzęcy. Z układem krwionośnym, który jest nośnikiem krwi, związanych jest wiele chorób cywilizacyjnych, takich jak nadciśnienie tętnicze, miażdżyca, zaburzenia lipidowe (np. duże stężenie cholesterolu), choroba niedokrwienna serca i zawał serca, niewydolność serca, wady zastawkowe serca, żylna choroba zakrzepowo-zatorowa, niewydolność żył i żylaki, przewlekłe niedokrwienie kończyn (zazwyczaj dolnych), migotanie przedsionków (jako najczęstsza arytmia, czyli zaburzenie rytmu serca).

Miażdżyca jest przewlekłą chorobą, która polega na zmianach w błonie wewnętrznej i środkowej tętnic w postaci odkładania się w tych miejscach złogów lipidowych. Choroba ta jest zapoczątkowana poprzez uszkodzenie ścian śródbłonna. Następstwem rozwoju tego schorzenia jest zmniejszenie światła tętnic oraz zmniejszenie elastyczności ścian naczyń krwionośnych. Zmiany miażdżycowe pojawiają się głównie w miejscach, gdzie istnieje

wysokie ciśnienie krwi, to znaczy w aortach oraz tętnicach, które odchodzą bezpośrednio od niej. Dodatkowo tym miejscom towarzyszy turbulentny przepływ krwi. Finalnie rozwój miażdżycy może spowodować niedokrwienie (jeśli do zwyrodnień dochodzi w tętnicach mózgu, to może dojść do jego niedokrwienia), udar, zmiany psychiczne oraz pęknięcie naczyń czy tętniaków, które powstają na skutek rozwoju miażdżycy.

Dotychczasowe badania inżynierskie pod kątem patogenezy choroby jaką jest miażdżycza, dotyczyły głównie takich zagadnień jak symulacja przepływu krwi w tętniakach, badanie wpływu pulsacji krwi na jej transport w naczyniach krwionośnych [12, 13, 14, 15], wpływ zaburzonego przepływu krwi na śródbłonek [27], badanie modeli lepkości krwi [24], badania przeprowadzane w różnych odcinkach i geometriach naczyń krwionośnych pod kątem zaburzeń przepływu i predykcji miejsc pojawiania się złożeń [25, 26]. Wszystkie te badania były dokonywane metodami statystycznymi oraz metodami CFD. Dodatkowe badania przeprowadzane w związku z weryfikacją zmian miażdżycowych dotyczyły między innymi doszacowania parametrów przy użyciu dokładniejszych narzędzi w programie – dokładniejszych modeli i innych danych niezbędnych do przeprowadzenia symulacji (udoskonalona siatka, geometria, modele lepkości, modele energii) [23]. Celem badań inżynierskich nad patogenezą miażdżycy jest ujawnienie przyczyn uszkodzeń nabłonka ściany wewnętrznej oraz skutków i zagrożeń, jakie niesie za sobą owe uszkodzenie. Badania te mają na celu także rozpoznanie, jakie cechy (geometria naczyń, anatomia układu krwionośnego, styl życia, wiek, itp.) przyczyniają się do rozwoju zmian miażdżycowych. Stwarza to możliwość opracowania predykcyjnego modelu miażdżycy, przez co lekarze mogą w łatwiejszy sposób stawiać diagnozę oraz planować i wdrażać leczenie.

Jedną z przyczyn wzrostu ciśnienia tętniczego, które jest zaliczane do chorób cywilizacyjnych [28], jest także zwężenie tętnic nerkowych. Nerki to jedne z kluczowych narządów organizmu ludzkiego. Ich zadaniem jest filtracja krwi, która jest dostarczana do nerek za pomocą tętnic nerkowych. Te z kolei są bezpośrednio połączone z aortą człowieka. Niestety na skutek miażdżycy może dojść do zwężenia tętnic w tym obszarze. Zmniejszenie przekroju naczyń krwionośnych jakimi są tętnice nerkowe może prowadzić do nadciśnienia naczyniowo-nerkowego, nefropatii, upośledzenia czynności nerek, zmniejszenia rozmiarów nerki oraz pogorszenia jej czynności. Przypadłość, jaką jest zwężenie tętnicy nerkowej oraz towarzyszące jej objawy można leczyć poprzez poddanie pacjenta angioplastyce bądź angioplastyce z wprowadzeniem protezy naczyniowej. Inną metodą leczenia jest korekcja chirurgiczna zwężonej tętnicy nerkowej. Jeżeli żadna spośród wymienionych metod nie zda egzaminu, pozostaje jedynie leczenie farmakologiczne bądź przeszczep. Zabiegi te mają na celu obniżenie

bądź unormowanie ciśnienia tętniczego oraz poprawę czynności nerek. Głównymi elementami wpływającymi istotnie na zwężenie naczyń krwionośnych są:

- tworzenie się blaszek miażdżycowych w miejscach, w których na ścianę tętnic oddziałują małe i oscylacyjne naprężenia ścinające, które są konsekwencją formowania się przepływów zaburzonych,
- krzywizny wewnętrzne tętnic oraz węzły naczyniowe,
- zmieniająca się cyklicznie geometria naczyń spowodowana ruchem serca,
- wrażliwość ściany naczyń na uszkodzenie.

Do tej pory, analizy dotyczące zwężenia tętnicy nerkowej oraz nadciśnienia naczyniowo-nerkowego dokonywane były w oparciu o metody statystyczne. Badano, jakiej populacji osób dotyczy problem analizowanego schorzenia [16-18], u ilu pacjentów udało się poprawić funkcjonowanie nerek oraz zredukować ciśnienie [19], a także która metoda diagnozowania nadciśnienia tętniczego wydaje się być najlepsza [20, 21]. Dodatkowo zbadano, którzy pacjenci ze zwężeniem tętnicy nerkowej powinni skorzystać z natychmiastowej interwencji medycznej [22]. W jednej z publikacji rozważaniom poddano geometrię tętnic nerkowych oraz ich połączenie z aortą jako możliwą przyczynę powstawania zwężenia miażdżycowego [29]. Wyniki zawarte w publikacji pokazują, że obszar ściany naczynia, który jest narażony na wzrost naprężeń ścinających pokrywa się z miejscem, gdzie zaobserwowano zwężenie tętnicy nerkowej pacjenta. Stwierdzono więc, iż geometria naczyń ma istotny wpływ na kształtowanie się przepływów i naprężeń stycznych w tym miejscu układu krwionośnego.

Wielu badaczy podejmuje próby weryfikacji przepływu krwi w naczyniach krwionośnych. Są to jednak próby czysto teoretyczne, symulacyjne. Podjęcie badań eksperymentalnych na stanowisku badawczym jest obecnie problematyczne, gdyż krew to płyn ustrojowy – materiał biologiczny, który ratuje życie. Swobodny dostęp do krwi, która miałaby posłużyć do badań z dziedziny mechaniki płynów, nie jest możliwy. Ponadto, konieczne byłoby badanie przepływu tego płynu przy utrzymaniu niskiej temperatury ze względu na ryzyko jego degradacji.

W odróżnieniu od wody – płynu newtonowskiego, będącego jednym z najważniejszych substancji na Ziemi, woda morska o znacznym zasoleniu, jest płynem nienewtonowskim. Nienewtonowski charakter wody morskiej jest potęgowany przez występowanie alg i sinic, które wydzielają polimerowe substancje o konsystencji śluzu. Powodują one lokalne zmiany własności wody morskiej, tworząc ciecz nienewtonowską. Zmiana ta wpływa na dynamikę cząstek morskich, czyli na czynniki takie jak prędkość i pozycję opadania. W takich warunkach

procesy związane z oddziaływaniem międzycząsteczkowym (np. agregacja, motoryka mikroorganizmów, itp.) będą przebiegały zupełnie inaczej niż w zwyczajnej wodzie morskiej. Badania reologiczne tego zagadnienia i rozwiązywanie takich kwestii może być przydatne w szczególności dla biologów, klimatologów, ekologów, a także oceanologów. Weryfikacja zjawisk zachodzących w wodzie morskiej wymaga jednak interdyscyplinarnych znajomości z dziedziny ekologii, reologii, mechaniki płynów, a także chemii oceanów, by móc połączyć wiele aspektów tego złożonego systemu. Problem badania owego zagadnienia potęguje znaczna odległość od źródła naturalnego środowiska badań, gdyż najbardziej ekstremalne ilości substancji polimerowych o konsystencji śluzu w wodzie morskiej występują w basenie Morza Śródziemnego, a także Zatoce Biskajskiej oraz u wybrzeży Japonii [87].

2.3. Polimery jako przedmiot badań reologicznych

Kolejną substancją nienewtonowską, o której wspomniano wcześniej, są polimery. Polimery to „zbudowane z wielu części” substancje chemiczne charakteryzujące się dużą masą cząsteczkową. Składają się one z wielokrotnie powtórzonych struktur zwanych merami. Polimery dzielą się na naturalne (podstawowy budulec żywych organizmów) oraz syntetyczne (podstawowy budulec tworzyw sztucznych oraz wielu produktów chemicznych, w tym farb, olejów przemysłowych, klejów, lakierów, itp.) [30].

Do najbardziej popularnych polimerów zalicza się [31] [33]:

- polietylen (PE) – wytwarza się z niego głównie folie białe lub przezroczyste; jest odporny chemicznie oraz tłusty w dotyku,
- polipropylen (PP) – wytwarzane są z niego wykładziny, zabawki, rury, pojemniki, łatwo się go barwi; jest jeszcze bardziej odporny chemicznie i wytrzymały niż PE, jednak jest trudniejszy w obróbce,
- polistyren (PS) – służy do wytwarzania rur kwasoodpornych, izolatorów, zabawek, części samochodów, a także galanterii i piankowych materiałów izolacyjnych; jest kruchy, ale wytrzymały na zgniatanie,
- poliakrylonitryl (PAN) – jest składnikiem sztucznego jedwabiu, często nazywany analiną; odporny chemicznie, można go używać w kontakcie z żywnością, stosowany tam, gdzie wymaga się przezroczystej powierzchni,

- politereftalan etylenu (PET) – produkuje się z niego plastikowe butelki, a także stosowany jest jako sztuczne włókno; jest odporny na czynniki atmosferyczne oraz korozję, cechuje go mała chłonność wody,
- politlenek etylenu (PEO) – tworzywo konstrukcyjne, tak zwana „sztuczna stal”, materiał stosowany także jako rozpuszczalnik i środek zwiększający lepkość ciekłych kosmetyków i leków; stosuje się go do poprawy właściwości mechanicznych oraz odporność korozyjną stopów metali lekkich, cechuje się wytrzymałością na rozciąganie i skręcanie,
- polichlorek winylu (PCW, PVC) – produkuje się z niego rurki, węże, panele podłogowe, jest też składnikiem klejów i lakierów; wykazuje się dużą odpornością na działanie kwasów i zasad, nawet tych stężonych,
- nylon – stosowany do produkcji lin i sztucznych włókien; jest mocny i rozciągliwy,
- kauczuk syntetyczny – produkuje się z niego głównie opony samochodowe, przenośniki taśmowe, uszczelki, węże, używany jest także do produkcji obuwia i klejów; bardzo elastyczny materiał, mało odporny na promienie UV,
- politetrafluoroetylen (PTFE) – wykorzystywany do budowy urządzeń i aparatury w technice laserowej, medycznej, chemicznej, powszechnie znany jest pod nazwą teflon; jest wyjątkowo odporny chemicznie, ma wysoką odporność termiczną, jest jednak kosztowny i trudny w obróbce,
- polimetakrylan metylu (PMM) – inaczej szkło organiczne, wykonuje się z niego ekrany drogowe, elementy oświetlenia, materiały reklamowe takie jak kasetony, tablice reklamowe, standy; cechuje się dużą przezroczystością i połyskiem, jest materiałem sztywnym i twardym, a także odpornym na zarysowania, jest odporny na promienie UV i warunki atmosferyczne,
- polisiloksan – tworzywo stosowane w medycynie oraz jako materiał konstrukcyjny, używany do produkcji farb i smarów; znajduje się pod postacią kauczuków i żeli, posiada właściwości zmiękczone i wygładzające skórę, przyspiesza gojenie blizn; ma właściwości antybakteryjne, antyadhezyjne,
- polilaktyd (PLA) – stosowany w medycynie, do wyrobu produktów jednorazowych oraz w drukarkach 3D; jest biodegradowalny, nie jest łatwopalny, jest niemal bezwonny, nietoksyczny, posiada niską temperaturę topnienia.

Polimery wykorzystywane są w wielu gałęziach przemysłu, w szczególności w przemyśle kosmetycznym, meblarskim, w medycynie, transporcie i komunikacji, produkcji opakowań,

aparatury i części maszyn, w gospodarstwie domowym, budownictwie, w przemyśle elektrotechnicznym i w elektronice, [32].

Polimery są materiałem łatwo dostępnym i bardzo popularnym, a jego właściwości, takie jak łatwa obróbka, duża wytrzymałość przy jednoczesnej lekkości oraz termoplastyczność powodują, że badania reologiczne i mechaniczne przepływu polimerów są możliwe do zrealizowania zarówno na drodze symulacji numerycznych, jak i badań eksperymentalnych na stanowisku badawczym.

Jak już wcześniej wspomniano, reologia to dział mechaniki, który opisuje odkształcenia ciał pod wpływem naprężeń. Aby z jak największą dokładnością opisać zachowanie się wybranego materiału w danych warunkach, stosuje się modele reologiczne. Model reologiczny to zależności opisujące naprężenie lub lepkość materiału w funkcji zmiennych takich jak prędkość odkształcenia, temperatura, ciśnienie, itp [37]. Polimery opisywane są następującymi modelami reologicznymi [38]:

- a) Ostwalda de Waele,
- b) Bingham,
- c) Newtona,
- d) Goluba,
- e) Crossa,
- f) De Havena,
- g) Reinera-Phillipoffa,
- h) Metera,
- i) Herschela-Bulkley'a.

Jednym z podstawowych modeli opisujących reologię polimerów jest potęgowy model Ostwalda-de Waele'a opisany równaniem [39]:

$$\tau = ky^n \quad (9)$$

gdzie:

k – współczynnik konsystencji [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$],

n – wskaźnik płynięcia [-].

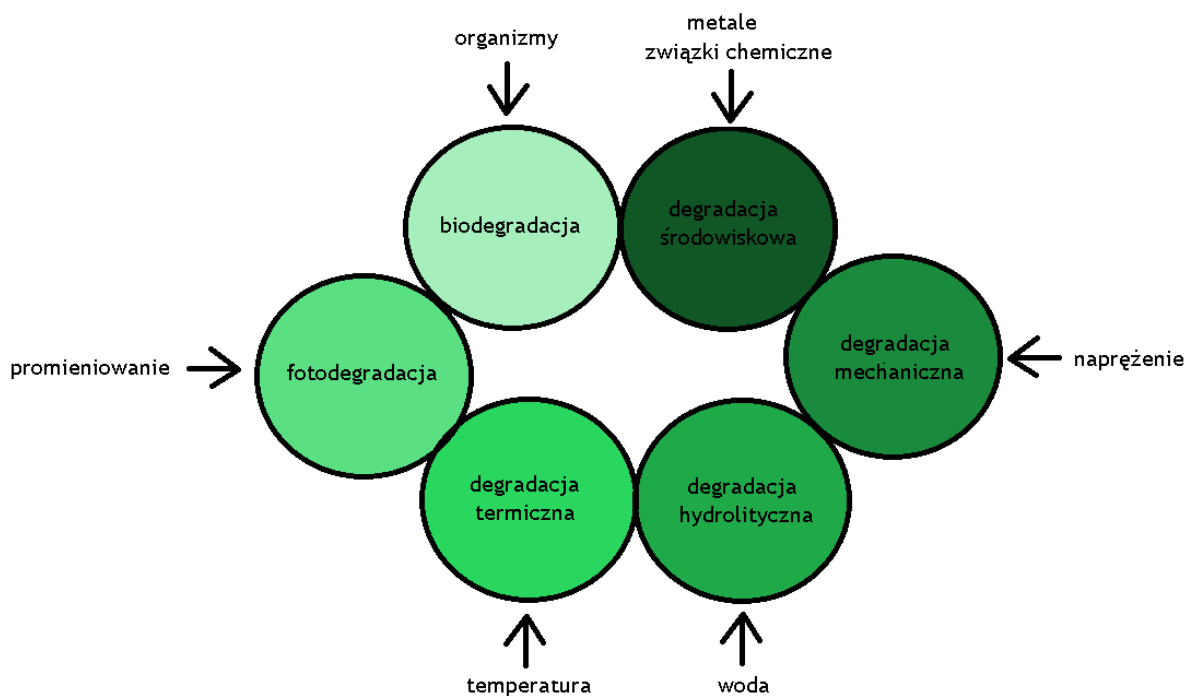
Jest to najprostszy model potęgowy, który opisuje krzywą płynięcia w wąskim zakresie pośrednich wartości szybkości ścinania. Matematyczna postać modelu Ostwalda jest konsekwencją tego, że dane doświadczalne można w pewnym zakresie przybliżyć linią prostą. Dla płynów nienewtonowskich rozrzedzanych ścinaniem wskaźnik płynięcia przyjmuje wartości $n < 1$, [7].

2.3.1. Degradacja i relaksacja polimerów

Zjawiska towarzyszące polimerom to między innymi degradacja i relaksacja. Degradacja polimerów to proces rozpadu cząsteczek polimerów, w wyniku którego powstają inne produkty. Degradacja prowadzi zazwyczaj do zmniejszenia stopnia polimeryzacji i zachodzi pod wpływem [41]:

- czynników fizycznych:
 - światła,
 - ciepła (degradacja termiczna),
 - promieniowania radiacyjnego,
 - naprężania (degradacja mechaniczna),
- czynników chemicznych:
 - tlenu (degradacja utleniająca),
 - wody,
 - kwasów,
 - zasad,
 - czynników atmosferycznych.

Czynniki wpływające na degradację tworzyw polimerowych zaprezentowano graficznie na rys. 13.



Rys. 13. Czynniki wpływające na degradację tworzyw polimerowych i jej rodzaje, [41]

Degradacja polimerów to inaczej niszczenie materiału, polegające na fizycznym lub chemicznym rozkładzie i jednoczesnej trwałej zmianie właściwości fizycznych polimerów. Przez degradację rozumie się również rozkład, który polega nie tylko na zmianie właściwości fizycznych i chemicznych materiału, ale również na spadku masy wyjściowej rozkładanego polimeru.

Degradację polimerów można podzielić również ze względu na, [34]:

- zmianę struktury chemicznej poszczególnych merów, które tworzą łańcuch polimerów, podczas której dochodzi do oderwania się od nich atomów lub grup funkcyjnych,
- cięcie głównych łańcuchów polimerów (np. poprzez pękanie),
- przekształcanie głównych łańcuchów polimerów (np. na skutek wbudowywania się do nich podstawników bocznych),
- procesy sieciowania, które opierają się na powstawaniu wiązań pomiędzy merami pochodzącymi z innych łańcuchów polimerów.

Najczęściej zdarza się, że kilka procesów degradacji zachodzi jednocześnie.

Relaksacja polimerów to powolne zmiany wartości naprężeń materiału, które występują wraz z utrzymującymi się przez dłuższy czas stałymi odkształceniami. Innymi słowy, jest to samoczynne zanikanie naprężeń w odkształconym materiale, [42].

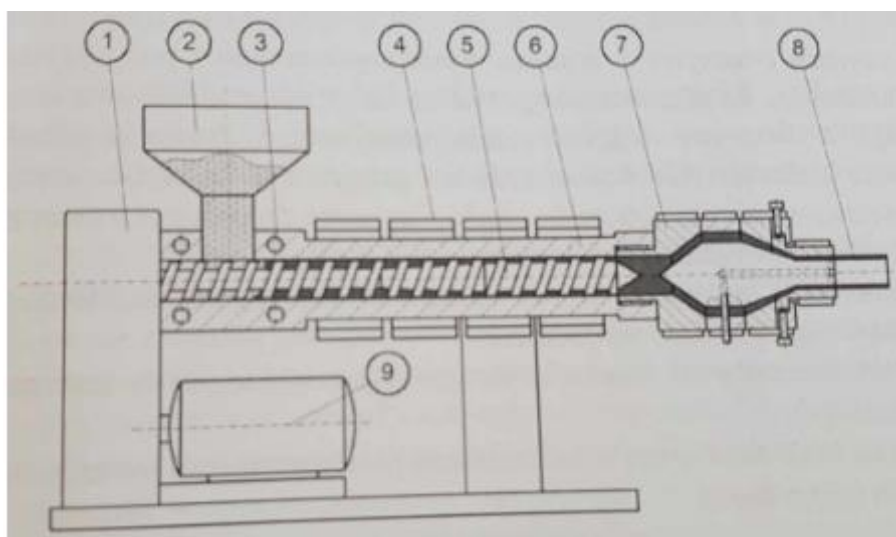
2.3.2. Przetwórstwo tworzyw polimerowych

Aby polimery mogły być wykorzystywane w tak wielu gałęziach gospodarki, należy je najpierw odpowiednio przetworzyć. Przetwórstwo tworzyw polimerowych polega na uplastycznieniu przygotowanego uprzednio materiału, a następnie nadania mu wybranego kształtu przez narzędzie takie jak wtryskarka, wytłaczarka lub forma odlewnicza. Zgodnie z powyższym obecnie stosowane są następujące metody przetwarzania tworzyw sztucznych:

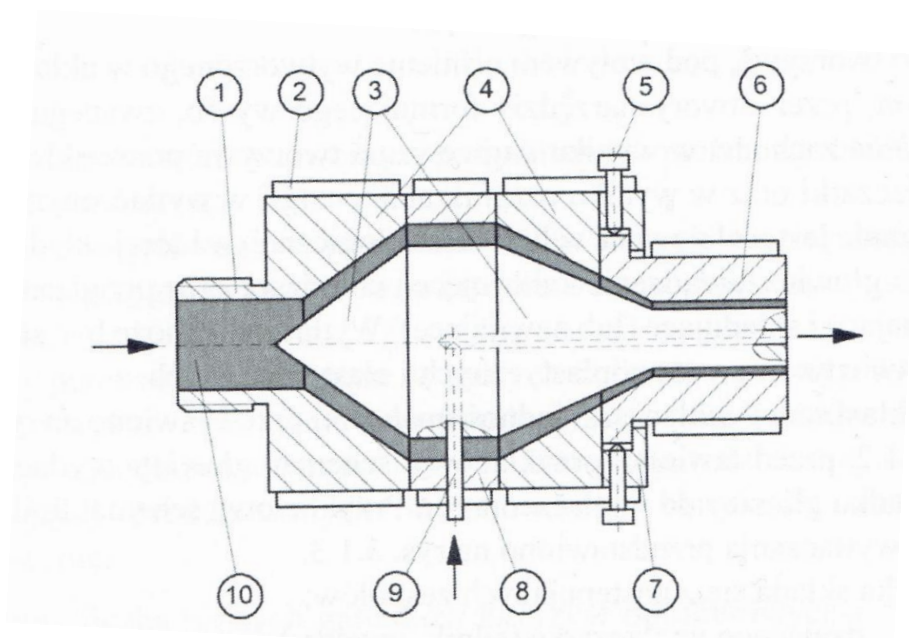
- wytłaczanie,
- wtryskiwanie,
- prasowanie: tłoczenie, przetłaczanie, formowanie płyt,
- walcowanie i kalandrowanie,
- odlewanie.

Wytłaczanie polega na ciągłym uplastycznianiu tworzywa w układzie uplastyczniającym wytłaczarki, a następnie przepychaniu tego uplastycznionego tworzywa pod wpływem ciśnienia wytworzonego w układzie uplastyczniającym przez otwory narzędzia formującego

wyrób, czyli głowicy. Uplastycznianie zachodzi na skutek nagrzewania tworzywa w układzie nagrzewającym wytłaczarki oraz w wyniku rozpraszania energii w przetłaczanym tworzywie. W skład linii technologicznej wytłaczania wchodzi wytłaczarka i głowica, a także urządzenie kalibrujące i chłodzące, a ponadto urządzenia odbierające, odcinające i składujące lub nawijające [43]. Schemat wytłaczarki przedstawiono na rys. 14, [43], natomiast głowica wytłaczarska została pokazana na rys. 15, [43].



Rys. 14. Schemat wytłaczarki [43] (1 – przekładnia, 2 – zasobnik, 3 – układ chłodzenia strefy zasilania wytłaczarki, 4 – układ nagrzewająco-chłodzący, 5 – ślimak, 6 – cylinder, 7 – głowica, 8 – wytłaczany wyrób, 9 – silnik napędowy)

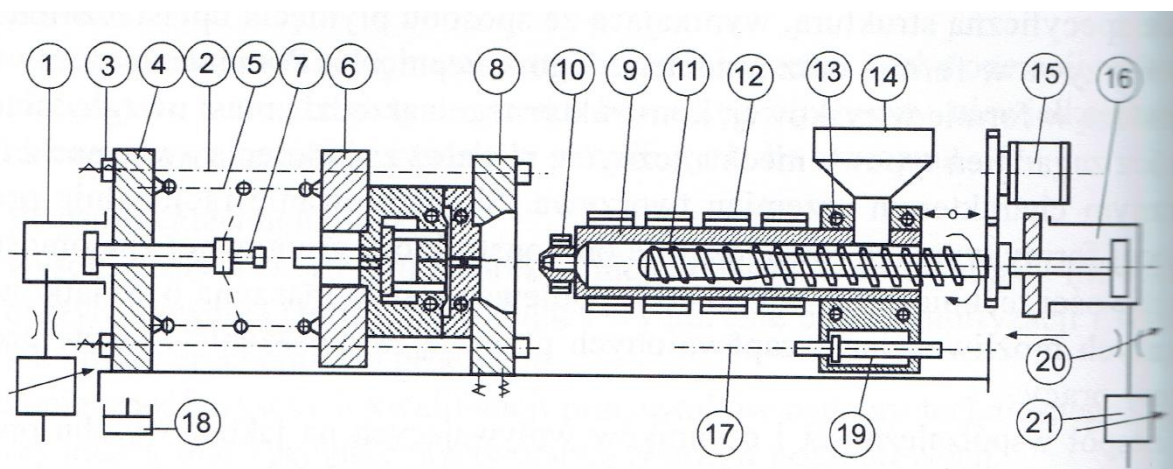


Rys. 15. Schemat przykładowej głowicy wytłaczarskiej, [43] (do wytłaczania rur) 1 – końcówka mocująca głowicę do wytłaczarki, 2 – grzejniki, 3 – rdzeń, 4 – obudowa, 5 – śruba centrująca, 6 – pierścień formujący, 7 – pierścień centrujący, 8 – wspornik rdzenia, 9 – sprężone powietrze, 10 – kanał głowicy

Współczesne wtryskarki są maszynami o skomplikowanej budowie, która jest uzależniona od rodzaju przetwarzanego tworzywa, rodzaju formy, itp. Wyróżnić można:

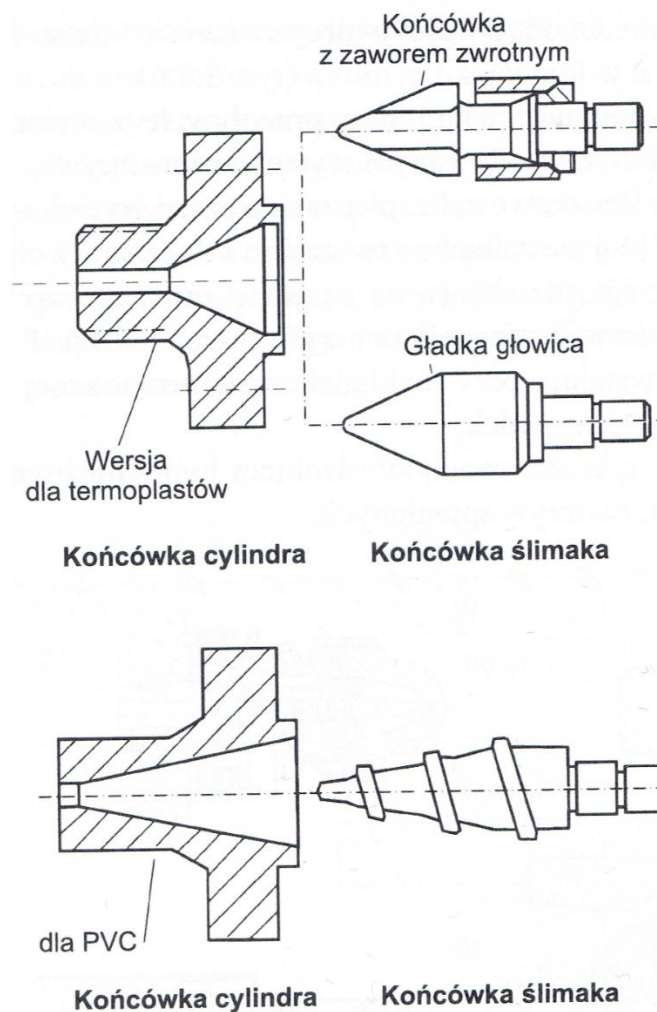
- wtryskarki tłokowe,
- wtryskarki ze wstępnym uplastycznieniem,
- wtryskarki ślimakowe,
- specjalne typy wtryskarek.

We wtryskarce pod wpływem obróbki termicznej tworzywa poddawane są plastyfikacji, po czym następuje ich wtryskiwanie do zamkniętej formy. Na koniec uformowany materiał jest chłodzony. Schemat przykładowej wtryskarki ślimakowej zaprezentowano na rys. 16, [43].



Rys. 16. Schemat konstrukcyjny wtryskarki ślimakowej, [43]: 1 – siłownik napędu stołu, 2 – kolumny prowadzące stół, 3 – nakrętki do nastawiania wysokości formy, 4 – stół tylny nieruchomy przestawny, 5 – zespół kolanowo dźwigniowy, 6 – stół ruchomy, 7 – zderzak wtryskarki, 8 – stół przedni nieruchomy, 9 – cylinder wtryskowy, 10 – dysza wtryskarki, 11 – ślimak, 12 – grzejniki, 13 – chłodzenie strefy zasypowej cylindra, 14 – lej zasypowy, 15 – silnik napędu ruchu obrotowego ślimaka, 16 – siłownik przesuwu ślimaka, 17 – prowadnice agregatu wtryskowego, 18 – zbiornik oleju układu hydraulicznego, 19 – siłownik przesuwu cylindra, 20 – dławik, 21 – regulator ciśnienia oleju układu hydraulicznego

We wtryskarkach ogrzewane tworzywo jest dozowane i przemieszczane przez tłok wtryskowy lub ślimak uplastyczniający oraz siłownik hydrauliczny, po czym trafia do formy wtryskowej, a tam przez kanał centralny, kanały doprowadzające oraz przewężkę dostaje się do gniazda formującego. Przykłady geometrii dysz stosowanych we wtryskarkach przedstawiono na rys. 17, [43].



Rys. 17. Przykłady geometrii dysz stosowanych we wtryskarkach do tworzyw termoplastycznych i twardego PVC, [43]

Przepływ tworzywa w kanale doprowadzającym powinien przebiegać tak, by zapewnić całkowite wypełnienie gniazda formującego, a tym samym uzyskać poprawną wypraskę w połączeniu z możliwie jak najmniejszym spadkiem ciśnienia i obniżeniem temperatury [45].

Przebieg uplastyczniania tworzywa jest podobny do występującego przy wytłaczaniu, przy czym ślimak obracając się, gromadzi tworzywo przed swoim czołem, a równocześnie pod wpływem ciśnienia tego tworzywa przesuwają się do tyłu. Osiągnięcie określonego miejsca drogi wycofania oznacza, że została uplastyczniona odpowiednia porcja tworzywa, po czym następuje wyłączenie obrotów ślimaka [43].

Ze względu na fakt, iż przemysł wytwarzania produktów z tworzyw sztucznych jest tak powszechnie stosowany, wielu autorów podejmowało próby udoskonalania maszyn i urządzeń wytłaczarskich oraz wtryskarek. Celem ich przedsięwzięć jest oszczędność ekonomiczna oraz poprawienie jakości wyrobów polimerowych, a także sprostanie nowym wymaganiom

stawianym wylączarkom i wtryskarkom. Rosnące wymagania związane z wydajnością procesu wtryskiwania wymuszają monitorowanie przebiegu każdego z etapów tego procesu [69]. Jednym z najważniejszych czynników, jakie należy wziąć pod uwagę, analizując efektywność procesu wylączania, jest zmiana temperatury oraz wahania ciśnienia [73]. W pracy [65] badaniu poddano efektywność wylączarki nowej generacji, w której prototypie zastosowano tuleję obrotową cylindra z rowkami, zamontowaną w układzie uplastyczniającym, a także specjalny ślimak. Stwierdzono, że wprowadzone udoskonalenia mają korzystny wpływ na efektywność procesu wylączania – jednostkowe zużycie energii doprowadzonej do prototypu wylączarki jest znacznie mniejsze w zestawieniu z tradycyjnym modelem.

Zanim wylączarki i wtryskarki osiągnęły współczesny kształt i sposób działania, podejmowano próby udoskonalenia technologii przetwórstwa polimerów. Starano się niwelować błędy związane z przepływem tworzywa sztucznego w kanałach form wtryskowych i wylączarkach, a także ulepszyć te urządzenia w celu zniwelowania relaksacji¹. W pracy [67] przeprowadzono badanie doświadczalne dotyczące zjawiska nierównomiernego wypełniania wielogniazdowych form wtryskowych uprzednio zrównoważonych geometrycznie z zastosowaniem różnych rozwiązań konstrukcyjnych kanałów doprowadzających. Stwierdzono, iż sposób wypełniania formy jest zależny od rozkładu prędkości przepływu materiału, szybkości ścinania, lepkości tworzywa i temperatury. Relacje pomiędzy tymi parametrami zależą natomiast od natężenia przepływu oraz właściwości reologicznych, termodynamicznych i warunków chłodzenia tworzywa. Zasady konstruowania układów wlewowych do form wtryskowych nie są ujednolicone, dlatego do każdego przypadku należy podejść indywidualnie z zastosowaniem symulacji komputerowych.

Badaniom poddano również aspekt wypełniania form wylączarskich oraz weryfikowano wpływ konstrukcji układu uplastyczniającego na proces wylączania. W [66] zbadano ukształtowanie powierzchni wewnętrznej tulei obrotowej cylindra. Okazało się, iż największe natężenie przepływu oraz najmniejsze jednostkowe zużycie energii uzyskano w przypadku zastosowania tulei obrotowej z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym. W pracy [57] badaniu poddano proces wypełniania gniazda formy wtryskowej. Na podstawie przeprowadzonych analiz wykazano, że sposób doprowadzenia materiału do gniazda formy wtryskowej odgrywa znaczącą rolę nie tylko podczas procesu wypełniania, ale ma również wpływ na rozkład naprężeń i skurcz oraz odkształcenia wypraski. Zróżnicowany rozkład ciśnienia i temperatury spowodowany sposobem wtryskiwania może przekładać się na

¹ Relaksacja – zmniejszenie naprężeń w czasie przy stałym odkształceniu materiału na skutek jego płynięcia [43]

nierównomierność właściwości wypraski. Na końcowe wymiary wyprasek wyraźny wpływ mają przeszkody znajdujące się w gnieździe formy wtryskowej [61]. Wyniki badań przedstawione w pracy [70] również potwierdzają, że sposób wypełniania formy wtryskowej i powstawanie wypraski wpływa na pogorszenie estetyki oraz osłabienie wypraski w miejscu niepożądanym. Z tego względu należy więc zwracać uwagę na odpowiednią długość, przekrój poprzeczny i układ kanałów formy wtryskowej podczas projektowania. Okazuje się również, że współczesne programy symulacyjne zapewniają zadowalające wyniki odwzorowujące rzeczywiste pomiary na stanowisku badawczym [68]. Ogromne znaczenie w poznaniu zjawisk towarzyszących przepływowi tworzywa w formie mają zatem nie tylko badania eksperymentalne, ale także symulacje komputerowe [58].

W pracy [56] zastosowano program Polyflow do modelowania strumienia polimeru, by zbadać efekt Barusa² dla materiału opuszczającego kanał. Badanie dotyczyło przepływu płynu nienewtonowskiego, jakim jest polimer. Przeprowadzona analiza oparta na weryfikacji rozszerzania strugi materiału w zależności od natężenia przepływu i geometrii kanału pokazała, że wyniki symulacji są w zadowalającym stopniu zgodne z eksperymentem praktycznym. Badanie pokazało także, że metodyka modelowania przy wykorzystaniu programów MES (Metoda Elementów Skończonych) może znaleźć zastosowanie do analizy przepływów nienewtonowskich w kanałach o zróżnicowanej geometrii.

Poprzeczny przepływ tworzywa w ślimakowym układzie uplastyczniającym poddano badaniu w pracy [53]. Dokonano porównania dwóch modeli kinematycznych (z obracającym się cylindrem oraz z obracającym się ślimakiem). Okazuje się, że prędkość przepływu poprzecznego polimeru oraz jej rozkład są różne w obu modelach. W pracy [54] zbadano wpływ różnych cech konstrukcyjnych ślimaków na właściwości fizykomechaniczne polipropylenu podczas wytłaczania dwuślimakowego. Wyniki pokazują, że zastosowanie segmentu ugniatającego o przeciwnym kierunku przemieszczania się tworzywa powoduje uzyskanie materiału o obniżonych właściwościach mechanicznych. Natomiast w pracy [55] zbadano wpływ konstrukcji ślimakowych układów uplastyczniających i warunków procesu wytłaczania na właściwości kompozytu polipropylenowego z napelniaczem mineralnym. Stwierdzono, iż najbardziej korzystnymi parametrami cechuje się kompozyt pochodzący z układu uplastyczniania dwuślimakowego współbieżnego, gdyż pozwala on na kontrolowanie przebiegu procesu oraz uzyskanie takiej samej historii termicznej i mechanicznej cząstek materiału. W publikacji [48] zastosowano modelowanie MES w celu weryfikacji procesu

² Efekt Barusa – spężnienie powytłoczeniowe; zjawisko polegające na zwiększeniu się średnicy strumienia cieczy nienewtonowskiej przy wylocie z głowicy wytłaczarki [72].

wytłaczania jednoślimakowego. Dzięki wykonaniu badań symulacyjnych uzyskano wyniki pozwalające na zdefiniowanie zależności wyjściowych i wejściowych modelu regresyjnego, który rozbudowuje model wytłaczania SSEM³. Okazało się, że ulepszony model SSEM może być wykorzystywany szczególnie przy modelowaniu ślimaków o złożonej geometrii, a także tam, gdzie występują przepływy nienewtonowskie. Autorzy badań [49] również wykorzystali modelowanie procesu wytłaczania, tym razem w układzie dwuślimakowym. W publikacji opracowano model matematyczny, który opisuje obszary procesu takie jak transport tworzywa, przebieg uplastyczniania oraz przepływ tworzywa już uplastycznionego. Symulacja oparta na modelu matematycznym pozwala na prognozowanie przebiegu procesu uplastyczniania, a także rozkładu ciśnienia i temperatury oraz oceny zakresu wypełnienia kanału ślimaka.

W kolejnej pracy [50] zweryfikowano badania symulacyjne i doświadczalne modelu procesu dwuślimakowego wytłaczania przeciwbieżnego z dozowanym zasilaniem. Wyniki pomiarów i obliczeń symulacyjnych były zgodne w stopniu zadowalającym. Pewne rozbieżności mogły wynikać z niedokładności danych wejściowych lub uproszczeń przyjętych w opracowanym modelu. Badania przedstawione w pracach [51, 52] także dotyczyły modelowania procesu wytłaczania na podstawie badań symulacyjno – doświadczalnych. Wynikiem tych badań jest rozkład temperatury, ciśnienia, a także stopień wypełnienia tworzywem układu uplastyczniającego oraz form wtryskowych. Badania te są prowadzone w celu analizy przepływu tworzywa sztucznego w urządzeniach do produkcji wyrobów polimerowych. Wypełnienie gniazd formy determinuje właściwości mechaniczne, stąd nierównomierna struktura wyprasek skutkuje różnicami we właściwościach gotowych wyrobów. Analizowanie sposobu wypełniania form wtryskowych w wytłaczarkach i wtryskarkach doprowadziło do wniosku, że na wypełnienie gniazd większy wpływ mają zjawiska kinetyki przepływu niż temperatura, czyli wszelkie zmiany kierunku przepływu tworzywa [59]. Szeroko stosowane symulacje oraz zbieżność wyników symulacyjnych i pomiarów wskazuje na to, że jest to odpowiednia metoda do prowadzenia badań przepływu płynów nienewtonowskich.

W układach uplastyczniających wytłaczarek stosowane są ślimaki stożkowe o zmiennym skoku i długości, które często są wykonywane w oparciu o metodę „prób i błędów”. W pracy [46] zaproponowano specjalny program komputerowy, który pozwala na określenie parametrów ślimaka (wielkość frezu oraz luzów międzyzwojowych) już na etapie projektowania ślimaków.

³ SSEM – (ang. Single Screw Extrusion Model) – Model Wytłaczania Jednoślimakowego; model komputerowy wytłaczania opracowany przez Zakład Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych Instytutu Technologii Materiałowych Politechniki Warszawskiej.

Dalej, przedmiotem badań w kontekście polimerów jest analiza zachowania się tworzyw i kompozytów polimerowych we wtryskarkach i wylączarkach oraz ocena poprawek w pomiarach reometrycznych. Wyniki badań przepływu polimerowych kompozytów drzewnych z dozowanym zasilaniem wylączarki jednoślismakowej przedstawiono w pracy [47]. Proces przeprowadzono z różnym udziałem masowym mączki drzewnej, na różnym poziomie dozowania tworzywa oraz w różnych warunkach technologicznych. Stwierdzono, iż przepływ kompozytów polimerowych w procesie wylączania z dozowanym zasilaniem przebiega odmiennie niż w procesie bez dozowania. Ponadto, uplastycznianie kompozytu jest zależne od zawartości mączki drzewnej. W pracy [62] badano ruch tworzywa w strefie tarczowej wylączarki. Przemieszczanie się cząstek w szczelinie zależy od natężenia przepływu oraz od ich położenia w pobliżu tarczy. Badanie pokazało, że sposób uprządkowania przemieszczających się cząsteczek może wpływać na strukturę nadcząsteczkową oraz właściwości użytkowe tłoczonego materiału. W badanym przypadku doszło do zwiększenia długości konformacyjnej, czyli wydłużenia łańcucha polietylenu niskiej gęstości o około 20%. Praca [60] dotyczyła oceny poprawek w pomiarach reometrycznych polietylenu ze względu na poślizg przy ścianie kanału. Badania wykonywano przy wykorzystaniu reometru wylączarkowego. Analiza polegała na ocenie zjawiska poślizgu materiału przy ścianie dyszy, a także wpływu tego przypadku na przebieg krzywych lepkości i krzywych płynięcia. Porównanie przeprowadzone dla dwóch rodzajów polietylenu wykazało, że zachodzą istotne różnice szybkości poślizgu, które wynikają ze zróżnicowania ich lepkości. Różnice lepkości każdego z polimerów, przy uwzględnieniu poślizgu przy ścianie kanału sięgały 70%. To pokazuje, jak istotna jest analiza zjawisk towarzyszących przepływowi płynów nienewtonowskich.

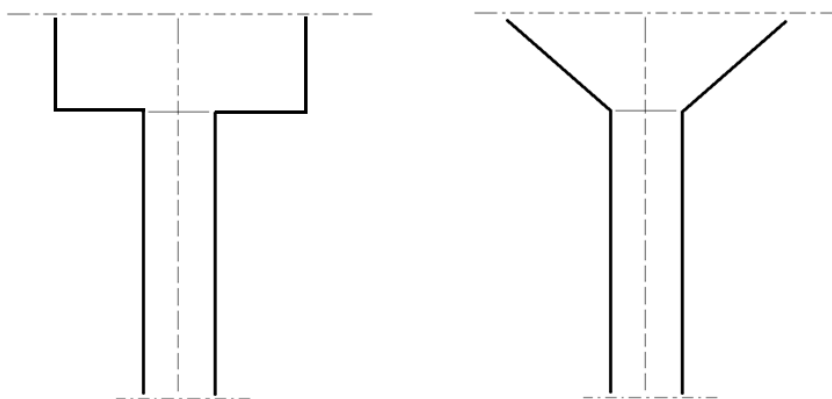
2.3.3. Energetyczne aspekty przetwórstwa tworzyw sztucznych

Zużycie energii to jeden z najważniejszych parametrów branych pod uwagę podczas projektowania i wykonywania procesów technologicznych. Efektywność energetyczna dotycząca procesów przemysłu przetwórczego to jedno z kluczowych zagadnień ostatnich lat, głównie ze względu na rosnące koszty energii oraz wpływ na środowisko. Dążenie do zmniejszenia zużycia energii w przedsiębiorstwie to nie tylko korzyści ekonomiczne, ale również wzrost efektywności środowiskowej wytwarzanych produktów – stają się bardziej EKO. W pracy [63] badano zużycie energii niezbędnej do wykonania ruchu ślimaka oraz ogrzewanie cylindra podczas procesu wtryskiwania. Stwierdzono, iż mała prędkość obrotowa

ślimaka prowadzi do zmniejszenia zużycia energii przy zachowaniu optymalnych warunków procesu wtryskiwania na stanowisku badawczym. Badanie to pokazuje, że tylko dzięki dokładnej znajomości procesu produkcyjnego, a także poznaniu wpływu parametrów procesu na zużycie energii, można ingerować w poprawę efektywności energetycznej elementów urządzenia. Ponadto, dzięki zgłębieniu zagadnień związanych z reologią przetwarzanego tworzywa można rozpoznać przyczyny zjawisk wpływających na zakłócanie przepływu tworzywa sztucznego oraz zbadać wpływ na efektywność procesu wtryskiwania [45].

W pracy [64] weryfikacji poddano efektywność procesu wytłaczania w zależności od charakterystyk zastosowanych głowic wytłaczarskich. Dysze różniły się długościami kanałów formującego i doprowadzającego a także średnicą kanału formującego. Okazało się, że wraz ze zmianą cech konstrukcyjnych dyszy głowicy wytłaczarskiej (zwiększenie średnicy kanału walcowego) zwiększało się natężenie przepływu tworzywa. Ponadto, zwiększenie średnicy kanału walcowego dyszy głowicy oraz idąca za tym zmiana cech konstrukcyjnych dyszy, powoduje zmniejszenie jednostkowego zużycia energii doprowadzanej do wytłaczarki niezależnie od prędkości ślimaka. Tym samym, zastosowanie odpowiednich dysz, powoduje zwiększenie sprawności procesu wytłaczania.

Zarówno w wytłaczarce, jak i we wtryskarce, tworzywo sztuczne przed przedostaniem się do formy, przepływa przez kanał (dyszę) o kształcie przedstawionym na rys. 18.



Rys. 18. Schematyczny kształt dysz urządzeń przetłaczających polimery

W urządzeniach służących do badania i przetwórstwa tworzyw sztucznych używa się takich kształtów, ze względu na niski poziom skomplikowania przy ich wykonaniu i powszechność produkcji. Są to proste kształty, które można odwzorować przy użyciu funkcji liniowej, opisanej równaniem:

$$F(x) = ax + b \quad (10)$$

Przepływ tworzywa w kanałach wylączarki i wtryskarki jest przepływem złożonym – występuje w nim jednocześnie ścinanie, jak i rozciąganie. Do przepływu ścinającego dochodzi podczas wypełniania gniazda formującego. Siły rozciągające działają na tworzywo w miejscach gwałtownej zmiany wymiarów kanału, którym przepływa materiał. Ponadto, gwałtowne zmniejszenie przekroju poprzecznego strumienia tworzywa przepływającego przez przewężkę powoduje, że jego odkształcenie następuje nie tylko przez ścinanie, ale i poprzez ściskanie i rozciąganie. Na skutek działania znacznych naprężeń stycznych i rozciągających w przewężce o małym przekroju poprzecznym, może również wystąpić większa degradacja mechaniczna tworzywa [45].

Modyfikacja kształtu dyszy może prowadzić do zmniejszenia oporów przepływu. Dłużej pozostające w układzie tworzywo i większe ciśnienie powoduje wzrost generowania ciepła poprzez tarcie. Ponadto, długie przebywanie w dyszy przy jednoczesnym większym ciśnieniu tworzywa może powodować degradację mechaniczną i cieplną tworzywa, co pogarsza jakość wylączyny oraz ogranicza możliwość powtórnego przetwórstwa [64].

3. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest uzyskanie zmniejszenia strat ciśnienia podczas przepływu wybranego płynu nienewtonowskiego, jakim jest polipropylen. Kanały i przewody, przez które przepływają polimery, mają zazwyczaj kształt opisany funkcją ciągłą z pierwszą pochodną oraz funkcją ciągłą, przy braku ciągłości pierwszej pochodnej w wybranych punktach, dlatego konieczne jest opracowanie zmodyfikowanego kształtu dyszy. Pozwoli to na zmniejszenie strat ciśnienia przepływającego płynu. Tezy postawione w pracy badawczej to:

- poprawa kształtu dyszy spowoduje ograniczenie zalegania płynu przepływającego przez dyszę,
- poprawa kształtu dyszy spowoduje zmniejszenie strat ciśnienia przepływającego płynu,
- kanał opisany wielomianem III stopnia wykazuje korzystniejsze parametry przepływu niż w przypadku kanału zbieżnego opisanego równaniem liniowym.

Zakres zadań realizowanych na potrzeby pracy badawczej to:

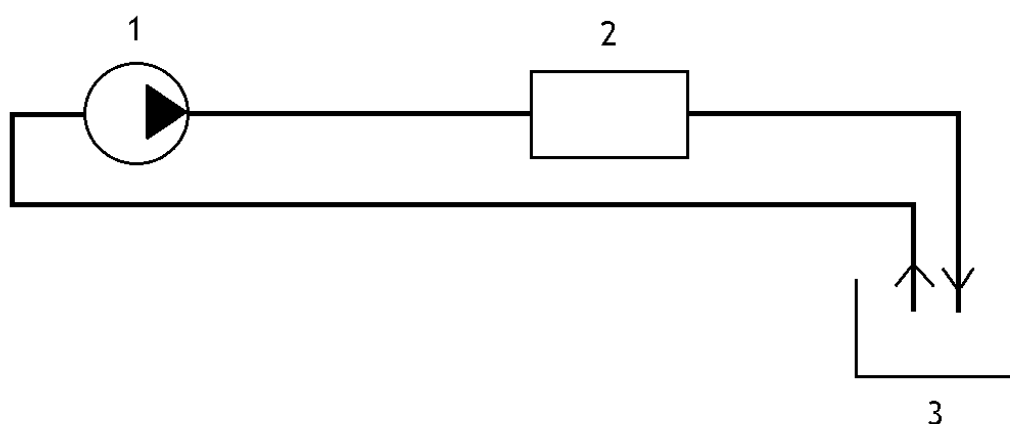
- wykonanie stanowiska do wizualizacji przepływu płynu,
- przeprowadzenie symulacji numerycznych przepływu płynu nienewtonowskiego przy przepływie przez kanał zbieżny,
- badanie zachowania się płynu nienewtonowskiego przy przepływie przez kanał opisany wielomianem III stopnia za pomocą symulacji numerycznych,
- opracowanie dysz o zmodyfikowanej geometrii, które można umieścić w reometrze,
- porównanie wyników badań symulacyjnych i wizualizacyjnych z badaniami dysz w reometrze.

Przedmiotem badań są parametry ściśle związane z przepływem cieczy nienewtonowskich, czyli ciśnienie, lepkość, temperatura, prędkość, naprężenia ścinające oraz geometria układu. Metodologia badawcza w pracy opiera się na wykorzystaniu stanowiska do wizualizacji, a także programu CFD, umożliwiającego przeprowadzenie symulacji numerycznych oraz przeprowadzenie badań eksperymentalnych na stanowisku laboratoryjnym – reometrze. Dzięki obserwacjom wizualizacji przepływu płynu możliwe będzie określenie, który z utworzonych kształtów kanału pozwala na korzystniejszy, pod kątem minimalizacji strat ciśnienia oraz energii, przepływ medium. Symulacja komputerowa przeprowadzona na nowo opracowanym kształcie dysz pozwoli na wyznaczenie strat ciśnienia dla każdego kształtu dyszy. Wykonanie pomiarów z wykorzystaniem reometru kapilarnego również pozwoli otrzymać wyniki badań

w postaci strat ciśnienia, które będzie można następnie zestawić z wynikami symulacji komputerowej.

4. Wizualizacja przepływu płynu newtonowskiego i nienewtonowskiego

Jedną z opisanych powyżej metod badawczych jest metoda wizualizacji, czyli graficzny sposób tworzenia, analizowania i przekazywania informacji przy wykorzystaniu środków wizualnych. Jako wstępną metodę analizy zjawiska zachodzącego podczas przepływu płynów nienewtonowskich wykorzystano metodę z I grupy wizualizacji, czyli wprowadzenie do strumienia płynu opiłków proszku aluminiowego. Aby skorzystać z tej metody, niezbędne było zbudowanie stanowiska badawczego. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 19.



Rys. 19. Schemat stanowiska do wizualizacji przy wykorzystaniu opiłków proszku aluminiowego (1 – pompa, 2 – sekcja badawcza, 3 – zbiornik cieczy)

Stanowisko wykonane w celu wizualizacji przepływu płynu przez kanał, w którym można modyfikować sekcję badawczą, pokazane jest na rys. 20.



Rys. 20. Stanowisko pomiarowe do wizualizacji przy wykorzystaniu opiłków proszku aluminiowego (1 – pompa, 2 – sekcja badawcza, 3 – zbiornik cieczy)

Do uzyskania przepływu płynu wykorzystana została pompa perystaltyczna. Jest to typ pompy wyporowej, w której ciecz przepychana jest przez przewód elastyczny za pomocą krzywki lub wałka przesuwającego się po przewodzie. Zaletą pompy perystaltycznej jest jej pełna szczelność, a także dokładne oczyszczanie wnętrza przewodów oraz brak podatności na uszkodzenia podczas pracy na sucho. Ponadto, pompa tego rodzaju nie musi być zalewana przed rozpoczęciem pracy. Radzi sobie ona również z płynami o dużej lepkości oraz substancjami zawierającymi ciała stałe, przy czym nie narusza ich struktury. Do najpoważniejszych wad pomp perystaltycznych należy niewielki czas pomiędzy wymianami przewodu roboczego.

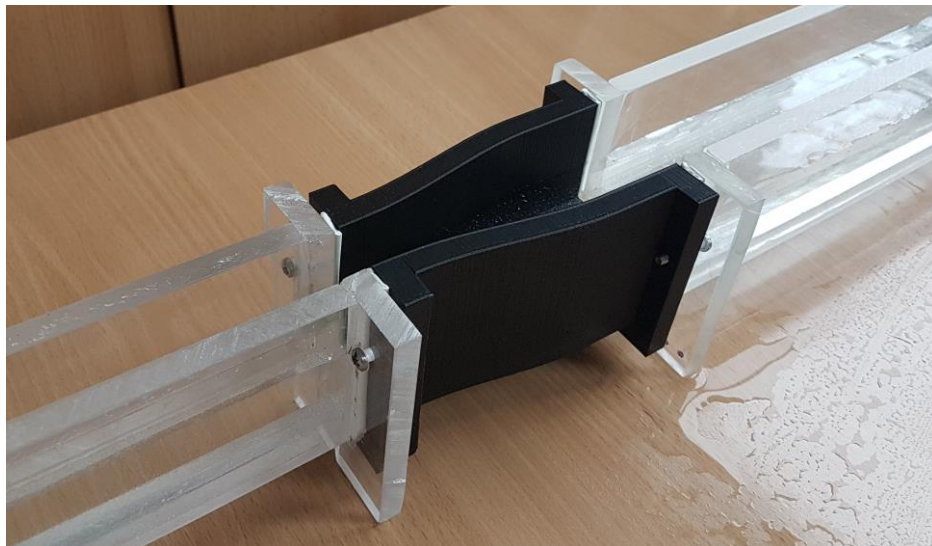
Oprócz pompy, stanowisko zawiera także przewody o przekroju kołowym wykonane z PCV oraz prostokątnym, sekcję badawczą, w której umieszcza się kanały o różnych kształtach, a także zbiornik cieczy. Modele kanałów umieszczane są w sekcji badawczej, która została utworzona ze szkła akrylowego, natomiast modele zostały utworzone przy użyciu drukarki 3D z filamentu PLA – jest to najbardziej popularny (biodegradowalny), wytwarzany z odnawialnych surowców naturalnych, termoplastyczny poliester, który znalazł zastosowanie w większości drukarek 3D typu FFF lub FDM. Każdy z modeli cechuje się takimi samymi wymiarami sekcji wlotowej i wylotowej. Różnią się natomiast geometrią wewnętrzną oraz długością. Kształty tych kanałów pokazane są na rys. 21.



Rys. 21. Kształty kanałów - elementy wymienne

Modele nr 1 oraz 2 opisane są geometrią wielomianu trzeciego stopnia, przy czym model nr 2 jest wydłużony względem modelu nr 1. Model nr 3 cechuje się nieregularnym kształtem

kanału zbieżnego opisanego równaniem liniowym . Modele 4 oraz 5 opisane są przy wykorzystaniu braku ciągłości I pochodnej i tak jak w przypadku pierwszych dwóch modeli, model nr 4 jest wydłużony w stosunku modelu nr 5. Elementy wymienne (modele badawcze) są montowane w sekcji badawczej w sposób zaprezentowany na rys. 22.



Rys. 22. Montaż elementu wymiennego na stanowisku

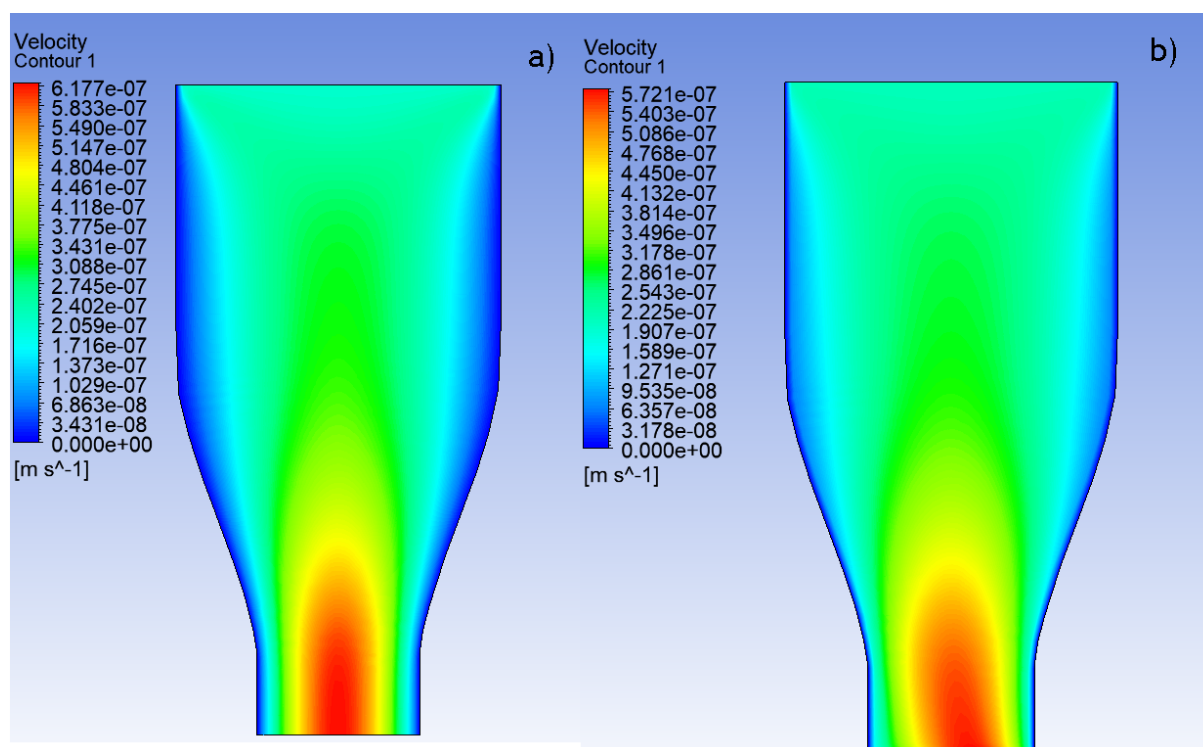
Po umieszczeniu odpowiedniego modelu w sekcji badawczej, a następnie napełnieniu kanałów wodą, na jej powierzchni umieszczono aluminiowy proszek. Badanie to miało na celu wskazanie sekcji zastoju płynu oraz wirów, a także wskazanie, który z utworzonych modeli cechuje się najlepszym przepływem ze względu na te kryteria.



Rys. 23. Wynik badania modelu nr 1

Badanie wizualizacyjne uzupełniono o symulację komputerową przeprowadzoną dla wody oraz płynu nienewtonowskiego – wodnego roztworu karboksymetylocelulozy. Jest to zmodyfikowana chemicznie celuloza stosowana w przemyśle spożywczym, a także jako płyn modelowy do przeprowadzania badań przepływowych płynów nienewtonowskich [88]. Przepływ płynu wraz z opiłkami dla modelu nr 1 pokazano na rys. 23.

W modelu nr 1 opiłki metalu rozkładają się na powierzchni wody w sposób równomierny. Dochodzi również do „rozciągnięcia” układu cząsteczek w sekcji wylotowej, co może w przypadku niektórych materiałów (takich jak polimery) prowadzić do ich degradacji poprzez zrywanie łańcuchów. Na rys. 24 przedstawione zostały rozkłady prędkości, otrzymane z symulacji komputerowej dla strumienia masy $\dot{m} = 0,5 \text{ kg/s}$ oraz parametrów charakterystycznych dla wody i wodnego roztworu karboksymetylocelulozy.



Rys. 24. Symulacja komputerowa przepływu wody (a) i płynu nienewtonowskiego (b) dla modelu nr 1

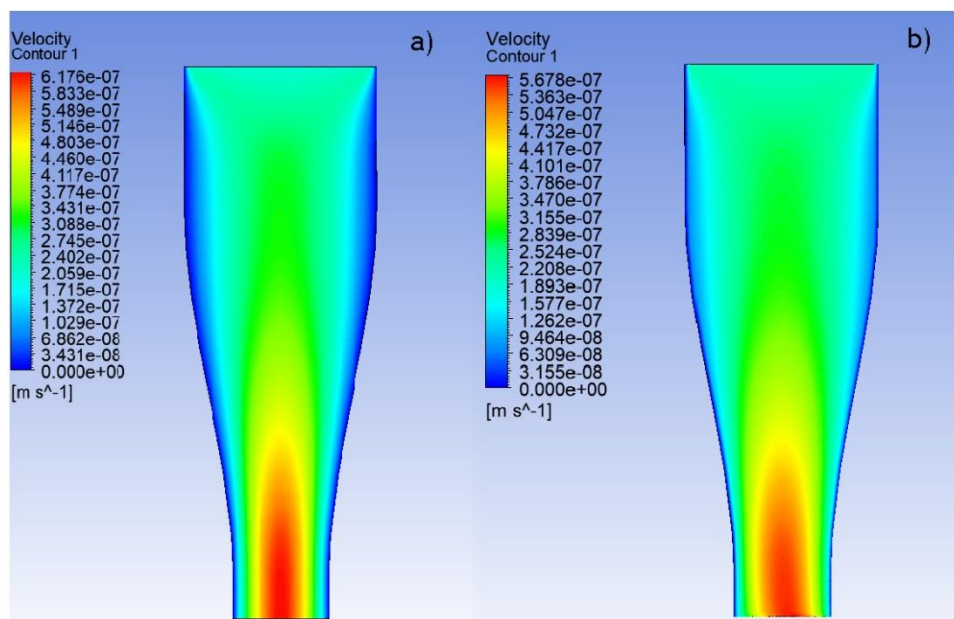
Można zauważyć, iż strefa przysięcienna dla przepływu wody jest większa niż w przypadku przepływu płynu nienewtonowskiego. Dla wodnego roztworu karboksymetylocelulozy występuje mniejsza strefa zastoju w zestawieniu z wodą. Ponadto, widoczne przy ujściu kanału przyspieszenie może prowadzić do degradacji poprzez zrywanie łańcuchów cząstek.

Przepływ płynu wraz z opiłkami w modelu nr 2 pokazano na rys. 25.



Rys. 25. Wynik badania modelu nr 2

Powyższy model również charakteryzuje się równomiernym wypełnieniem kanału przez opilki aluminium. Wydłużenie sekcji badawczej sprawiło natomiast, że nie jest zauważalne nagłe rozciągnięcie cząsteczek – może to przyczynić się do zminimalizowania zjawiska degradacji. Model nr 2, w stosunku do modelu nr 1, posiada wydłużoną sekcję, co w zauważalny sposób wpłynęło na możliwość przemieszczania się płynu wzdłuż kanału. Dla modelu nr 2 również wykonana została symulacja komputerowa, z której rozkłady prędkości przedstawiono na rys. 26.



Rys. 26. Symulacja komputerowa przepływu wody (a) i płynu nienewtonowskiego (b) dla modelu nr 2

Podobnie jak w przypadku poprzedniego modelu, strefa przyścienna dla wody jest większa niż dla roztworu płynu nienewtonowskiego. Oznacza to większą strefę zastoju dla wody. W tym modelu widoczne jest również przyspieszenie cząstek, jednakże maksymalne wartości prędkości są mniejsze w zestawieniu z modelem nr 1. Oznacza to, że wydłużenie kanału powoduje zmniejszenie maksymalnej wartości profilu prędkości na wylocie.

Przepływ płynu wraz z opiłkami dla modelu nr 3 pokazano na rys. 27.



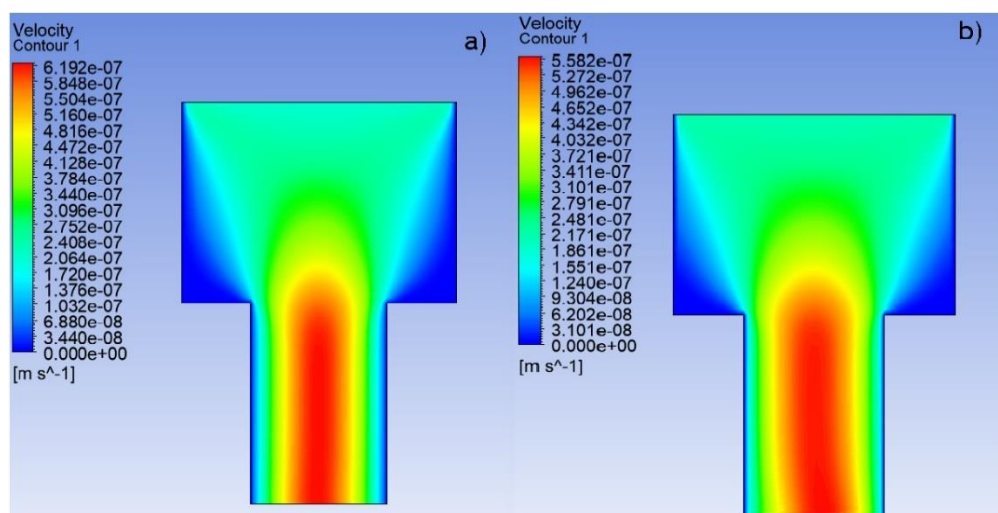
Rys. 27. Wynik badania modelu nr 3 (1)

Kształt modelu zaprezentowanego na rysunku powyżej można obecnie spotkać w przedsiębiorstwach wielu gałęzi przemysłu ze względu na prostotę wykonania (instalacje wodociągowe, kanalizacyjne, gazociągowe, itp.). Jak widać, model ten nie jest równomiernie wypełniony opiłkami metalu podczas przepływu płynu – istnieją obszary (w pobliżu ścian kanału i w miejscu redukcji średnicy), w których wypełnienie proszkiem aluminiowym nie było możliwe (rys. 28).



Rys. 28. Wynik badania modelu nr 3 (2)

Na rysunku powyżej zaprezentowano obszar, w którym dochodzi do zastoju płynu spowodowanego napotkaniem przeszkody. Jest to zjawisko niepożądane, gdyż materiał pozostający w tym miejscu nie przepływa przez dyszę, co powoduje spadek wydajności procesu. Na rys. 29 przedstawiono wyniki symulacji dla modelu nr 3.



Rys. 29. Symulacja komputerowa przepływu wody (a) i płynu nienewtonowskiego (b) dla modelu nr 3

Wyniki symulacji potwierdzają badanie wizualizacyjne. Dla obu płynów widoczna jest wyraźna strefa, w której płyn zatrzymuje się. Podobnie jak w przypadku poprzednich modeli,

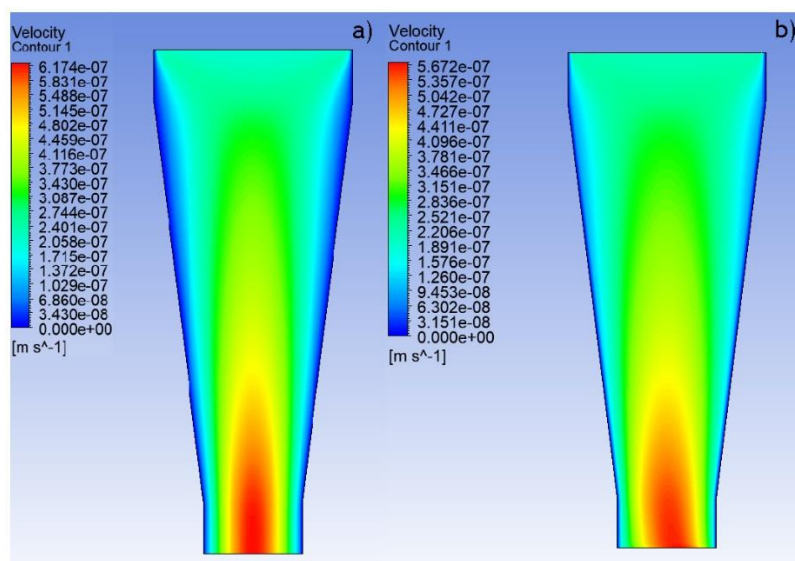
przepływ płynu nienewtonowskiego charakteryzuje się mniejszą strefą przyścienną w zestawieniu z przepływem wody. Prędkość płynu nienewtonowskiego przy ujściu kanału jest mniejsza niż prędkość wody przy zastosowaniu tych samych parametrów wejściowych.

Przepływ płynu wraz z opiłkami w modelu nr 4 pokazano na rys. 30



Rys. 30. Wynik badania modelu nr 4

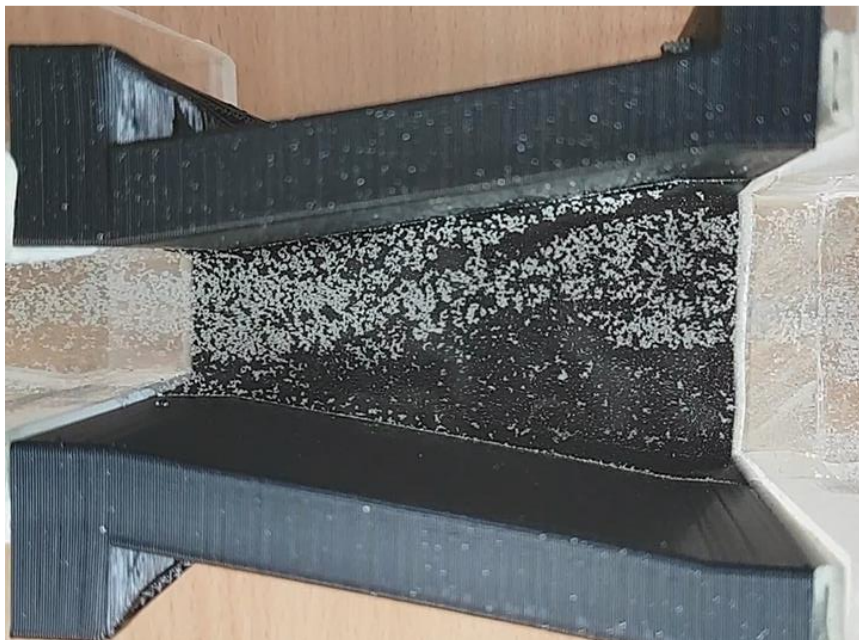
Powyższy kształt modelu pozwala na równomierne wypełnienie materiałem przestrzeni między ścianami kanału. Jednakże tuż przed zakończeniem dyszy istnieje „ostre” zakończenie (redukcja średnicy kanału jest mniej „opływowa” niż w przypadku modelu 1 i 2), co może powodować wiry i odkładanie się materiału przy ścianie kanału. Na rys. 31 przedstawiono wyniki symulacji (rozkłady prędkości) dla modelu nr 4.



Rys. 31. Symulacja komputerowa przepływu wody (a) i płynu nienewtonowskiego (b) dla modelu nr 4

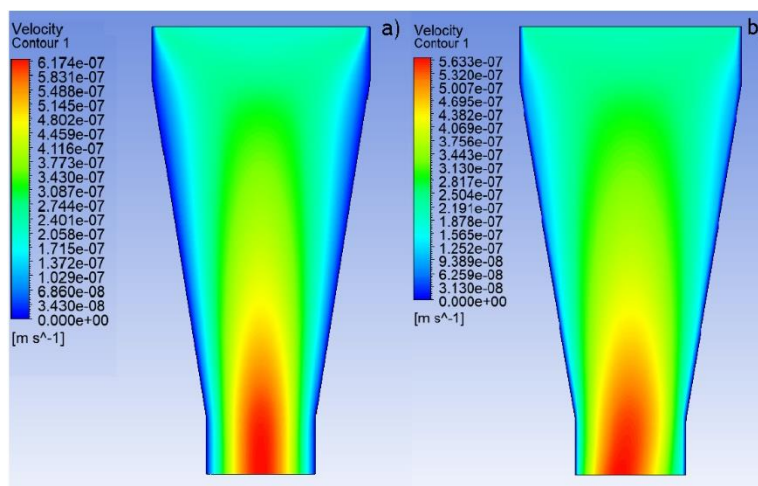
Wyniki symulacji pokazują, że dla płynu nienewtonowskiego strefa przyścienna jest mniejsza niż w przypadku wody. Skutkuje to zastojem jedynie niewielkiej ilości przepływającego płynu.

Przepływ płynu wraz z opiłkami w modelu nr 5 pokazano na rys. 32.



Rys. 32. Wynik badania modelu nr 5

Powyższy model nie jest wypełniony tak równomiernie jak ma to miejsce w przypadku modelu nr 4, co może mieć związek z niewielkimi wirami powodowanymi poprzez wlot do sekcji badawczej. W tym modelu również mogą pojawiać się wiry przy ujściu, przez co może dochodzić do odkładania się materiału przy ścianie kanału. Ponadto, brak w tym modelu wydłużenia sekcji pomiarowej, co skutkuje oddziaływaniem gwałtownej zmiany ciśnienia na materiał – możliwe wystąpienie degradacji. Na rys. 33 przedstawiono wyniki symulacji dla modelu nr 5.



Rys. 33. Symulacja komputerowa przepływu wody (a) i płynu nienewtonowskiego (b) dla modelu nr 5

Porównując przepływ wody oraz płynu nienewtonowskiego w modelu nr 5, ponownie można zauważyć, iż strefa przyścienna podczas przepływu wody jest większa w zestawieniu z wodnym roztworem karboksymetylocelulozy. Przepływ płynu nienewtonowskiego charakteryzuje się mniejszymi osiąganymi prędkościami maksymalnymi, przez co ryzyko degradacji w tym przypadku jest mniejsze.

Ze względu na to, że model nr 3 cechował się najsłabszymi ze względu na charakter przepływu parametrami (model przedstawiony jako kanał zbieżny opisany równaniem liniowym; brak wypełnienia opiłkami metalu całego obszaru sekcji badawczej, przeszkoda w postaci ściany, zastój materiału), postanowiono nie poddawać go dalszym badaniom w kierunku zmniejszenia strat ciśnienia.

Doświadczenie wizualizacyjne przeprowadzone z modelami nr 1, 2, 4 oraz 5 pokazało, że linie prądu w przypadku kształtu kanału opisanego wielomianem trzeciego stopnia wypełniają obszar sekcji badawczej w sposób podobny, jak ma to miejsce w modelach, gdzie styczne przejście nie jest zachowane. Jednakże zastosowanie płynu innego niż woda spowodowało, że modele wypełniane są płynem w nieco inny sposób, co zostało pokazane w badaniu symulacyjnym. Wodny roztwór karboksymetylocelulozy, w odróżnieniu od wody, jest płynem nienewtonowskim, przez co charakter przepływu uległ zmianie. Może się więc okazać, iż w przypadku innych płynów nienewtonowskich opracowanie nowego kształtu geometrii kanału spowoduje jeszcze bardziej korzystne wypełnienie formy. Na podstawie pierwszej części badawczej, jaką była wizualizacja, postanowiono o realizacji dalszych badań wykonanych za pośrednictwem symulacji numerycznej w taki sposób, by jej wyniki mogły być odniesione do pomiarów rzeczywistych na stanowisku laboratoryjnym. Wyniki dalszych badań przedstawione zostaną w kolejnych rozdziałach.

5. Symulacje numeryczne przy użyciu CFD

5.1. Środowisko CFD – charakterystyka

Jak już wcześniej wspomniano, do badania przepływów nienewtonowskich takich jak polimery czy krew, wykorzystuje się eksperymenty na stanowiskach pomiarowych, badania wizualizacyjne, ale także symulacje numeryczne.

Numeryczna mechanika płynów (CFD – ang. Computational Fluid Dynamics, Obliczeniowa Mechanika Płynów) to narzędzie stosowane do kreowania i rozwiązywania matematycznych modeli procesów, które oparte są na równaniach zachowania masy, pędu, i energii [74]. Równania pędu w mechanice płynów są to równania Naviera-Stokesa. Równania te w połączeniu z równaniem ciągłości pozwalają na wyznaczenie pola prędkości oraz ciśnienia bez wymiany ciepła. Dołączenie do nich równania energii pozwala dodatkowo wyznaczyć rozkład temperatury w przepływającym płynie. Jednak złożoność ruchu cząsteczek płynu powoduje, że rozwiązanie tych równań nie daje prawidłowych wyników, ze względu na możliwości obliczeniowe współczesnych komputerów. Aby to było możliwe, dyskretyzacja obszaru płynnego powinna być rzędu skali Kołmogorowa (skala najmniejszych wirów). Dołączenie do wspomnianego układu równań modeli turbulencji pozwala na rozwiązanie zagadnień mechaniki płynów. W obliczeniach numerycznych, rozwiązuje się układy równań, stąd konieczność dyskretyzacji równań różniczkowych. W tym celu stosuje się metodę objętości skończonych, która pozwala na zachowanie bilansów masy, pędu i energii w elementach objętości. Tej własności nie ma metoda elementów skończonych, stąd w mechanice płynów nie jest obecnie powszechnie stosowana.

Aby uzyskać jednoznaczne rozwiązanie, należy podać warunki brzegowe, warunek początkowy (dla przepływów niestacjonarnych) oraz właściwości fizyczne rozpatrywanego płynu [71].

Do przeprowadzenia symulacji numerycznej wykorzystano środowisko ANSYS Fluent, które jest powszechnie stosowane w obliczeniach inżynierskich. Producent tego oprogramowania, firma Ansys Inc., jest obecnie największym producentem oprogramowania do tego typu obliczeń [75]. Program Ansys stosowany jest w szczególności do:

- analizy stateczności konstrukcji,
- testowania sterowników,
- analizy pól naprężenia i przemieszczenia,

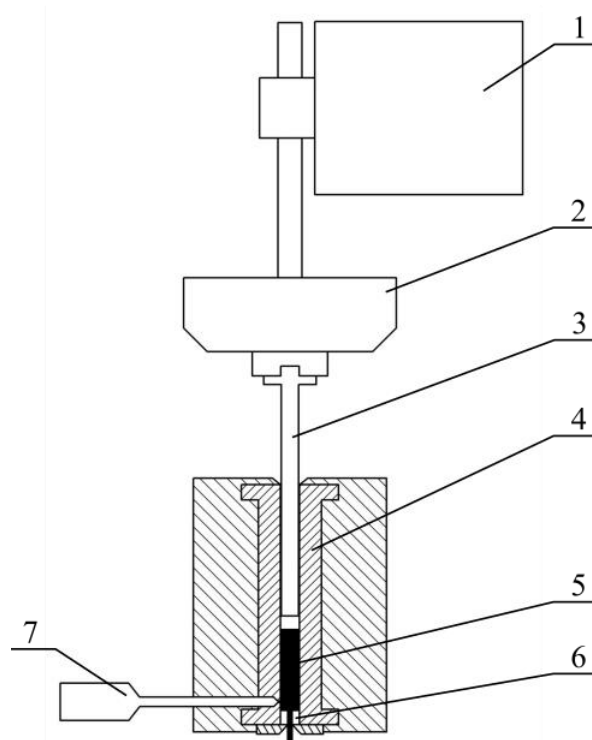
- analiz zmęczenia, analiz zmęczenia, analiz zmęczenia,
- analizy wytwarzania i przetwórstwa,
- wymiany ciepła,
- analizy przepływu płynów,
- analiz elektrycznych, elektromagnetycznych i magnetycznych,
- analiz akustycznych,
- analizy dyfuzji,
- testowania silników spalinowych,
- analizy pływów,
- analiz mechatronicznych,
- analiz urządzeń wirnikowych,
- analiz niezawodnościowych,
- innych analiz (optymalizacja, analiza pól sprzężonych, symulacje oblodzenia, itd.)

W celu zweryfikowania eksperymentu wykonanego przy użyciu metody wizualizacyjnej, postanowiono posłużyć się programem Ansys Fluent przeznaczonego do modelowania przepływu płynów. Celem weryfikacji jest potwierdzenie oraz uzyskanie bardziej precyzyjnych danych dotyczących przepływu płynu przez kanał zbieżny. Wyniki doświadczenia wizualizacyjnego oraz symulacji komputerowej zostaną następnie porównane z wynikami pomiarów uzyskanych za pomocą reometru kapilarnego.

5.2. Geometria modelu badawczego

Aby móc odnieść wyniki badania symulacyjnego do badania na stanowisku laboratoryjnym, niezbędne jest zastosowanie zbliżonych parametrów wejściowych. W tym celu dobrana została geometria kanału, przez który będzie przepływał płyn nienewtonowski o znanych właściwościach fizycznych.

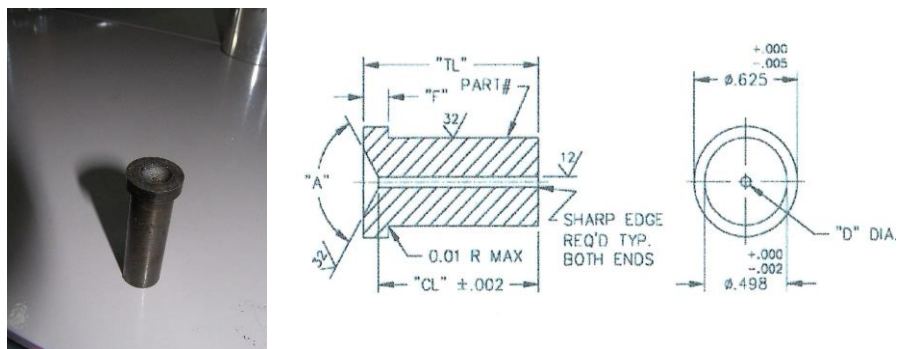
Do badań eksperymentalnych użyty został reometr kapilarny, którego schemat przedstawiony na rys. 34. Badania te pozwolą na weryfikację wyników symulacji numerycznej z wynikami eksperymentalnymi.



Rys. 34. Schemat budowy reometru kapilarnego: 1 – mechanizm zapewniający określony posuw tłoka, 2 – czujnik nacisku, 3 – tłok, 4 – termostatowany cylinder, 5 – uplastycznione tworzywo polimerowe, 6 – kapilara pomiarowa, 7 – czujnik ciśnienia, [77]

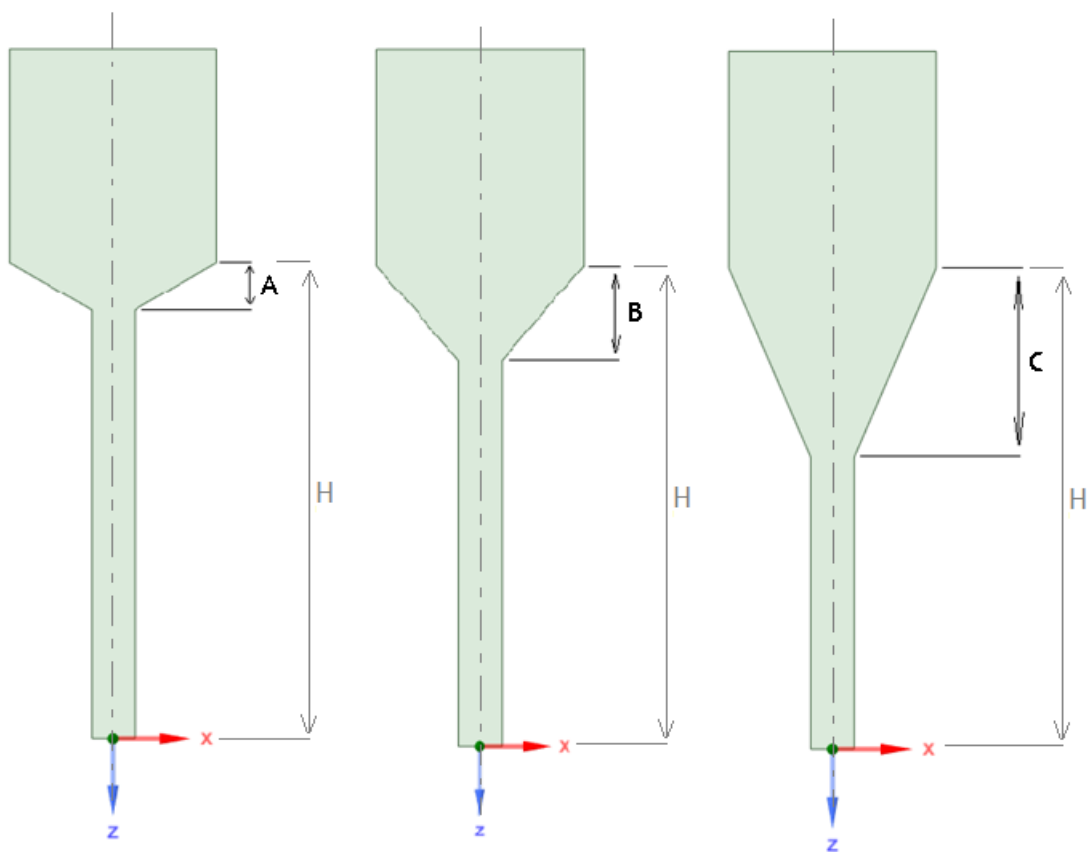
Reometr to urządzenie służące do pomiaru właściwości reologicznych materiałów. Dzięki niemu możliwe jest wyznaczanie charakterystyki reologicznej stopionych polimerowych tworzyw sztucznych (termoplastyczne tworzywa sztuczne takie jak: kompozyty, recyklaty, pasty ceramiczne, itp.) podczas izotermicznego przepływu przez kapilarę. W wyniku badania otrzymuje się takie parametry jak lepkość, prędkość ścinania, a także czas i temperaturę degradacji. Badania w reometrze kapilarnym wykonuje się w celu kontroli jakości materiałów, optymalizacji procesów wytłaczania, rozdmuchu, wtrysku oraz termoformowania, a także w celach badawczo – rozwojowych. Reometr pozwala na badanie lepkości polimerów w wysokiej temperaturze sięgającej 500°C oraz przy zastosowaniu dużej prędkości ścinania. Badanie polega na wypychaniu za pomocą tłoka próbki umieszczonej w cylindrze przez kapilarę o określonej średnicy. Podczas przesuwu próbki zdejmowany jest pomiar siły działającej na tłok oraz ciśnienie w cylindrze.

Jednym z istotnych detali reometru jest kapilara pomiarowa (element nr 6 przedstawiony na rys. 34). Jest to niewielki element wymienny stanowiska badawczego. Pomiary wykonywane są przy zastosowaniu kapilar pomiarowych różnych długości oraz o różnym kształcie sekcji wlotowej. Dane techniczne przykładowej kapilary przedstawiono na rys. 30.



Rys. 35. Kapilara pomiarowa, [76]

Kapilara przedstawiona na rys. 35 przybiera kształt kanału zbieżnego (opisanego równaniem liniowym). Na wzór wybranej kapilary odwzorowano jej geometrię w programie do symulacji. Oprócz wybranego kształtu kapilary, utworzono na jej podstawie także dwa inne modele, w których wydłużono sekcję pomiarową tak, jak to pokazano na rys. 36.

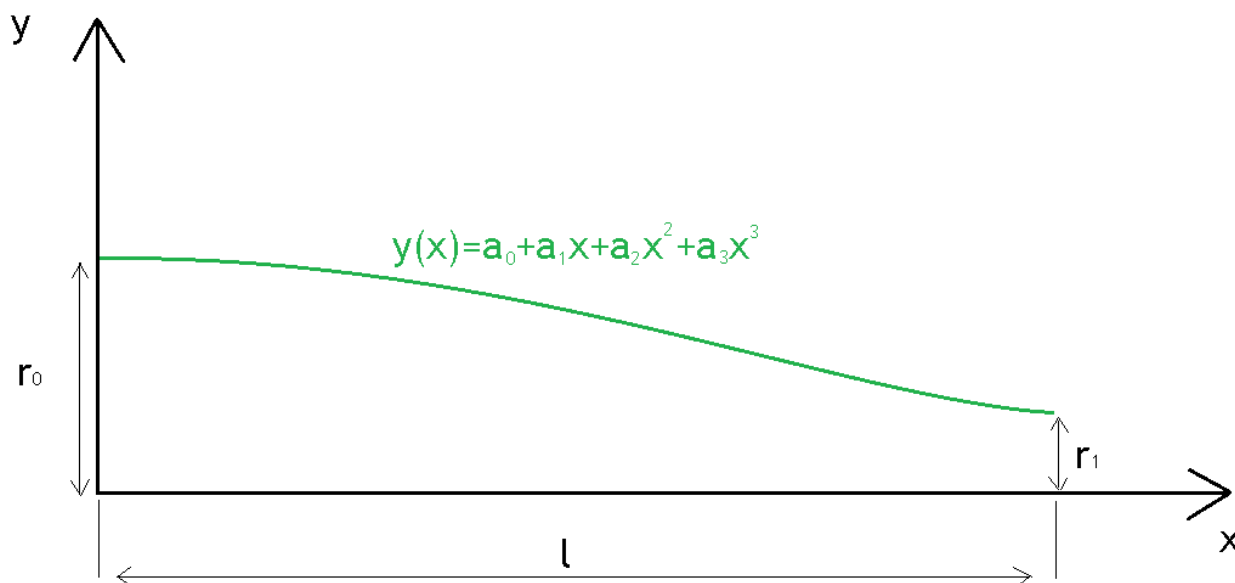


Rys. 36. Geometria kanału zbieżnego – wydłużenie części wlotowej ($A = 2,18$ mm, $B = 4,36$ mm, $C = 8,72$ mm, $H = 22,18$ mm).

Wymiary A, B, oraz C zamieszczone w opisie rysunku związane są z wydłużeniem sekcji dyszy, w której dochodzi do zmiany średnicy. Wymiar „A” będzie dotyczył wymiaru bazowego

bez wydłużenia kapilary, wymiar „B” oznacza dwukrotne wydłużenie kanału, natomiast wymiar „C” oznaczać będzie czterokrotne wydłużenie sekcji bazowej dyszy.

W celu uniknięcia ostrych zakrzywień w geometrii kanału, należy zastosować jak najbardziej płynne przejście ze średnicy o wymiarze 9,55 mm do 2 mm. W tym celu zastosowano równanie krzywej opisanej wielomianem trzeciego stopnia, rys. 37, co umożliwi styczne wejście i wyjście z kanału o wymiarach opisanych powyżej.



Rys. 37. Funkcja opisująca geometrię kanału

Wielomian do aproksymacji kształtu dyszy jest postaci:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (11)$$

Współczynniki funkcji dobierane są z warunku gładkiego połączenia części o niezmienionej średnicy z częścią poszerzoną:

$$x = 0: y(0) = r_0 = a_0 \quad (12)$$

$$x = l: y(l) = a_0 + a_1l + a_2l^2 + a_3l^3 \quad (13)$$

oraz równości stycznych:

$$x = 0: y'(0) = a_1 = 0 \quad (14)$$

$$x = l: y'(l) = a_1 + 2a_2l + 3a_3l^2 = 0 \quad (15)$$

Danymi niezbędnymi do określenia wartości współczynników wielomianu są wartości promieni przekrojów dyszy na wlocie (r_0) i wylocie (r_1) oraz długość dyszy (l). Aby wyznaczyć współczynniki wielomianu, wymagane jest rozwiązanie układu równań:

$$y(l): r_0 + 0 \cdot l + a_2 l^2 + a_3 l^3 = r_1 \quad (16)$$

$$y'(l): 0 + 2a_2 l + 3a_3 l^2 = 0 \quad (17)$$

W konsekwencji dla wybranej geometrii dyszy:

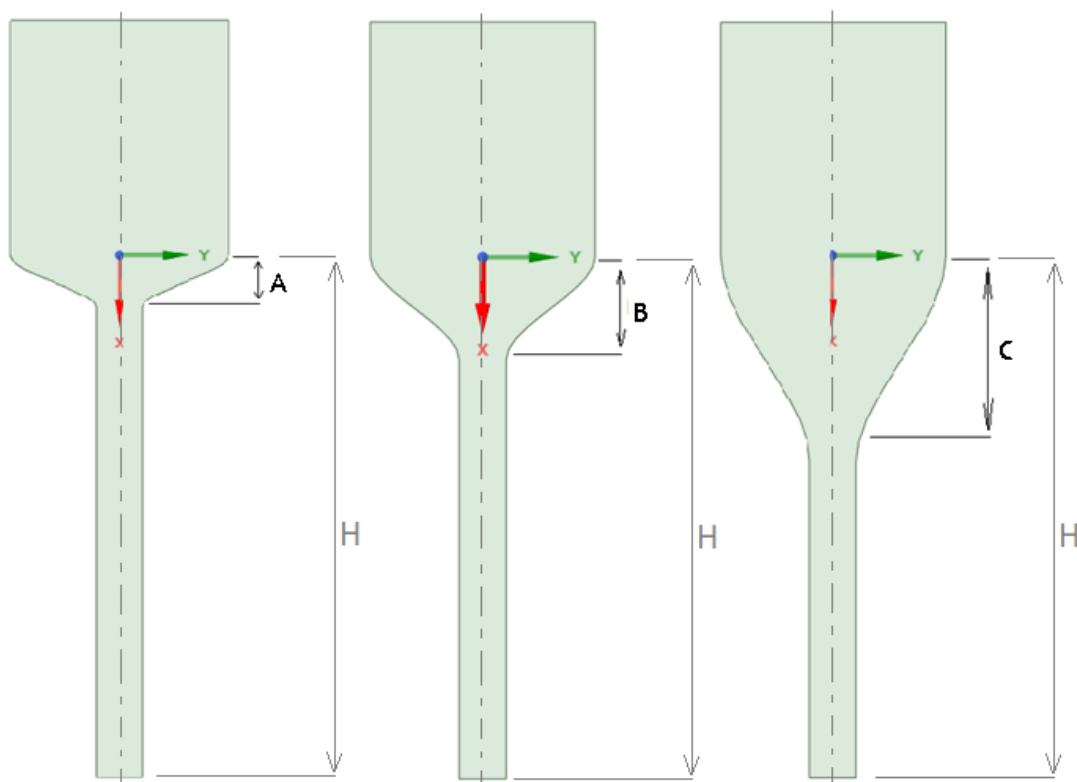
$$a_0 = r_0 \quad (18)$$

$$a_1 = 0 \quad (19)$$

$$a_2 = -\frac{3}{2}a_3 l \quad (20)$$

$$a_3 = -2 \frac{r_1 - r_0}{l^3} \quad (21)$$

$$y(x) = r_0 - \frac{3}{2}a_3 l x^2 - 2 \frac{r_1 - r_0}{l^3} x^3 \quad (22)$$



Rys. 38. Geometria kanału przejściowego opisanego wielomianem trzeciego stopnia – wydłużenie części wlotowej (A = 2,18 mm, B = 4,36 mm, C = 8,72 mm, H=22,18 mm).

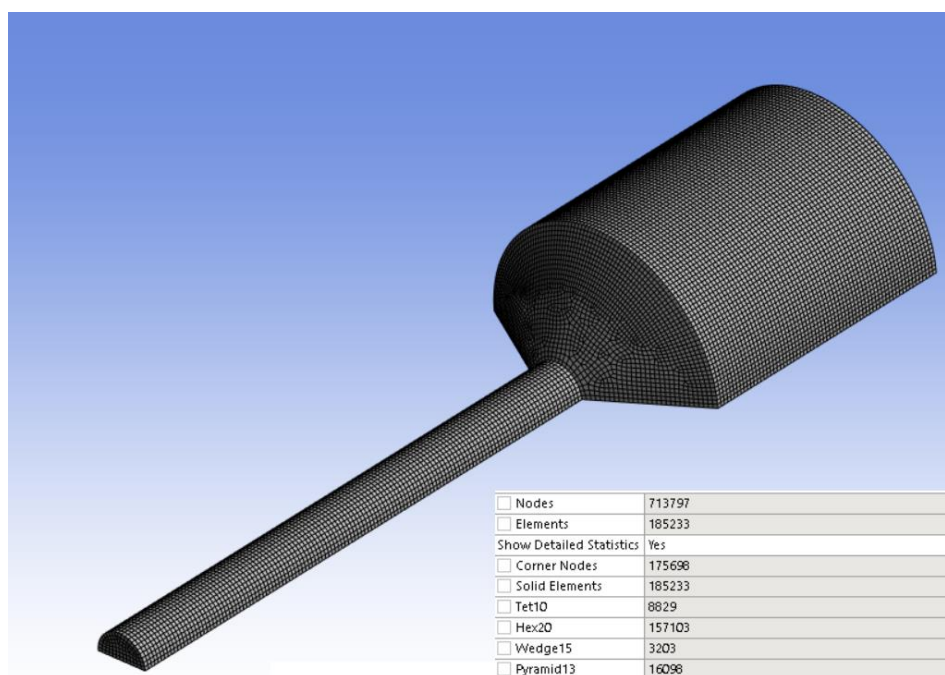
Długości części wlotowej, jakie przyjęto do badań, to 2,18 mm, 4,36 mm oraz 8,72 mm, przy jednoczesnym zachowaniu stałej wartości długości kanału H=22,18 mm, rys. 38. Wydłużenie zastosowano dla kanału zbieżnego oraz kanału opisanego wielomianem stopnia trzeciego. Wydłużona została również część wlotowa (wlot kanału do sekcji pomiarowej),

jednak bez zwiększania całkowitej długości elementu wymiennego. Kanał na wlocie do sekcji pomiarowej został przedłużony, by zapobiec zakłóceniom przepływu spowodowanych wlotem do badanej sekcji.

5.3. Tworzenie siatki elementów objętościowych

Kolejnym krokiem, jaki należy podjąć w programie, jest utworzenie siatki elementów objętościowych (ang. meshing). Dla każdego z modeli zastosowano siatkę, w której dominują elementy prostopadłościenne uzupełnione o elementy klinowe w obszarze dyskretyzacji.

Siatkę zastosowaną dla poszczególnych modeli oraz informacje dotyczące jej jakości przedstawiono na rysunkach 39 – 46.

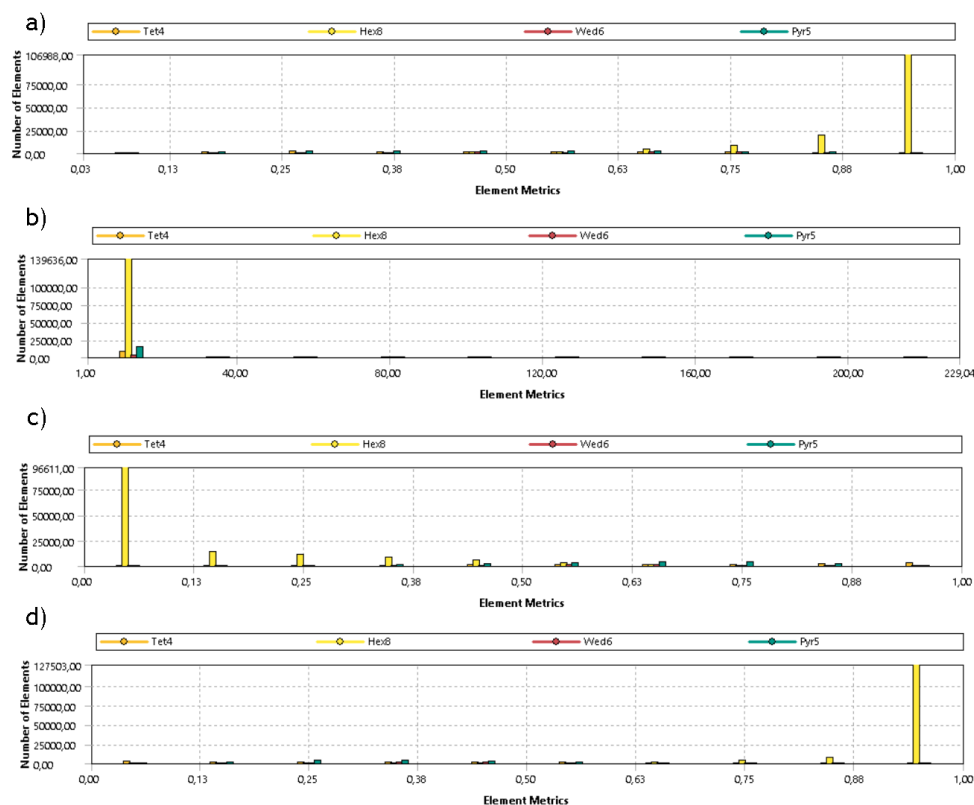


Rys. 39. Siatka elementów objętościowych - kanał zbieżny A

Siatka elementów objętościowych, pokazana na rys, 39, składa się z 185 233 elementów, w tym 8 829 czworościennych, 157 103 sześciościennych, 3 203 klinowych i 16 096 piramidialnych.

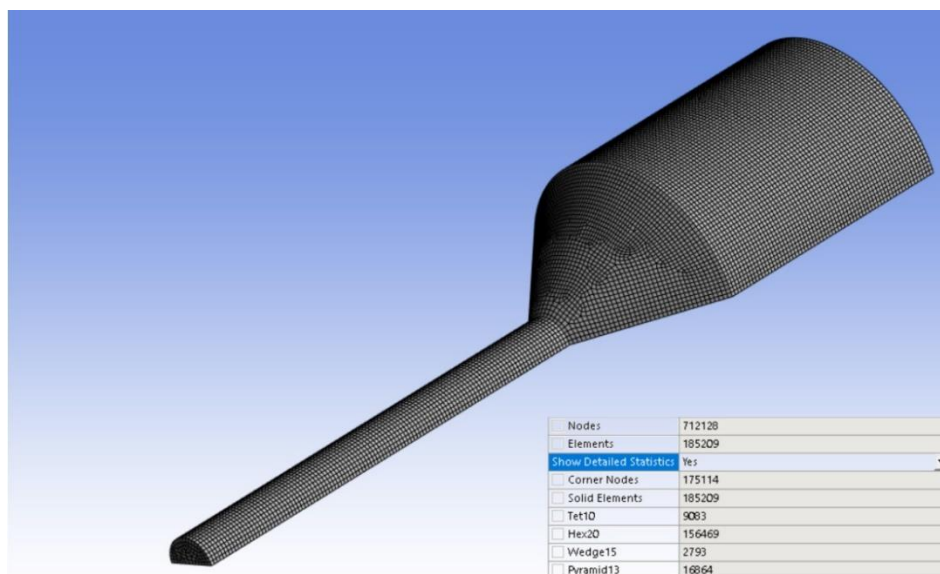
Parametry takie jak jakość elementu (ang. element quality), współczynnik kształtu (ang. aspect ratio), skośność (ang. skewness) oraz ortogonalność (ang. orthogonality) decydują o jakości siatki. Najgorsze jakościowo elementy posiadają wartość współczynnika jakości elementu wynoszącą 0, natomiast najlepsze osiągają wartość 1. Współczynnik kształtu powinien oscylować w pobliżu wartości 1, oznaczającej idealną geometrię. Skośność to natomiast narzędzie wskazujące, w jakim stopniu wygenerowana siatka jest zbliżona do ideału. Wartość 0 parametru skośności będzie oznaczała komórkę najlepszą, natomiast wartość 1,

komórkę o najgorszej jakości. Ostatni z parametrów – ortogonalność – powinien oscylować w pobliżu wartości 1. Wartości bliskie zero będą oznaczały kiepską jakość ortogonalną. Na rys. 40 przedstawiono parametry decydujące o jakości siatki dla kanału zbieżnego opisanego wymiarem charakterystycznym „A”.



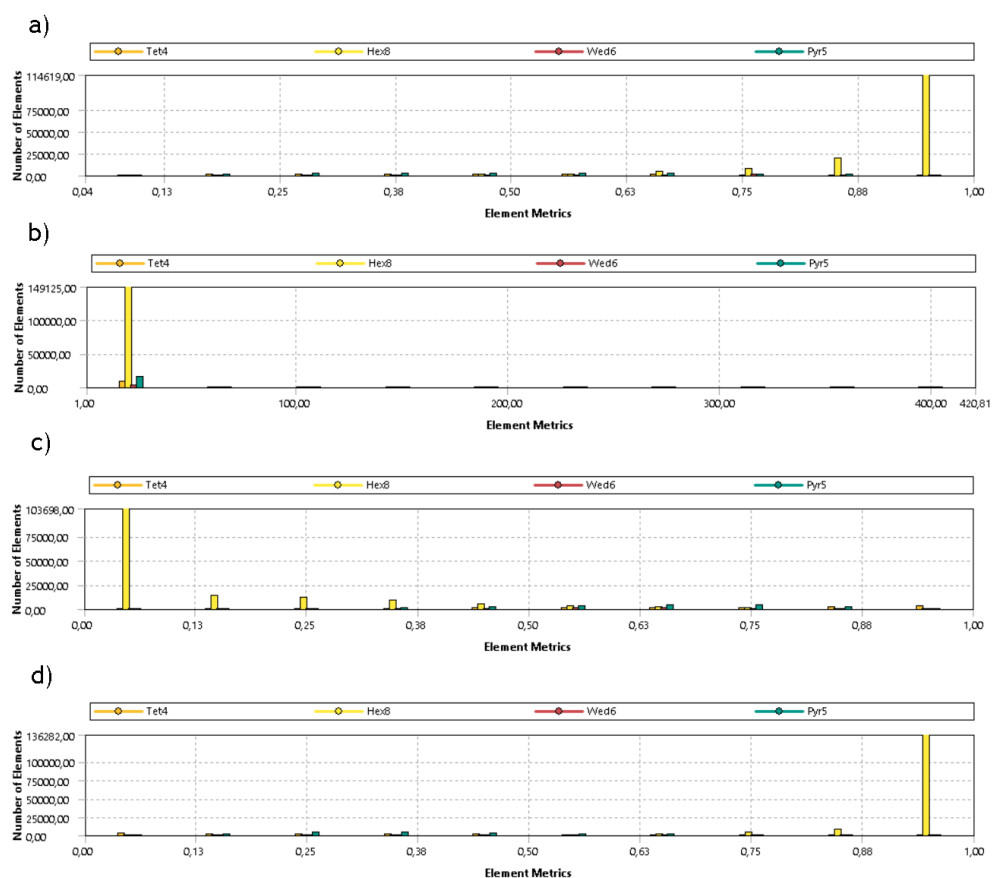
Rys. 40. Parametry jakościowe siatki kanału zbieżnego A: a) – jakość elementu, b) – współczynnik kształtu, c) – skośność, d) – ortogonalność

Siatka elementów objętościowych dla kanału B, pokazana na rys. 4,1 składa się z 185 209 elementów, w tym 9 083 czworosiecznych, 156 469 sześciosiecznych, 2 793 klinowych i 16 864 piramidialnych.



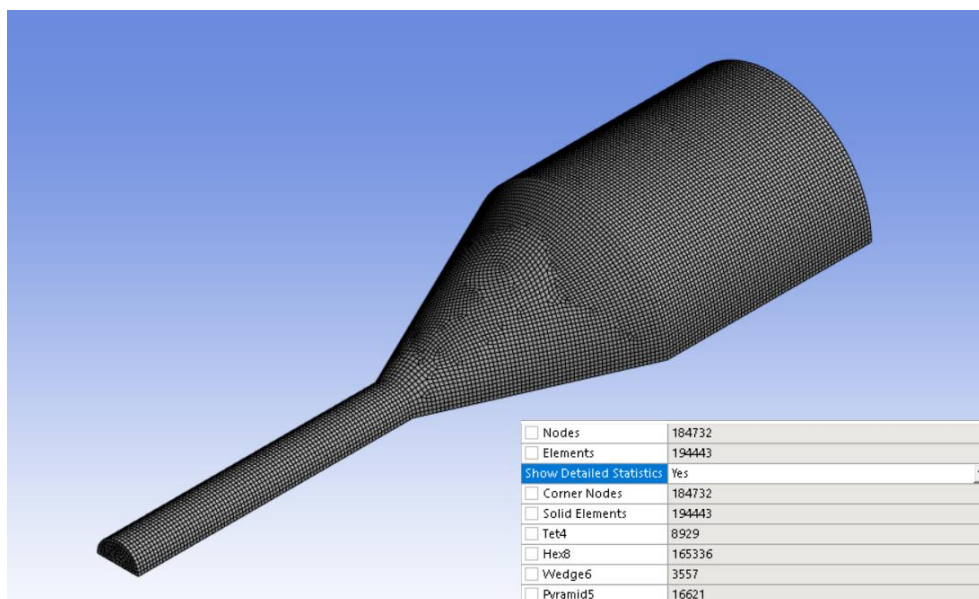
Rys. 41. Siatka elementów objętościowych - kanał zbieżny B

Na rys. 42 przedstawiono wykresy dotyczące jakości siatki kanału zbieżnego „B”.



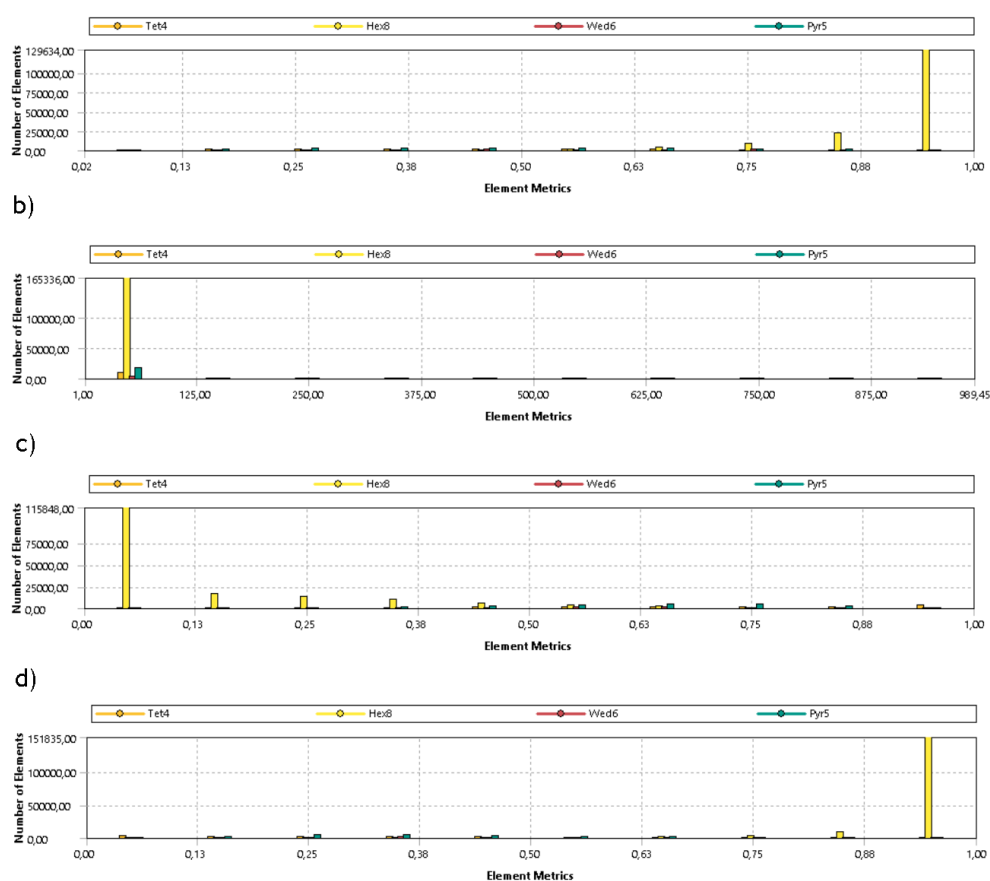
Rys. 42. Parametry jakościowe siatki kanału zbieżnego B: a) – jakość elementu, b) – współczynnik kształtu, c) – skośność, d) – ortogonalność

Model kanału, pokazany na rys. 43, składa się z 194 443 elementów, w tym 8 929 czworosiennych, 165 336 sześciosiennych, 3 557 klinowych i 16 621 piramidialnych.



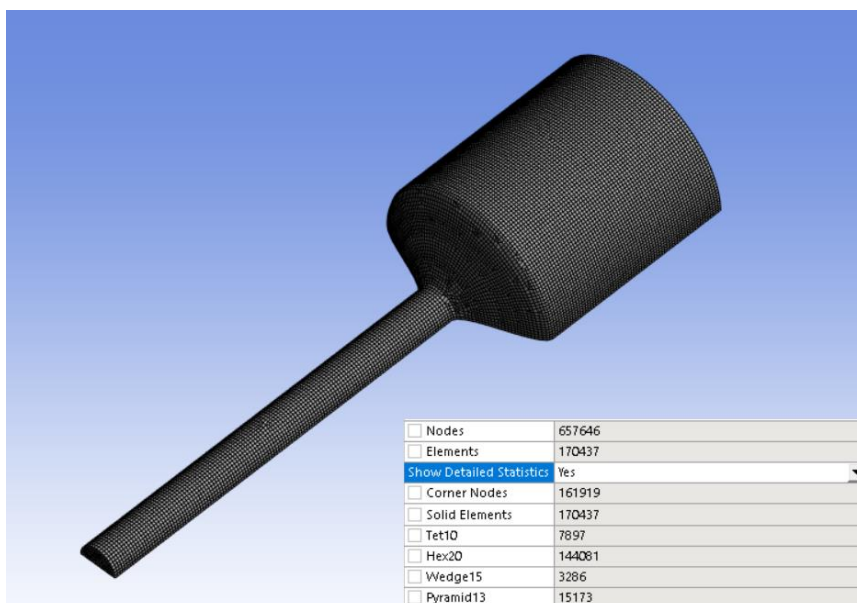
Rys. 43. Siatka elementów objętościowych - kanał zbieżny C

Parametry dotyczące jakości siatki dla kanału zbieżnego „C”, pokazane są na rys. 44.



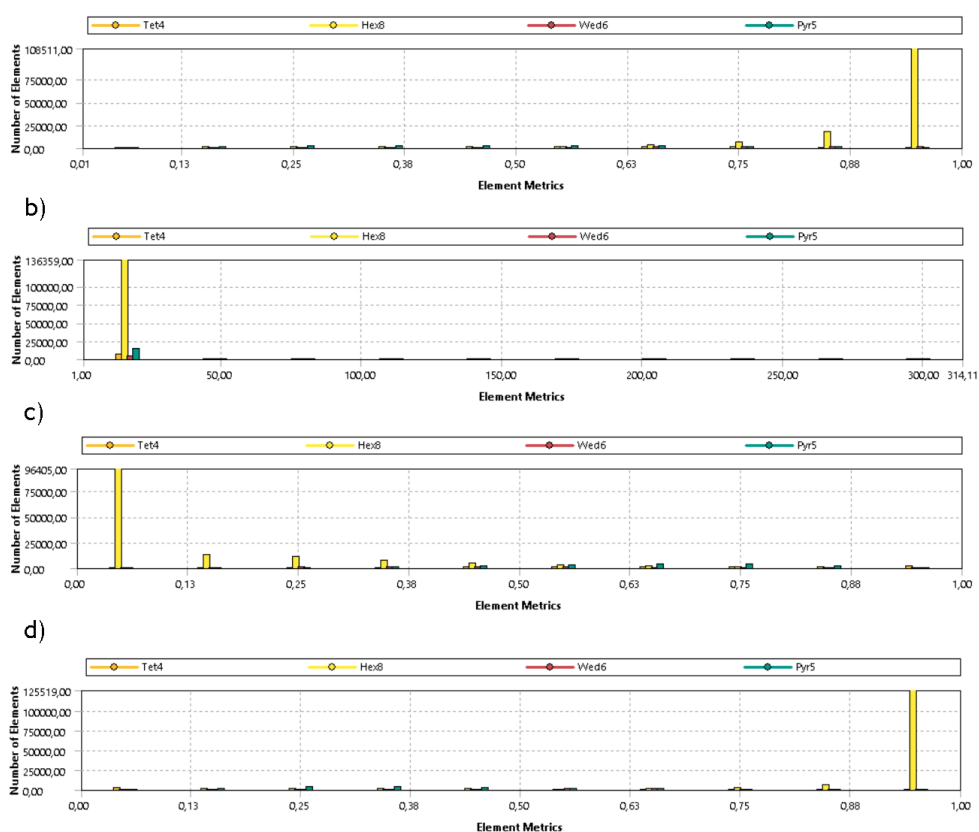
Rys. 44. Parametry jakościowe siatki kanału zbieżnego C: a) – jakość elementu, b) – współczynnik kształtu, c) – skośność, d) – ortogonalność

Model kanału pokazany na rys. 45 składa się z 170 437 elementów, w tym 7 897 czworosiecznych, 144 081 sześciosiecznych, 3 286 klinowych i 15 173 piramidialnych.



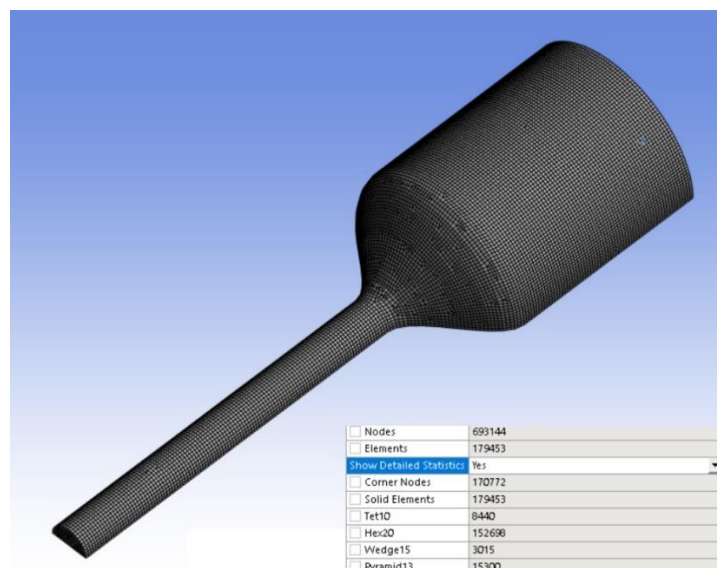
Rys. 45. Siatka elementów objętościowych - wielomian trzeciego stopnia A

Na rys. 46 pokazane są parametry dotyczące jakości siatki modelu opisanego wielomianem trzeciego stopnia o wymiarze charakterystycznym „A”.



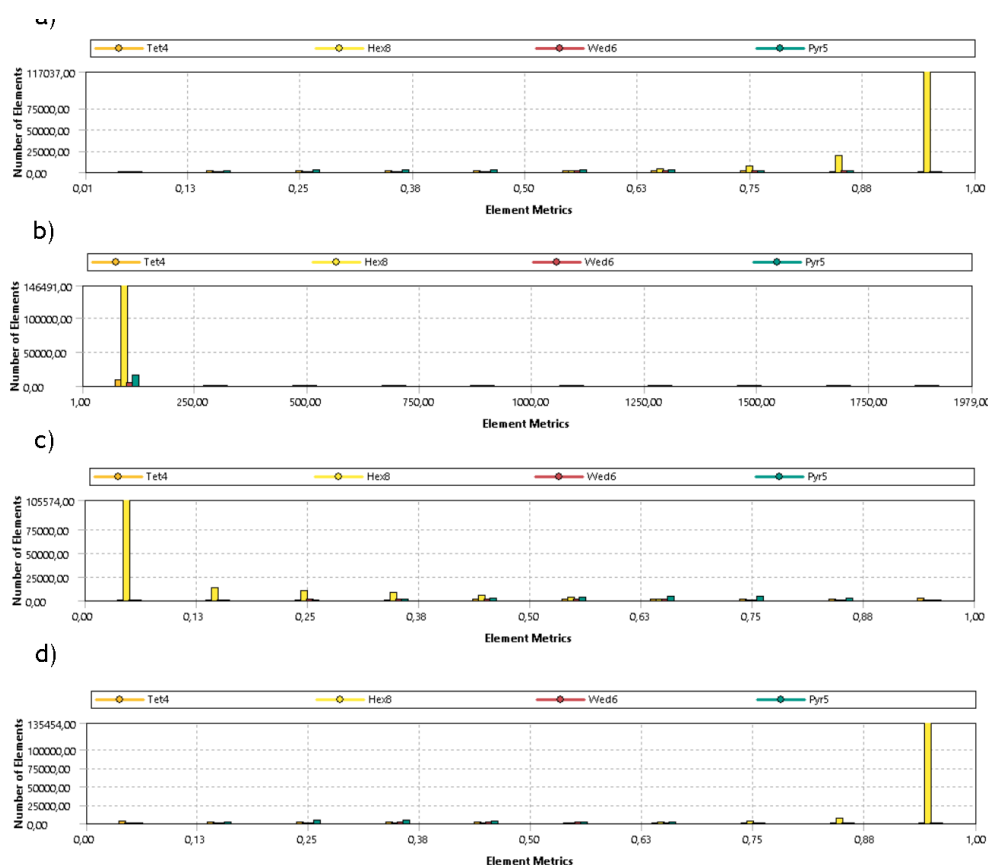
Rys. 46. Parametry jakościowe siatki dyszy wielomianowej A: a) – jakość elementu, b) – współczynnik kształtu, c) – skośność, d) – ortogonalność

Model kanału pokazany na rys. 47 składa się z 179 453 elementów, w tym 8 440 czworosiennych, 152 698 sześciosiennych, 3 015 klinowych i 15 300 piramidalnych.



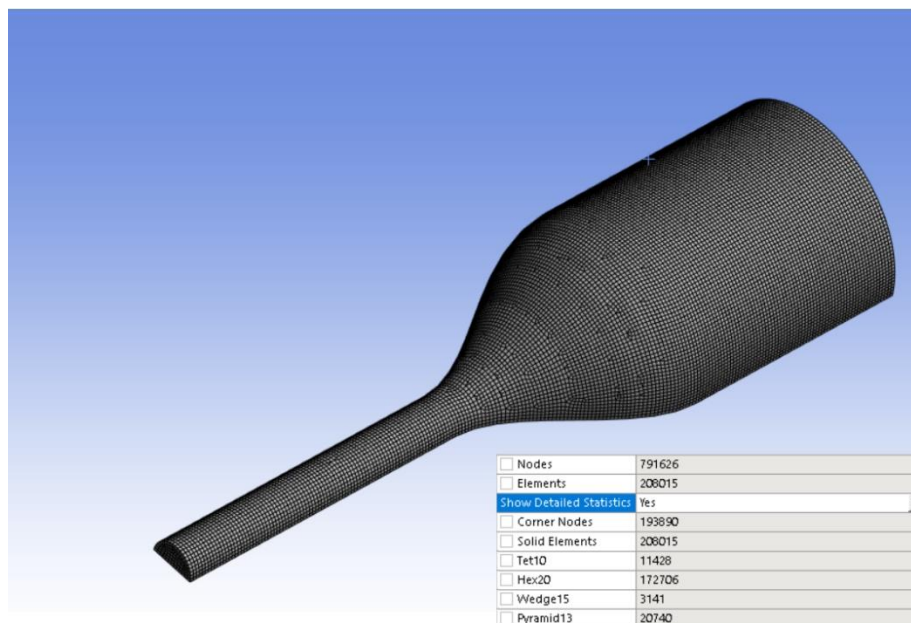
Rys. 47. Siatka elementów objętościowych - wielomian trzeciego stopnia B

Na rys. 48 przedstawione są parametry dotyczące jakości siatki dyszy wielomianowej opisananej wymiarem „B”.



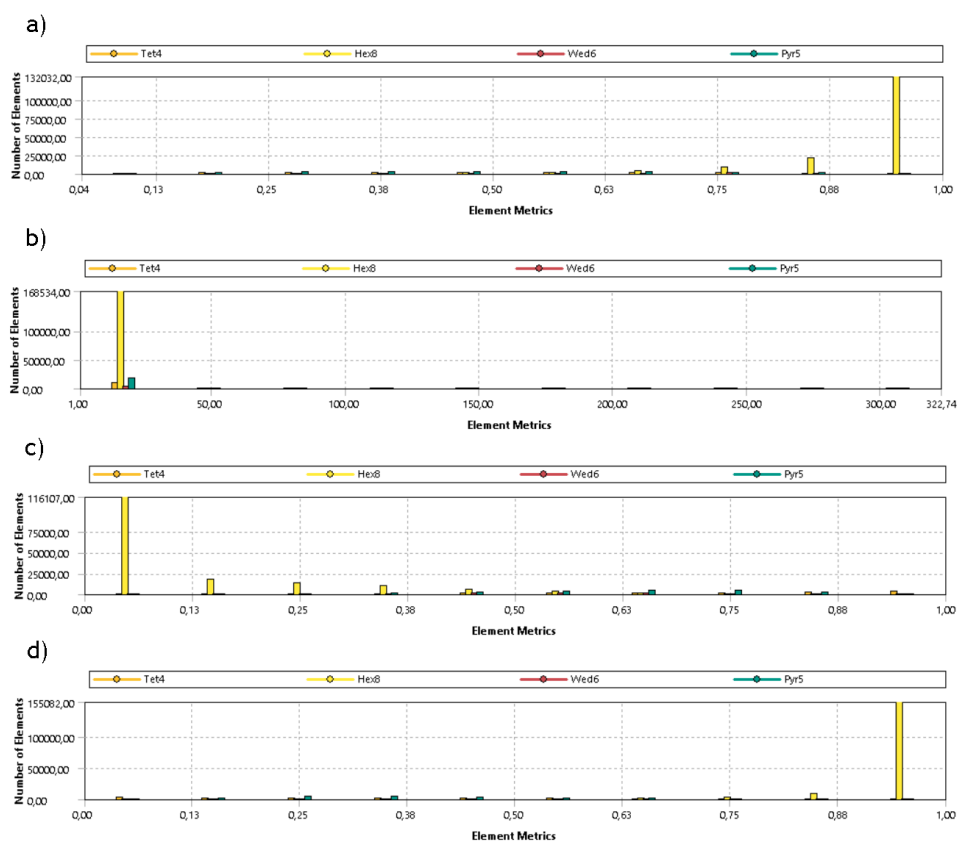
Rys. 48. Parametry jakościowe siatki dyszy wielomianowej B: a) – jakość elementu, b) – współczynnik kształtu, c) – skośność, d) – ortogonalność

Model kanału, pokazany na rys. 49 składa się z 208 015 elementów, w tym 11 428 czworobocznych, 172 706 sześciobocznych, 3 141 klinowych i 20 740 piramidalnych.



Rys. 49. Siatka elementów objętościowych - wielomian trzeciego stopnia C

Na rys. 50 pokazane są parametry dotyczące jakości siatki modelu opisanego wielomianem trzeciego stopnia o wymiarze „C”.



Rys. 50. Parametry jakościowe siatki dyszy wielomianowej C: a) – jakość elementu, b) – współczynnik kształtu, c) – skośność, d) – ortogonalność

5.4. Parametry wejściowe

Kolejnym etapem przygotowania symulacji numerycznych jest określenie parametrów wejściowych, które zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Warunki brzegowe zastosowane w symulacji

Kryterium	Wartość
Prędkość na wlocie v	0,00994 [m/s]
Ciśnienie na wylocie P	1 [bar]

Warunkami brzegowymi, jakie przyjęte zostały do obliczeń to: prędkość wlotowa obliczona na podstawie pomiarów reologicznych oraz ciśnienie na wylocie.

Ponieważ polipropylen jest płynem nienewtonowskim, należało w programie zastosować również odpowiedni model lepkości. Wybrany modelem jest model potęgowy Ostwalda-de Waele'a (ang. Power Law Model) z dobranymi odpowiednio parametrami (współczynnikiem konsystencji „ k ” oraz wykładnikiem płynięcia „ n ”). Parametry lepkości zostały dobrane na podstawie wyznaczonych podczas badań reometrycznych wartości całkowitego spadku ciśnienia oraz objętościowego natężenia. Zastosowano także odpowiednią wartość gęstość płynu ρ oraz współczynnik przewodności cieplnej λ i ciepło właściwe c_w . Właściwości materiału użytego w symulacji komputerowej zawarto w tabeli 2.

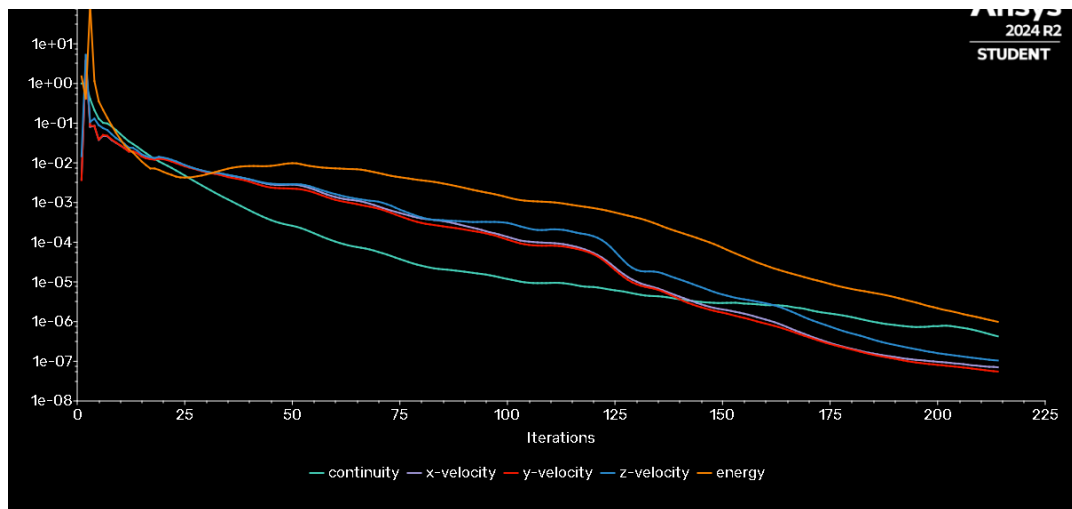
Tabela 2

Właściwości materiału zastosowane w symulacji

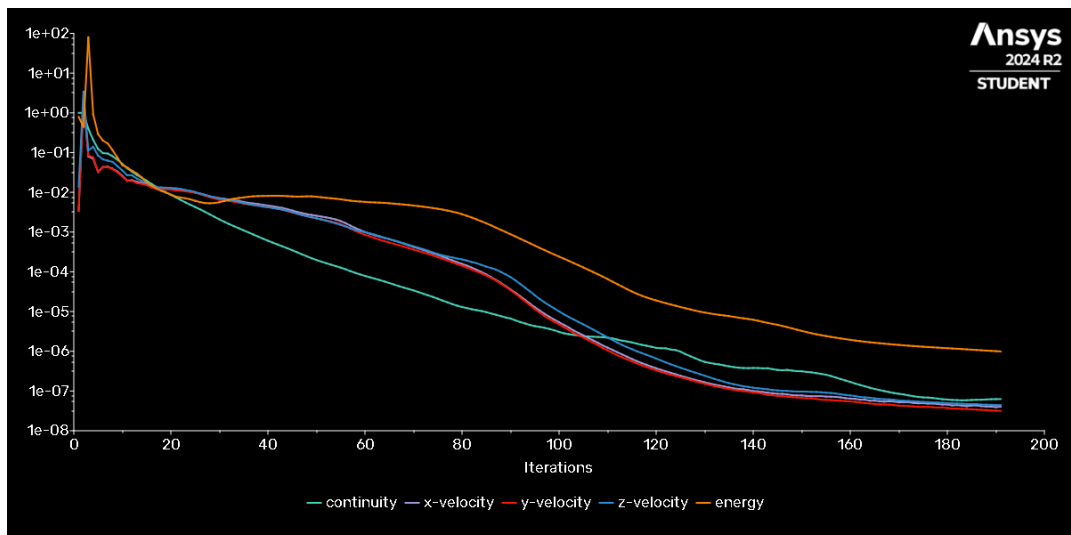
Kryterium	Wartość
Gęstość płynu ρ	910 [kg/m ³]
Współczynnik konsystencji k	1007,27 [N·s/m ²]
Wykładnik płynięcia n	0,6413 [-]
Przewodność cieplna λ	0,4 [W/m·K]
Ciepło właściwe c_w	1700 [J/kg·K]

Metoda objętości skończonych sprowadza układ równań różniczkowych do układu algebraicznego równań liniowych $Ax = b$, rozwiązywanych iteracyjnie. Obliczenia kończą się kiedy residuum tego układu równań, czyli norma $\|Ax - b\|_2$ osiąga zadaną dokładność eps , dzięki czemu w procesie obliczeń otrzymuje się historię zbieżności. Gdy rozwiązanie jest zbieżne, residuum dąży do zera (obliczenia zatrzymują się kiedy osiągnie zadaną wartość, w

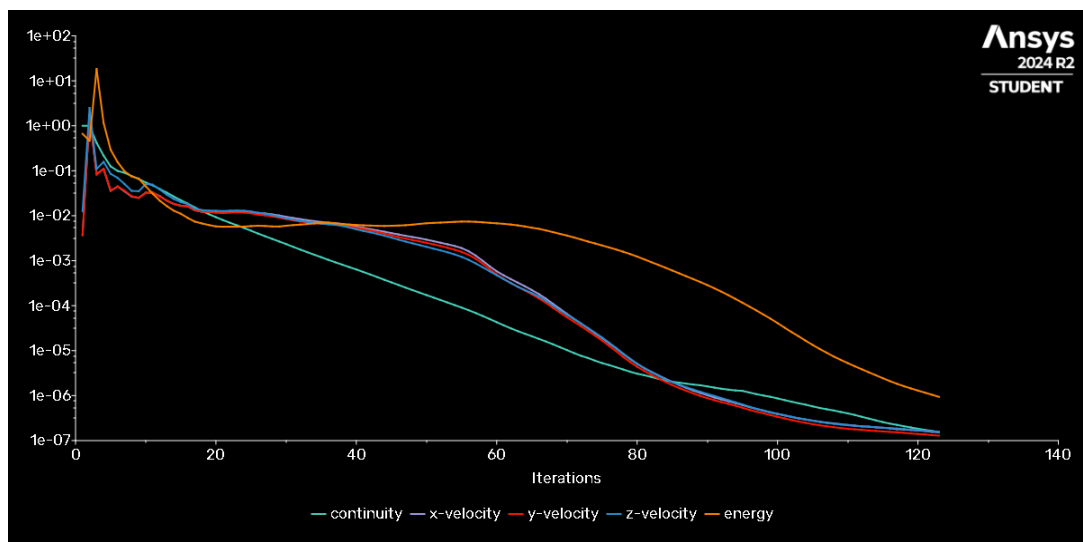
tym przypadku $eps = 10^{-8}$). Historie zbieżności procesu obliczeń dla dysz zbieżnych zestawiono na ryss. 51 – 53, natomiast dla dysz wielomianowych na ryss. 54 – 56.



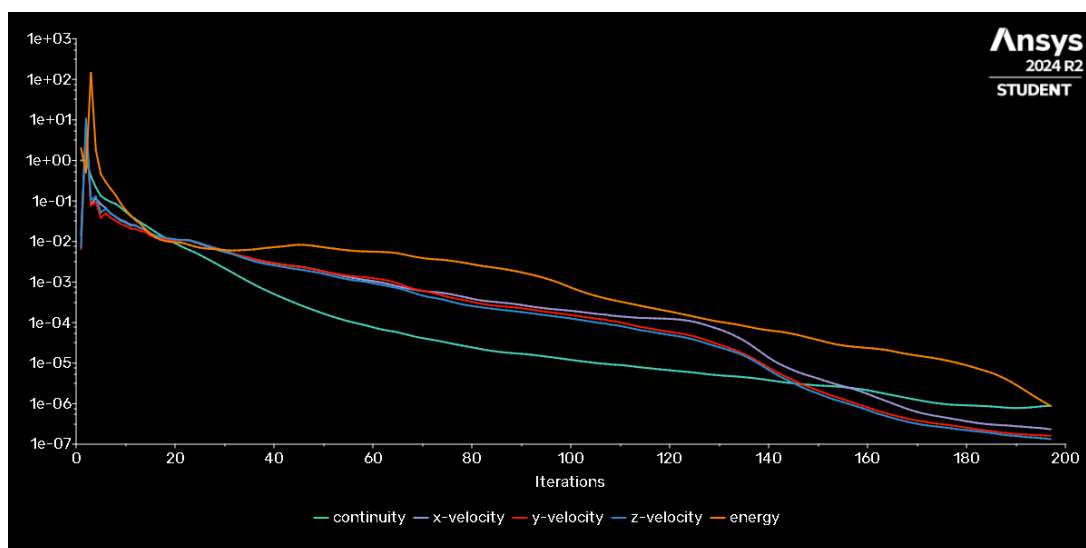
Rys. 51. Historia zbieżności rozwiązania – dysza zbieżna A



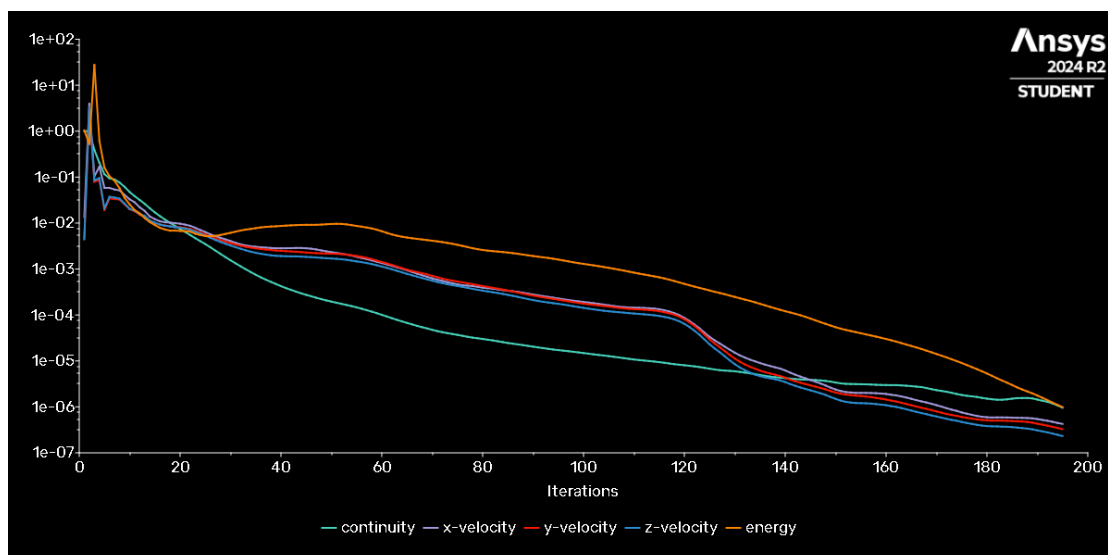
Rys. 52. Historia zbieżności rozwiązania – dysza zbieżna B



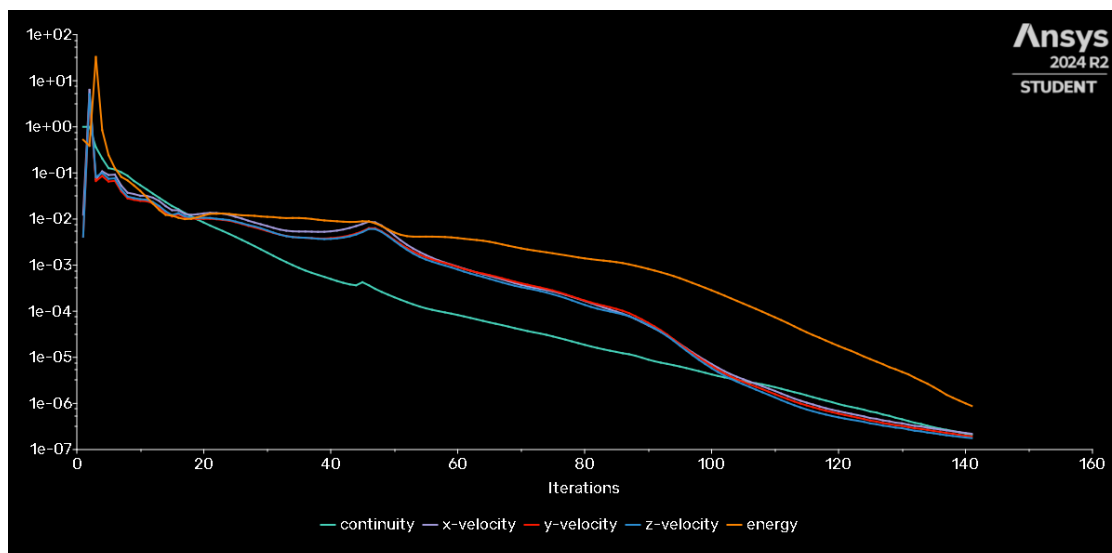
Rys. 53. Historia zbieżności rozwiązania – dysza zbieżna C



Rys. 54. Historia zbieżności rozwiązania – dysza wielomianowa A



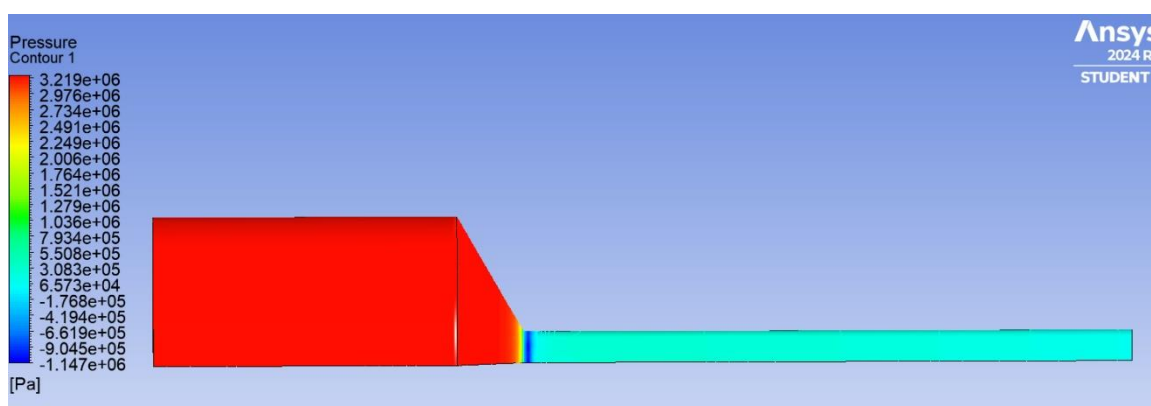
Rys. 55. Historia zbieżności rozwiązania – dysza wielomianowa B



Rys. 56. Historia zbieżności rozwiązania – dysza wielomianowa C

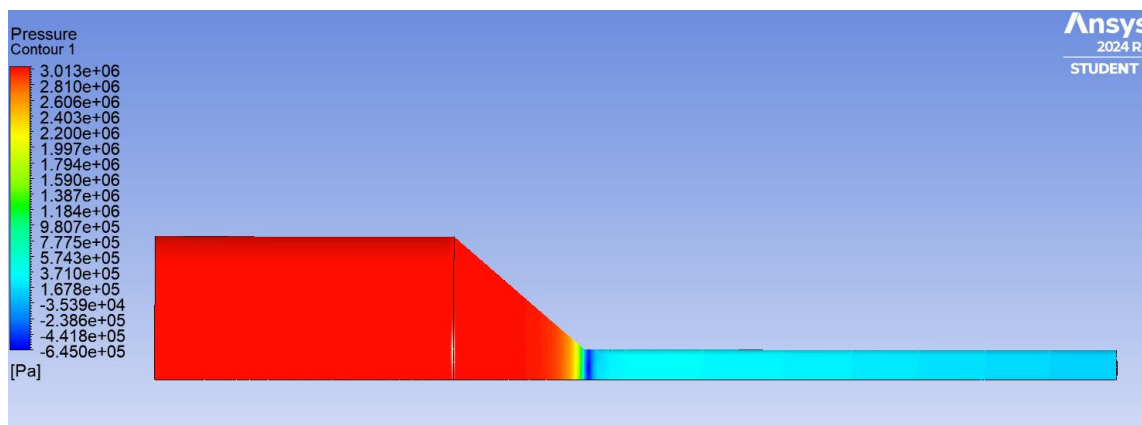
5.5. Wyniki eksperymentu symulacyjnego

Poniżej na rysunkach przedstawione zostały rozkłady ciśnienia na rys. 57 – 62 oraz prędkości na rys. 63 – 68 dla wszystkich analizowanych w pracy kształtów dysz.



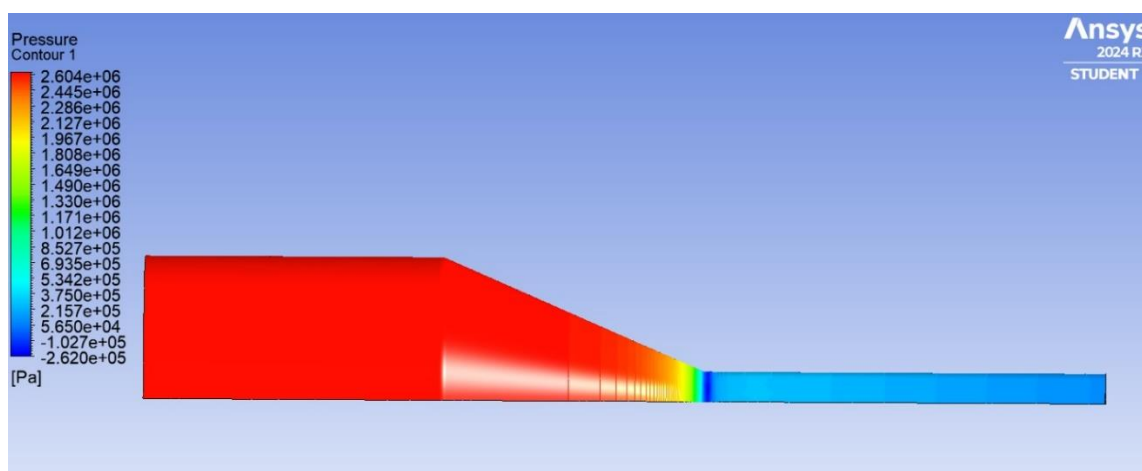
Rys. 57. Rozkład ciśnienia – przepływ medium przez kanał zbieżny A

Wartość maksymalna ciśnienia dla dyszy zbieżnej opisanej wymiarem „A” wynosi 32,2 bara (rys. 57). Te największe wartości ujawniają się w sekcji zmiany średnicy kanału, a także w części wlotowej dyszy.



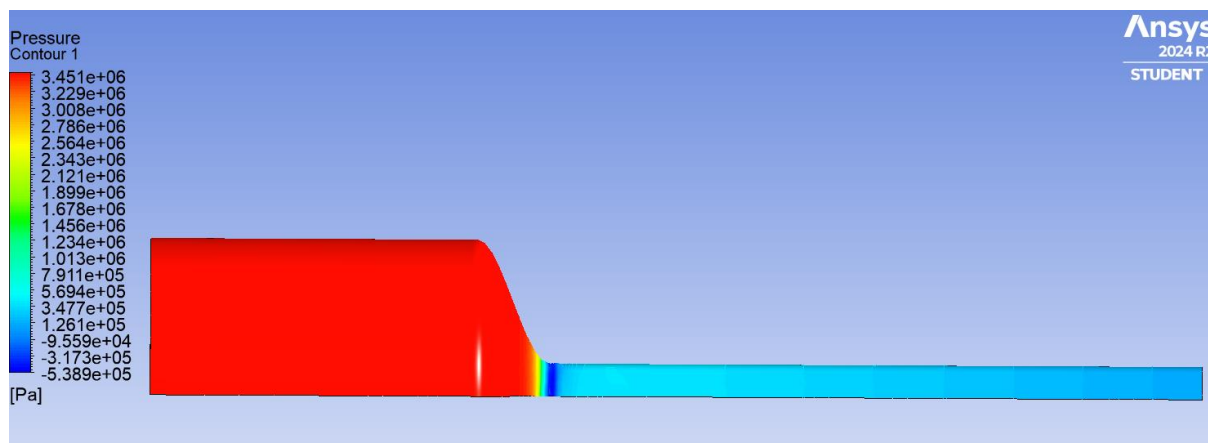
Rys. 58. Rozkład ciśnienia – przepływ medium przez kanał zbieżny B

Dla powyższego modelu kanału zbieżnego opisanego wymiarem „B”, ciśnienie maksymalne wynosi 30,1 bara (rys. 58). Te największe wartości widoczne są w części wlotowej dyszy. W sekcji zmiany średnicy kapilary wartości te są nieco mniejsze od maksymalnych.



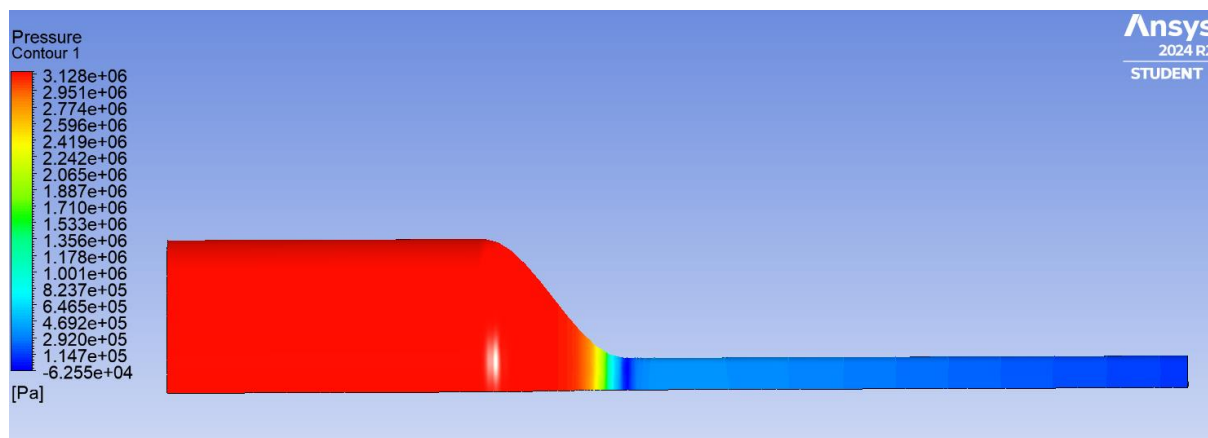
Rys. 59. Rozkład ciśnienia – przepływ medium przez kanał zbieżny C

Dla ostatniej z dysz z kanałem zbieżnym, która jest opisana wymiarem charakterystycznym „C”, osiągnięto maksymalną wartość ciśnienia równą 26 barów (rys. 59). Tutaj, podobnie jak w przypadku dwóch poprzednich kształtek, szczytowe wartości ciśnienia znajdują się tuż przy sekcji wlotowej dyszy. W miejscu „nagłej” zmiany średnicy kapilary, wartości ciśnienia są mniejsze w porównaniu z dyszami zbieżnymi o wymiarach charakterystycznych „A” oraz „B”.



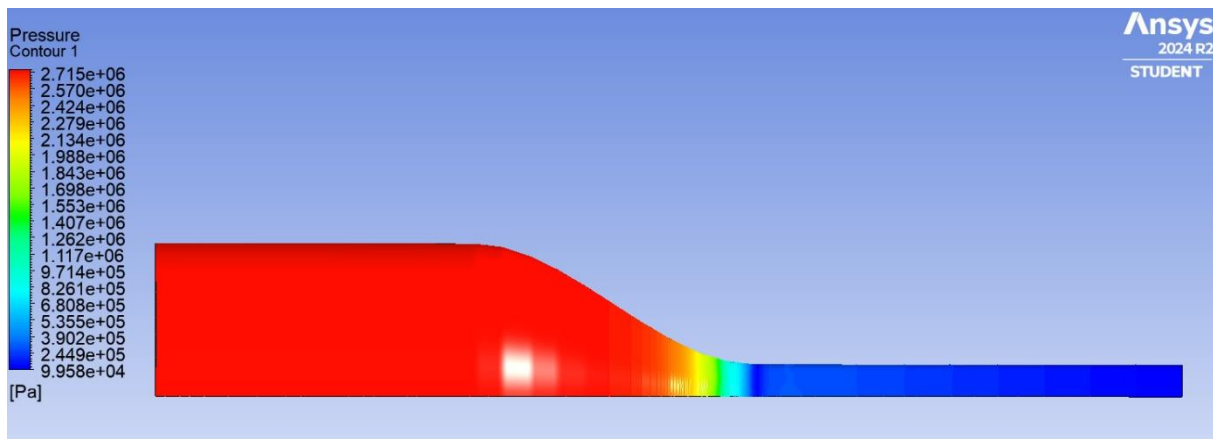
Rys. 60. Rozkład ciśnienia – przepływ medium przez kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia A

Kształt dyszy przedstawionej na rys. 60, został nadany poprzez odpowiedni dobór współczynników dla wielomianu trzeciego stopnia oraz zadanie wartości wymiarów średnicy wlotowej oraz wylotowej. Ciśnienie występujące przy przepływie w tej dyszy wynosi maksymalnie 34,5 bara. Największe wartości ciśnienia pojawiają się na wlocie do dyszy oraz w strefie zmiany średnicy kanału. W porównaniu z dyszą zbieżną o tym samym wymiarze charakterystycznym „A” osiągnięto większą maksymalną wartość ciśnienia.



Rys. 61. Rozkład ciśnienia – przepływ medium przez kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia B

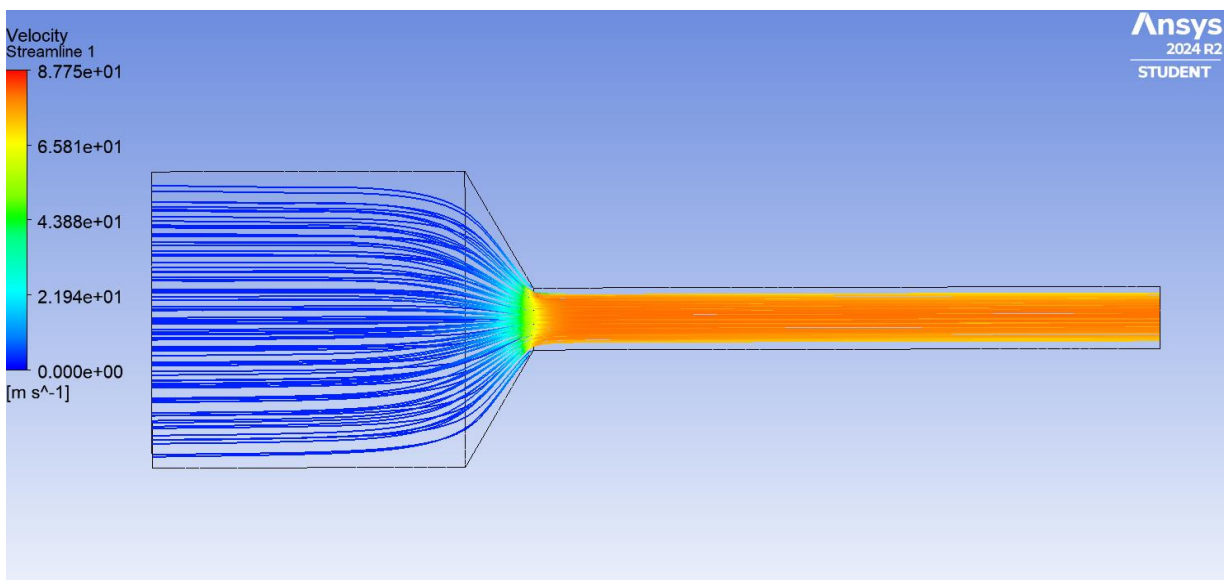
Dysza opisana równaniem wielomianowym o wymiarze charakterystycznym „B” pokazana na rys. 61, osiąga maksymalną wartość ciśnienia równą 31,3 bara. Szczytowe poziomy ciśnienia kapilara osiąga w części wlotowej oraz w sekcji przy zmianie średnicy kanału. W porównaniu z dyszą zbieżną osiągnięto większą wartość maksymalną ciśnienia.



Rys. 62. Rozkład ciśnienia – przepływ medium przez kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia C

Ostatnia z dysz wielomianowych została opisana wymiarem charakterystycznym „C”. Dla tej kapilary ciśnienie maksymalne wynosi 27,15 bara (rys. 62). Spośród pozostałych wyżej opisanych dysz wielomianowych ta ostatnia osiąga najmniejsze maksymalne wartości ciśnienia, które podobnie jak w poprzednich przypadkach obejmuje część sekcji wlotowej do dyszy. W zestawieniu z dyszą zbieżną dysza wielomianowa opisana wymiarem charakterystycznym C osiąga większe maksymalne wartości ciśnienia.

Kolejne ilustracje prezentują rozkład prędkości dla kanałów zbieżnych oraz kapilar o obrysie wielomianowym.

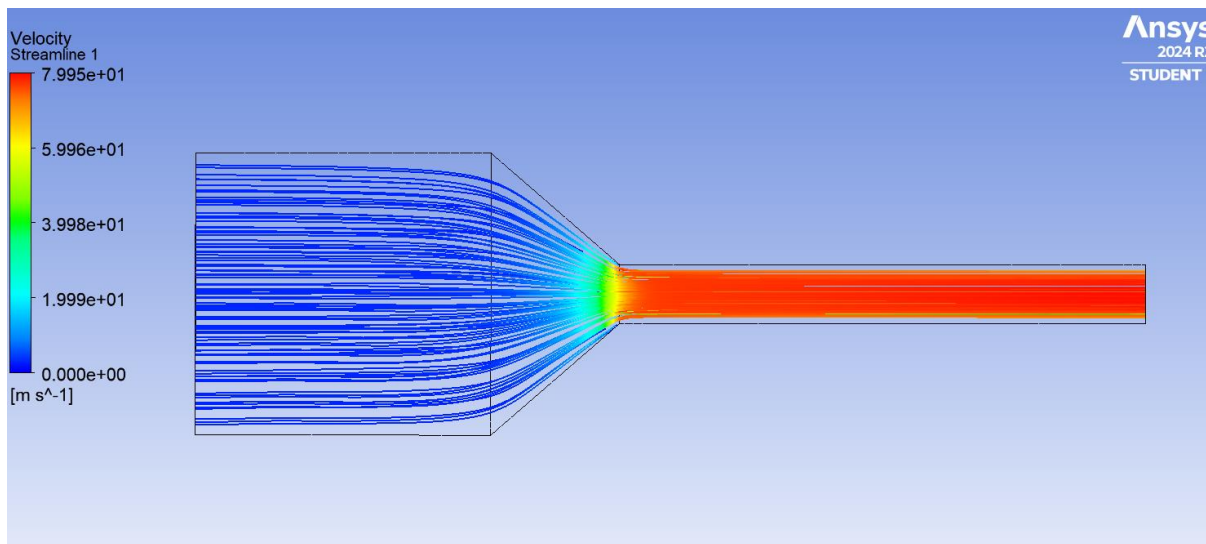


Rys. 63. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały zbieżne: Dysza zbieżna A

Prędkość maksymalna osiągnięta w dyszy zbieżnej opisanej wymiarem charakterystycznym „A” wynosi 87,8 m/s i występuje w miejscu nagłej zmiany średnicy, (rys. 63). Wartość prędkości bliska zeru jest zauważalna w części poprzedzającej zmianę średnicy dyszy. Sekcja

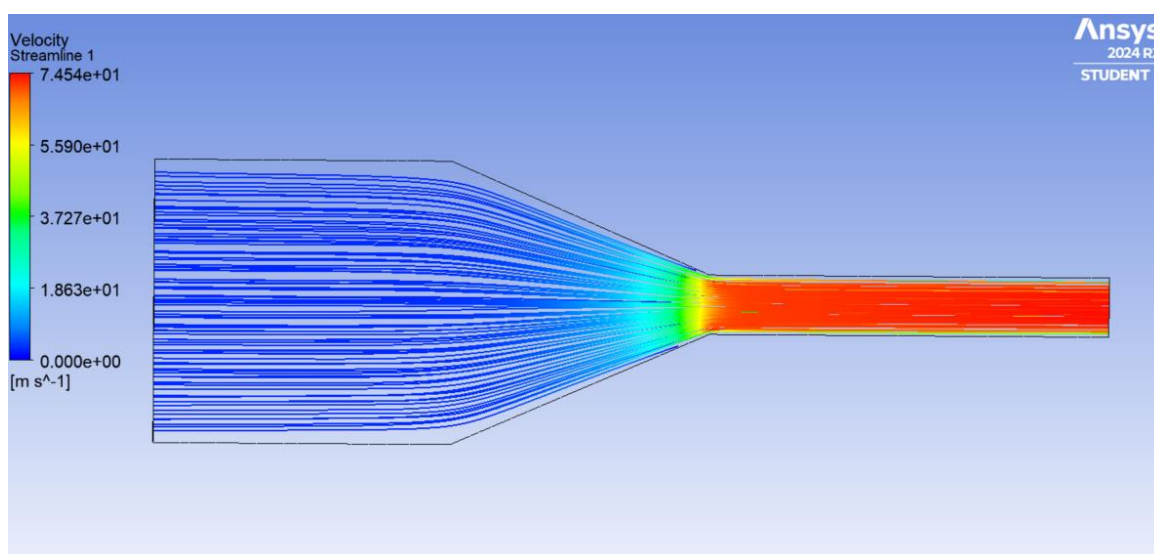
przyścienna, gdzie dochodzi do zatrzymania płynu, jest w tym przypadku znaczących rozmiarów.

Rozkład prędkości dla dyszy zbieżnej opisanej wymiarem charakterystycznym „B” przedstawiono na rys. 64.



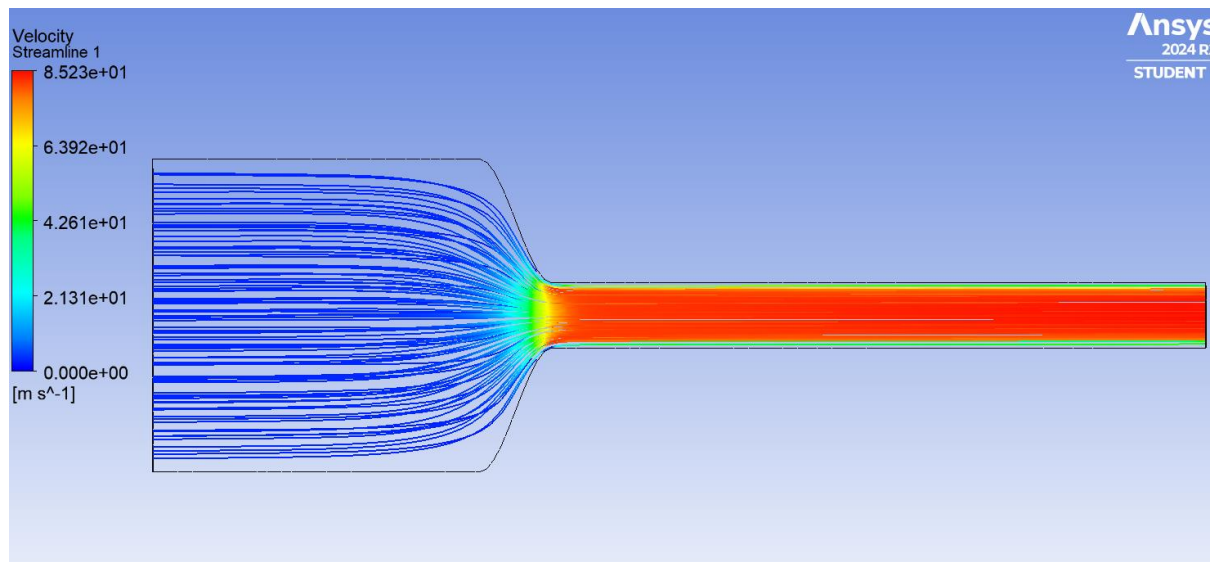
Rys. 64. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały zbieżne: Dysza zbieżna B

Dla dyszy zbieżnej opisanej wymiarem charakterystycznym „B” maksymalna wartość prędkości osiągnięta przez polimer wynosi niespełna 80 m/s. Maksymalne wartości prędkości występują w miejscu nagłej zmiany średnicy kanału oraz tuż przy sekcji wylotowej dyszy. Wartość prędkości bliska zero mieści się w części tuż przed zmianą średnicy kapilary, jednakże w porównaniu z dyszą opisaną wymiarem charakterystycznym „B” wyhamowanie płynu odbywa się w wąskiej strefie przyściennej.



Rys. 65. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały zbieżne: Dysza zbieżna C

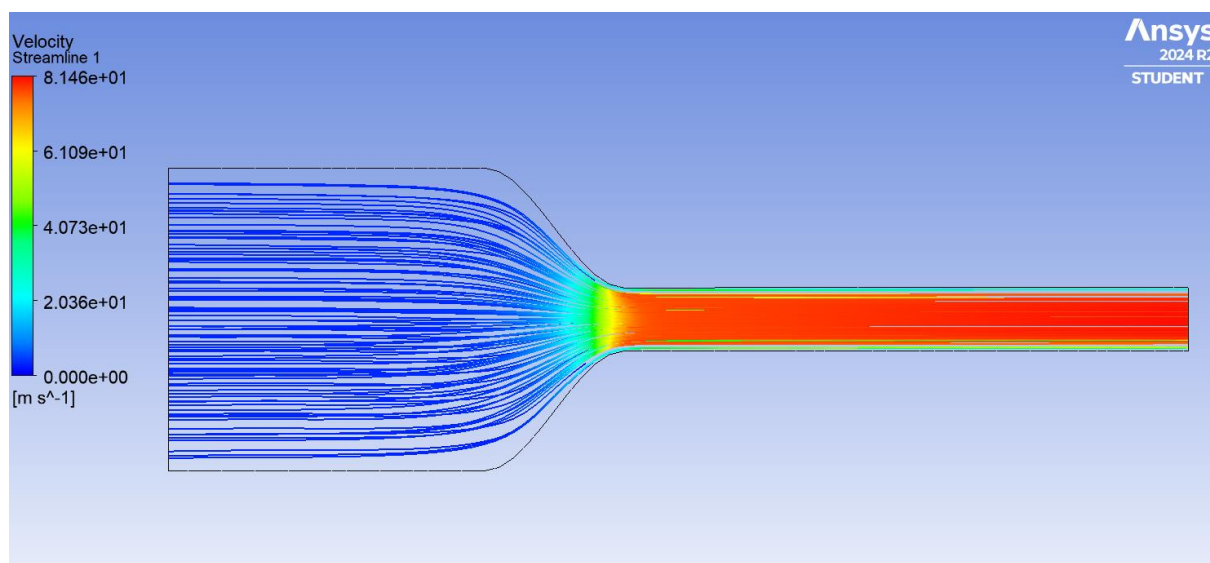
Dla ostatniej z dysz zbieżnych odnotowano maksymalną wartość prędkości wynoszącą 75,4 m/s, która występuje w obszarze obejmującym kanał o średnicy 2 mm, czyli całą sekcję wylotową (rys. 65). Najmniejsze wartości prędkości oraz zatrzymanie płynu odbywa się w bardzo wąskiej strefie przyściennej.



Rys. 66. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały opisane wielomianem trzeciego stopnia: Dysza wielomianowa A

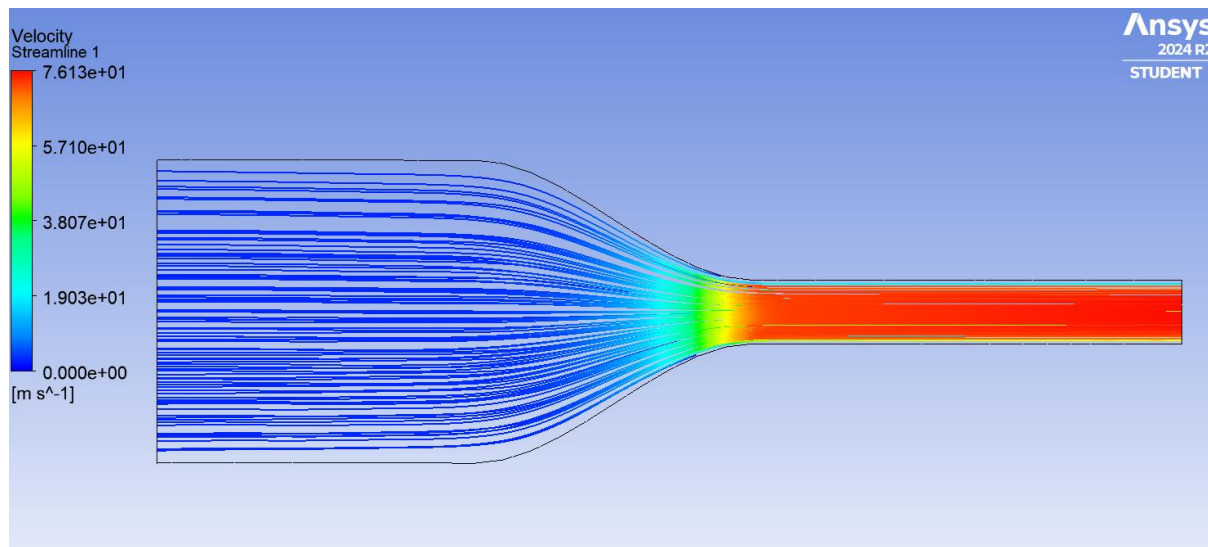
Dla dyszy wielomianowej opisanej wymiarem charakterystycznym „A” odnotowano wartość maksymalną prędkości wynoszącą 85,2 m/s, która występuje tuż za zmianą średnicy oraz w części wylotowej kapilary (rys. 66). Warstwa przyścienna, w której dochodzi do zatrzymania płynu jest mniejsza w porównaniu z dyszą zbieżną opisaną tym samym wymiarem.

Rozkład prędkości dla dyszy wielomianowej „B” przedstawiono na rys. 67.



Rys. 67. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały opisane wielomianem trzeciego stopnia: Dysza wielomianowa B

Dysza wielomianowa, która jest opisana wymiarem „B” pozwala na osiągnięcie prędkości przepływającego płynu w maksymalnej wartości 76,1 m/s. W porównaniu z dyszą zbieżną opisaną tym samym wymiarem charakterystycznym, warstwa przyścienna, w której dochodzi do zatrzymania się płynu, jest nieco mniejszych rozmiarów.



Rys. 68. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały opisane wielomianem trzeciego stopnia: Dysza wielomianowa C

Ostatnia z dysz wielomianowych, której sekcja zmiany średnicy została najbardziej wydłużona, pozwoliła na osiągnięcie maksymalnej wartości prędkości 76,1 m/s (rys. 68). Warstwa przyścienna, w której dochodzi do zatrzymania się płynu, w porównaniu z dyszą zbieżną o wymiarze charakterystycznym „C” jest nieznacznie węższa.

W tabeli 3 zestawiono wyniki strat ciśnienia dla każdej z analizowanych dysz, które zostały otrzymane w drodze komputerowej symulacji obliczeniowej dynamiki płynów.

Tabela 3

Zestawienie wyników strat ciśnienia otrzymanych za pomocą symulacji CFD

Wymiar charakterystyczny	Typ kanału	Całkowita strata ciśnienia [kPa]
A, H	Dysza zbieżna	3157
A, H	Dysza wielomianowa	3383
B, H	Dysza zbieżna	2943
B, H	Dysza wielomianowa	3053
C, H	Dysza zbieżna	2527
C, H	Dysza wielomianowa	2525

Na podstawie danych zawartych w tabeli oraz rysunków przedstawiających rozkład ciśnienia dla każdej z dysz można stwierdzić, że najmniejszy spadek ciśnienia zaobserwowano dla dyszy wielomianowej z wymiarem „C”. Wydłużenie dyszy spowodowało, że przejście ze średnicy 9,22 mm do średnicy 2 mm jest w tym przypadku „najłagodniejsze”.

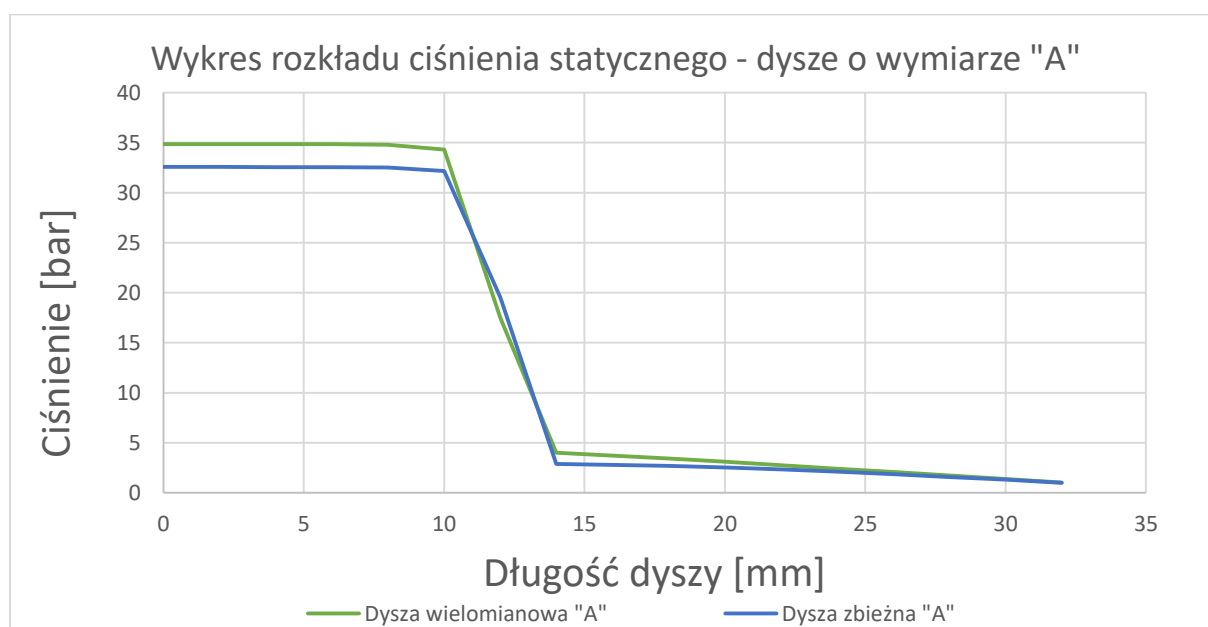
W tabeli 4 podano procentowy udział strat ciśnienia w odniesieniu do dyszy bazowej, którą jest dysza zbieżna opisana wymiarem charakterystycznym „A”. Wynik ze znakiem minus oznacza obniżenie strat ciśnienia.

Tabela 4

Zestawienie wyników zysku ciśnienia w związku ze zmianą kształtu kapilary dla badania symulacyjnego

Wymiar charakterystyczny	Typ kanału	Strata ciśnienia
A, H	Dysza zbieżna	0,00%
A, H	Dysza wielomianowa	7,16%
B, H	Dysza zbieżna	-6,78%
B, H	Dysza wielomianowa	-3,31%
C, H	Dysza zbieżna	-19,95%
C, H	Dysza wielomianowa	-20,02%

W stosunku do dyszy zbieżnej o wymiarze charakterystycznym „A” straty zostały zmniejszone o 20% dzięki zastosowaniu dyszy opisanej wielomianem trzeciego stopnia o wymiarze charakterystycznym „C”.

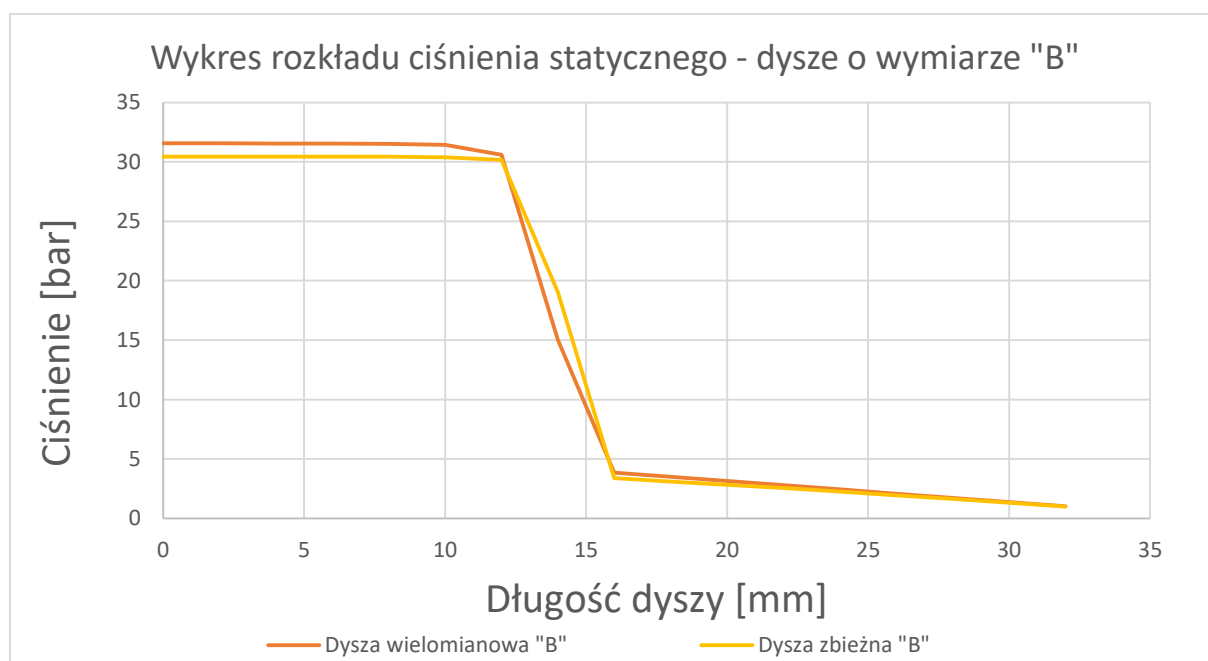


Rys. 69. Wykres przedstawiający rozkład ciśnienia statycznego – dysze o wymiarze charakterystycznym „A”

Pozostałe dysze, w których wydłużono sekcję wlotową, również charakteryzują się pewnymi zyskami ciśnienia. Zastosowanie krzywej wielomianowej dla kapilary opisanej wymiarem „A” nie przyniosło zadowalającego rezultatu, w wyniku czego straty ciśnienia pogłębiły się o 7,2%.

Na rys. 69, 70 i 71 przedstawiono wykresy rozkładu ciśnienia statycznego. Diagramy przygotowano dla każdego z wymiarów charakterystycznych.

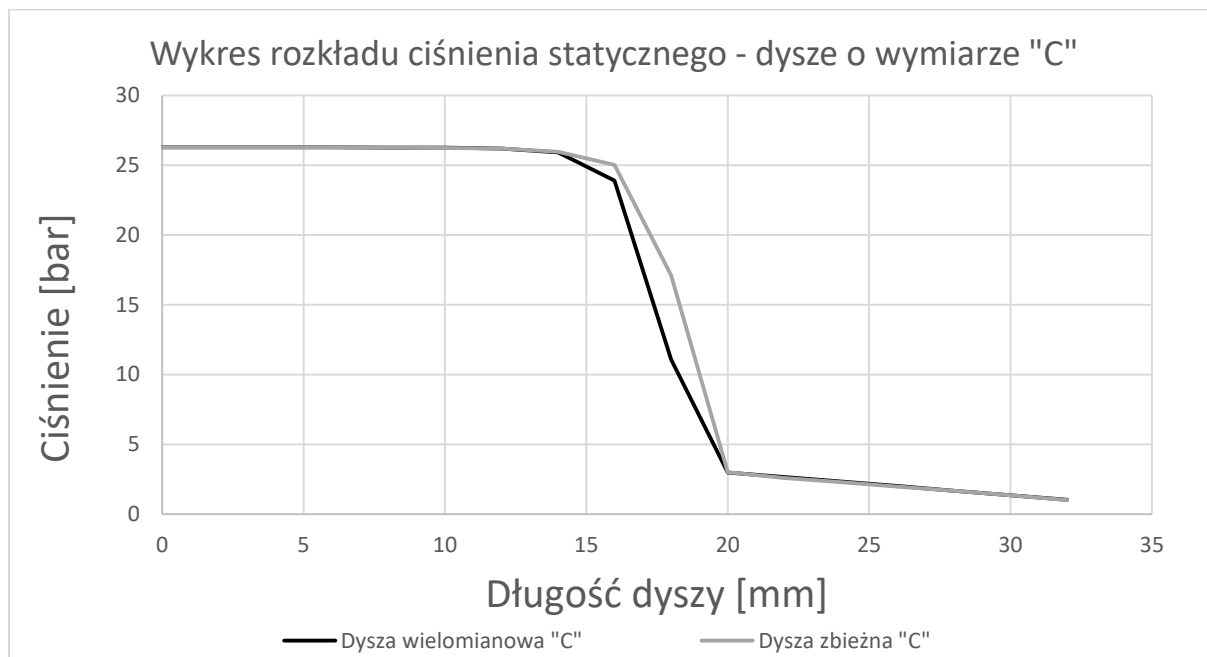
Dysze o wymiarze charakterystycznym „A” to dysze, w których nie zastosowano wydłużenia sekcji zmiany średnicy. Na podstawie danych zamieszczonych na rys. 69 można zauważyć, że w dyszy wielomianowej na wlocie osiągnięto większe ciśnienie niż w dyszy zbieżnej. Rozkład ciśnienia statycznego dla obu dysz cechuje się podobnym przebiegiem, czyli stałą wartością ciśnienia na wlocie, „skokiem” ciśnienia tuż przed zwężeniem, spadkiem ciśnienia wraz ze zmianą średnicy oraz „skokiem ciśnienia” tuż za zwężeniem. Ciśnienie tuż za zwężeniem dyszy ma większą wartość dla dyszy wielomianowej w porównaniu z dyszą zbieżną.



Rys. 70. Wykres przedstawiający rozkład ciśnienia statycznego – dysze o wymiarze charakterystycznym „B”

Dysze o wymiarze charakterystycznym „B” to dysze, w których zastosowano częściowe wydłużenie sekcji zmiany średnicy. Na podstawie danych zamieszczonych na wykresie można zauważyć, że w dyszy wielomianowej na wlocie osiągnięto większe ciśnienie niż w dyszy zbieżnej. Rozkład ciśnienia statycznego dla obu dysz cechuje się podobnym przebiegiem, jednakże uskok tuż przed zmianą średnicy jest bardziej płaski dla dyszy wielomianowej. Ciśnienie tuż za zwężeniem dyszy ma większą wartość dla dyszy wielomianowej w porównaniu

z dyszą zbieżną. Wartość ciśnienia na wlocie osiągnięta dla dysz o wymiarze charakterystycznym „B” jest mniejsza niż dla dysz o wymiarze charakterystycznym „A”.



Rys. 71. Wykres przedstawiający rozkład ciśnienia statycznego – dysze o wymiarze charakterystycznym „C”

Dysze o wymiarze charakterystycznym „C” to dysze, w których zastosowano największe wydłużenie sekcji zmiany średnicy. Na podstawie danych zamieszczonych na rys. 71 można zauważyć, że w dyszy wielomianowej na wlocie osiągnięto nieznacznie większe ciśnienie niż w dyszy zbieżnej. Rozkład ciśnienia statycznego dla obu dysz cechuje się bardzo podobnym przebiegiem, jednakże uskok tuż przed zmianą średnicy jest bardziej płaski dla dyszy wielomianowej. Ciśnienie tuż za zwężeniem dyszy ma nieznacznie większą wartość dla dyszy wielomianowej w porównaniu z dyszą zbieżną. Wydłużenie sekcji zmiany średnicy do wymiarów charakterystycznych „C” spowodowało, że ciśnienie na wlocie jest najmniejsze w zestawieniu z dyszami o wymiarze charakterystycznym „A” oraz „B”. W sekcji „nagłej” zmiany średnicy dyszy, skok ciśnienia jest najmniejszy dla dyszy wielomianowej „C”, a największy dla dyszy zbieżnej „A” oraz dyszy wielomianowej „A”.

6. Wyniki badań eksperymentalnych

6.1. Specyfikacja aparatury zastosowanej w eksperymencie

Aparatura użyta w badaniach to reometr kapilarny Dynisco model LCR7000 z czujnikiem ciśnienia Dynisco model MDA420-1/2-1M-15-M685 o zakresie pomiarowym do 100 MPa, pokazany na rys. 72. Zakres temperatur mieści się w przedziale od 0°C do 430°C (dokładność odczytu temperatury 0,2°C), a prędkość przemieszczania tłoka od 0,03 do 600 mm/min.



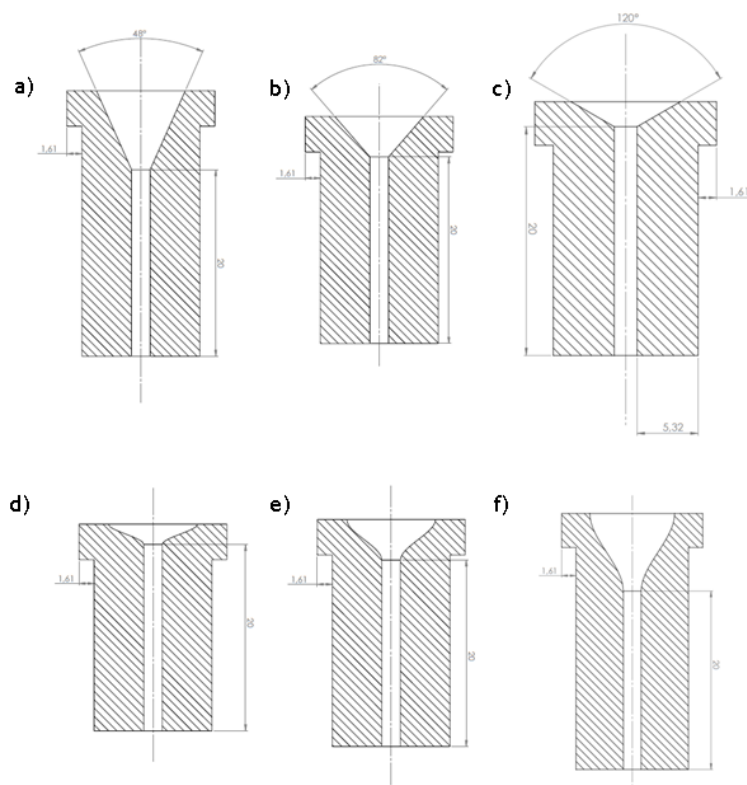
Rys. 72. Reometr kapilarny firmy Dynisco z czujnikiem ciśnienia – Politechnika Bydgoska

W normalnym użytkowaniu reometru wykorzystuje się kształtki stożkowe lub płaskie, rys. 73 (takie jak w przypadku modelu nr 3 w stanowisku wizualizacyjnym).



Rys. 73. Kapilary pomiarowe reometru – Politechnika Bydgoska

W niniejszych badaniach zastosowano dysze o kształcie stożkowym oraz wielomianowym, zaprezentowane na ryss. 74 – 76.



Rys. 74. Rysunki kapilar pomiarowych (kolejno od lewej: Dysza zbieżna „C”, Dysza zbieżna „B”, Dysza zbieżna „A”, Dysza wielomianowa „A”, Dysza wielomianowa „B”, Dysza wielomianowa „C”)



Rys. 75. Dysze z kanałem zbieżnym



Rys. 76. Dysze wielomianowe

Do wykonania dysz wykorzystano stal 1.2316, która znana jest również jako X38CrMo16. Jest to stal z grupy materiałów narzędziowych do pracy na zimno, która jest bardzo odporna na korozję i zużycie. Dzięki temu jest przeznaczona do produkcji elementów maszyn oraz form do wtryskiwania tworzyw sztucznych. Ponadto, sprawdza się również tam, gdzie występuje środowisko działania agresywnych środków chemicznych, np. polimerów recyklingowych czy PCV. Podstawowym składnikiem wybranej stali są: węgiel, chrom, molibden, nikiel, a także dodatki takie jak krzem, mangan, fosfor i siarka. Stal cechuje się również dobrą polerowalnością. Jest przeznaczona także do produkcji stempli, matryc oraz narzędzi, od których wymaga się dużej odporności na korozję i zużycie. Dzięki dobrym właściwościom mechanicznym znalazła zastosowanie również w przemyśle motoryzacyjnym, medycznym, spożywczym i kosmetycznym [78].

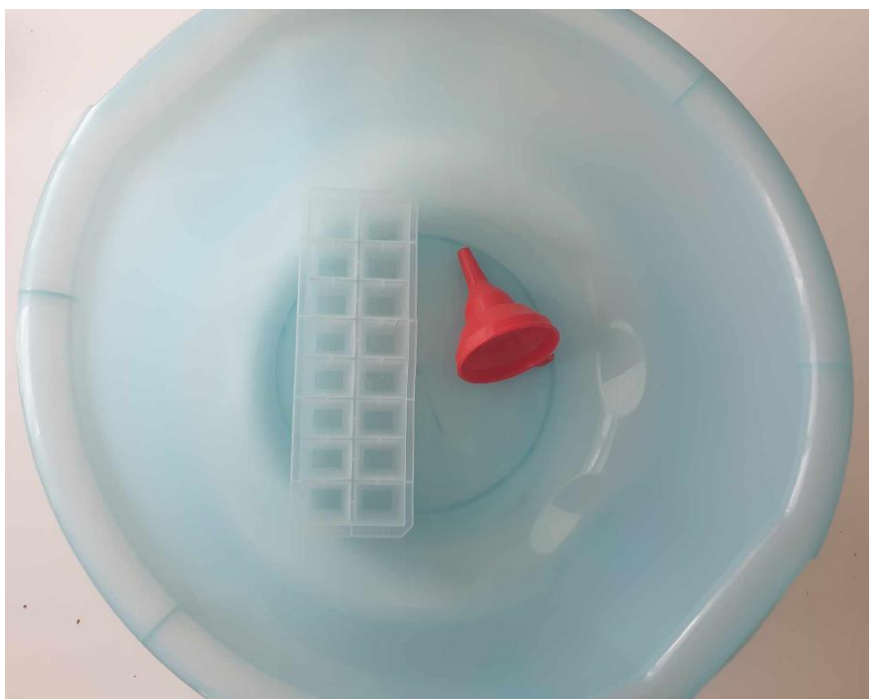
6.2. Specyfikacja materiału zastosowanego w eksperymencie

W celu przeprowadzenia badania za pomocą reometru kapilarnego dla każdej z dysz, należy uprzednio zamontować czujnik ciśnienia oraz kapilarę pomiarową i rozgrzać urządzenie do wybranej temperatury, po czym umieścić w cylindrze odpowiednią ilość granulek materiału. Następnym krokiem jest umieszczenie tłoka w przestrzeni między cylindrem a mechanizmem posuwu tłoka i włączenie procedury przesuwania tłoka. Polimerem wykorzystanym

w niniejszym badaniu jest polipropylen. Polipropylen to jeden z polimerów, który uzyskuje się na skutek niskociśnieniowej polimeryzacji⁴ propenu⁵. Stosowany jest przede wszystkim do:

- przewodów do wody i płynów agresywnych,
- wykładzin i dywanów,
- zbiorników,
- sprzętu medycznego (naczynia dla chorych, strzykawki, opakowania leków),
- obudów i izolacji,
- elementów karoserii samochodowej i wyposażenia pojazdów,
- elementów wyposażenia łazienki,
- przewodów gazowych, klimatyzacji i centralnego ogrzewania,
- opakowań spożywczych (słoje, butelki, pojemniki, folie),
- artykułów gospodarstwa domowego i zabawek [35].

Przykłady przedmiotów wykonanych z tego polimeru, pokazane są na rys. 77.



Rys. 77. Przedmioty wykonanych z polipropylenu

Polipropylen ma najmniejszą gęstość wśród stosowanych polimerów. Jest odporny na substancje takie jak kwasy, zasady, sole, a także rozpuszczalniki organiczne, szczególnie

⁴ Polimeryzacja – reakcja, w wyniku której związki chemiczne o małej masie cząsteczkowej zwane monomerami lub mieszanina kilku takich związków reagują same ze sobą, aż do wyczerpania wolnych grup funkcyjnych, w wyniku czego powstają cząsteczki o wielokrotnie większej masie cząsteczkowej od substratów, tworząc polimer [34].

⁵ Propen, propylen (C_3H_6) – organiczny związek chemiczny z grupy węglowodorów nienasyconych, otrzymywany jest z gazów krakingowych oraz w procesie pirolizy olefinowej.

w temperaturze pokojowej. Cechuje się dobrą przepuszczalnością powietrza, a przy tym niewielką przepuszczalnością pary. Jest to materiał łatwo obrabiany w przetwórstwie, jednakże należy unikać przekroczenia 270°C dla czystego polipropylenu, gdyż powyżej tej temperatury następuje przyspieszenie procesu degradacji polimeru. Aby temu zapobiec, producenci dodają środki przeciwdziałające tej niedogodności.

Polipropylen jest materiałem bezbarwnym, bezwonny, odpornym na działanie wody (absorpcja poniżej 0,03%), a także palnym. Jest przetwarzany poprzez wtryskiwanie, wytłaczanie, formowanie próżniowe, termiczne oraz wytłaczanie z rozdmuchem. Ponadto, elementy tego materiału można zgrzewać, spawać, zadrukowywać i metalizować. Kartę charakterystyki polipropylenu przedstawiono na rys. 78.



Moplen HP500N

Polipropylen, Homopolimer

Opis Produktu

Moplen HP500N jest homopolimerem przeznaczonym do wtrysku. Odznacza się dobrą płynnością połączoną z wysoką sztywnością.

Moplen HP500N jest odpowiedni do kontaktu z żywnością.

Charakterystyka Produktu

Status	Handlowy: Aktywny		
Stosowana Metoda Testu	ISO		
Dostępność	Europa, Afryka-Środkowy Wschód, Azja-Pacyfik		
Typowe Właściwości	Metoda	Wartość	Jednostka
Fizyczne			
Gęstość	ISO 1183	0.90	g/cm ³
Wsk. szybkości płynięcia (MFR) (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	12	g/10 min
Obj. wsk. szybkości płynięcia (230°C/2.16Kg)	ISO 1133	16	cm ³ /10min

Rys. 78. Karta charakterystyki polipropylenu, [79]

Wszystkie te cechy spowodowały, że polipropylen jest tworzywem wykorzystywanym w przemyśle chemicznym i farmaceutycznym, a także włókienniczym, elektrotechnicznym, elektronicznym, samochodowym, w budownictwie i meblarstwie, spożywczym. Jest to materiał masowego użytku. Sprawdza się również jako materiał konstrukcyjny oraz ulepszający właściwości niektórych materiałów budowlanych [8]. Wygląd granulek polipropylenu przedstawiono na rys. 79.



Rys. 79. Granulki polipropylenu

Wyróżnia się dwa rodzaje polipropylenów:

- a) Polipropylen PP-H – jest to homopolimer polipropylenu, który dzieli się na propylen syndioaktyczny, ataktyczny i izotaktyczny – każdy z nich jest tworzywem o właściwościach różniących się pod względem fizycznym i mechanicznym. Polipropylen PP-H stosuje się do budowy zbiorników chemicznych i wanien, a także płyt antystatycznych i pojemników na żywność. Znajdzie zastosowanie wszędzie tam, gdzie wymagana jest odporność na podwyższone temperatury, trudnopalność i właściwości antystatyczne.
- b) Polipropylen PP-C – homopolimer polipropylenu, na który składa się kopolimer blokowy polipropylenu oraz polietylenu – cechuje się lepszymi właściwościami mechanicznymi w niższych temperaturach niż homopolimer. Stosowany jest do budowy mniejszych zbiorników, pojemników na żywność, palet transportowych, obudów urządzeń i maszyn, a także produktów ortopedycznych [80].

W zależności od przeznaczenia materiału na produkt, który ma zostać utworzony od polimerów oczekuje się takich właściwości jak:

- odporność na działanie środków chemicznych,
- izolacyjność elektryczna,
- izolacyjność termiczna,
- duża wytrzymałości przy jednoczesnym zachowaniu lekkości,
- łatwa obróbka.

Materiał umieszczany w reometrze oraz postać, w jakiej wypływa on z urządzenia, przedstawiono na rys. 80.



Rys. 80. Materiał badany w reometrze (z lewej granulki – umieszczone w reometrze, z prawej – materiał wypływający z reometru)

6.3. Wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych w reometrze kapilarnym

W badaniach przeprowadzonych przy użyciu reometru mierzona jest siła wywierana przez czujnik nacisku umieszczony przy zakończeniu dyszy a także temperatura płynu na wyjściu. Dzięki sile oraz powierzchni tłoka możliwe jest wyznaczenie ciśnienia działającego na wlocie do wybranej kapilary. Okno programu obsługującego reometr kapilarny przedstawiono na rys. 81.



Rys. 81. Okno programu „Capillary Rheometer Control Center”- Politechnika Bydgoska

Wyniki badań ciśnienia zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5

Wynik ciśnienia dla zastosowanych dysz podczas badania reometrem kapilarnym

Dysza	Przepływ [mm ³ /min]				
	471,22	1451,42	4470,53	13769,64	42411,47
	Ciśnienie [kPa]	Ciśnienie [kPa]	Ciśnienie [kPa]	Ciśnienie [kPa]	Ciśnienie [kPa]
Kanał opisany nieciągłą pierwszą pochodną A	229,11	521,47	1104,79	1960,79	3262,36
Kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia A	299,39	649,38	1252,37	2223,63	3491,47
Kanał opisany nieciągłą pierwszą pochodną B	233,33	524,28	1089,33	1952,35	3048,71
Kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia B	253,00	559,42	1127,28	2009,98	3161,16
Kanał opisany nieciągłą pierwszą pochodną C	244,57	508,82	995,15	1765,41	2740,89
Kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia C	224,89	490,55	968,45	1703,57	2632,66

Na podstawie tych wyników można stwierdzić, że najmniejsze wartości ciśnienia dla dowolnego strumienia objętości przepływającego polipropylenu otrzymano dla dyszy opisanej wielomianem trzeciego stopnia z najbardziej wydłużoną sekcją badawczą. Wartości ciśnienia są zgodne z wynikami symulacji komputerowej przeprowadzonej w środowisku Ansys Fluent. Mniejsze ciśnienie związane jest z tym, iż polipropylen w łatwiejszy sposób przedostaje się przez dyszę, gdyż nie zachodzi potrzeba zwiększania ciśnienia w celu jego przetłoczenia. Okazuje się więc, że zmiana kształtu dyszy istotnie wpływa na zmniejszenie strat ciśnienia podczas przepływu przez kapilarę. Obecnie stosowane rozwiązanie, czyli stosowanie kanałów zbieżnych opisanych równaniem liniowym sprawia, że potrzebne są większe nakłady ciśnienia - a co za tym idzie - nakłady energii, na przetłoczenie polipropylenu.

Można również zauważyć, że dysze opisane wielomianem trzeciego stopnia o wymiarach „A” i „B” nie wykazują się lepszymi właściwościami w porównaniu do dysz zbieżnych o tych samych rozmiarach. Wyniki te potwierdzają badanie symulacyjne przeprowadzone w środowisku Ansys Fluent. W tabeli 6 zestawiono wyniki strat ciśnienia związanych ze zmianą kształtu kapilary. Wartość liczbowa ze znakiem minus oznacza obniżenie strat ciśnienia, natomiast wartość dodatnia oznacza zwiększenie strat ciśnienia.

Podobnie jak w eksperymencie numerycznym, okazało się, że najbardziej wydłużona dysza wielomianowa w pomiarach rzeczywistych dała najbardziej zadowalający wynik. Poprawa efektywności przetłaczania ze względu na zmniejszenie strat ciśnienia w odniesieniu do dyszy stożkowej o rozpiętości 120° (wymiar charakterystyczny „A”) wynosi 1,84% dla najmniejszego przepływu oraz 19,30% dla największego strumienia objętości przepływającego płynu.

Tabela 6

**Zestawienie wyników zysku ciśnienia w związku ze zmianą kształtu kapilary dla
eksperymentu z wykorzystaniem reometru kapilarnego**

Przepływ [mm ³ /min] Dysza	471,22	1451,42	4470,53	13769,64	42411,47
	Strata ciśnienia [%]	Strata ciśnienia [%]	Strata ciśnienia [%]	Strata ciśnienia [%]	Strata ciśnienia [%]
Kanał opisany nieciągłą pierwszą pochodną A	0	0	0	0	0
Kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia A	30,67	24,53	13,36	13,41	7,02
Kanał opisany nieciągłą pierwszą pochodną B	1,84	0,54	-1,40	-0,43	-6,55
Kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia B	10,43	7,28	2,04	2,51	-3,10
Kanał opisany nieciągłą pierwszą pochodną C	6,75	-2,43	-9,92	-9,96	-15,98
Kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia C	-1,84	-5,93	-12,34	-13,12	-19,30

7. Wpływ wytłaczania w kanale o nowym kształcie na degradację materiału

7.1. Wpływ temperatury – degradacja termiczna

Wymienione wcześniej rodzaje degradacji tworzyw sztucznych to degradacja środowiskowa, mechaniczna, hydrolityczna, termiczna, fotodegradacja, biodegradacja. Ze względu na proces, jakiemu poddano tworzywo sztuczne w niniejszych badaniach, mogło być ono narażone na naprężenia, czyli degradację mechaniczną, a także wpływ temperatury, czyli degradację termiczną. Nie zaobserwowano w laboratorium wpływu organizmów (biodegradacja), metali i związków chemicznych (degradacja środowiskowa), promieniowania (fotodegradacja), ani wpływu cząstek wody (degradacja hydrolityczna).

Odczyty temperatury w przepływającym w reometrze polipropylenu zestawiono w tabeli 7.

Tabela 7

Temperatura medium przepływającego przez kapilarę reometru

Dysza	12020 [A]	8220 [B]	4820 [C]	W12020 [A]	W8220 [B]	W4820 [C]
Średnia temperatura [°C]	230,04	229,96	229,98	229,99	230,42	230,13
Odchylenie od temperatury wzorcowej [%]	0,018	0,018	0,010	0,006	0,181	0,054

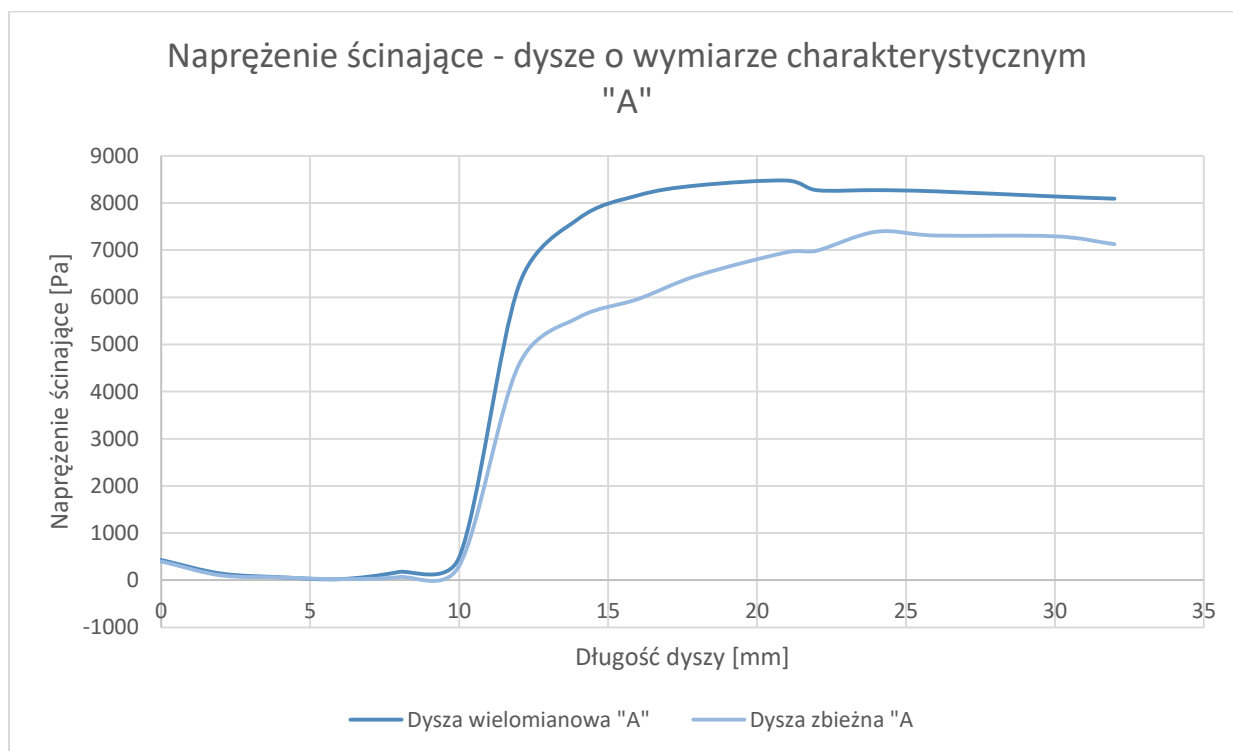
Na podstawie wyników temperatury zamieszczonych w tej tabeli można stwierdzić, że badania przy użyciu reometru nie spowodowały znaczącej zmiany temperatury przepływającego polimeru. Temperatura medium różniła się od założonej temperatury 230°C maksymalnie o 0,2%, co stanowi nieznaczną odchyłkę od normy. Eliminuje to potencjalną zmianę właściwości chemicznych⁶ pod wpływem podwyższonej temperatury. Oznacza to również, iż zmiana kształtu kapilary nie wpłynęła w żadnym z przypadków na znaczny wzrost lub obniżenie temperatury. Nie istnieje więc ryzyko degradacji termicznej lub ryzyko to jest znikome.

7.2. Degradacja mechaniczna

Degradacja to zjawisko negatywne, gdyż może powodować zmianę właściwości fizycznych, to znaczy może osłabić materiał. Wyniki przeprowadzonej symulacji oraz pomiarów eksperymentalnych w reometrze kapilarnym wskazują, że zmiana kształtu dyszy doprowadza

⁶ Dodatki polimerowe mogą w podwyższonej temperaturze reagować z polimerem.

do zmniejszenia ciśnienia przepływającego medium w badanym układzie. Odnosząc się do degradacji mechanicznej, która może wystąpić na skutek działania sił rozciągających [81], łagodniejsza zmiana średnicy kanału może przekładać się na osłabienie sił rozciągających, gdyż zapotrzebowanie na ciśnienie potrzebne do przetłoczenia zmniejsza się. Poniżej przedstawiono diagramy, rys. 82 – 84, zawierające rozkład naprężeń ścinających działających na ściany poszczególnych dysz.

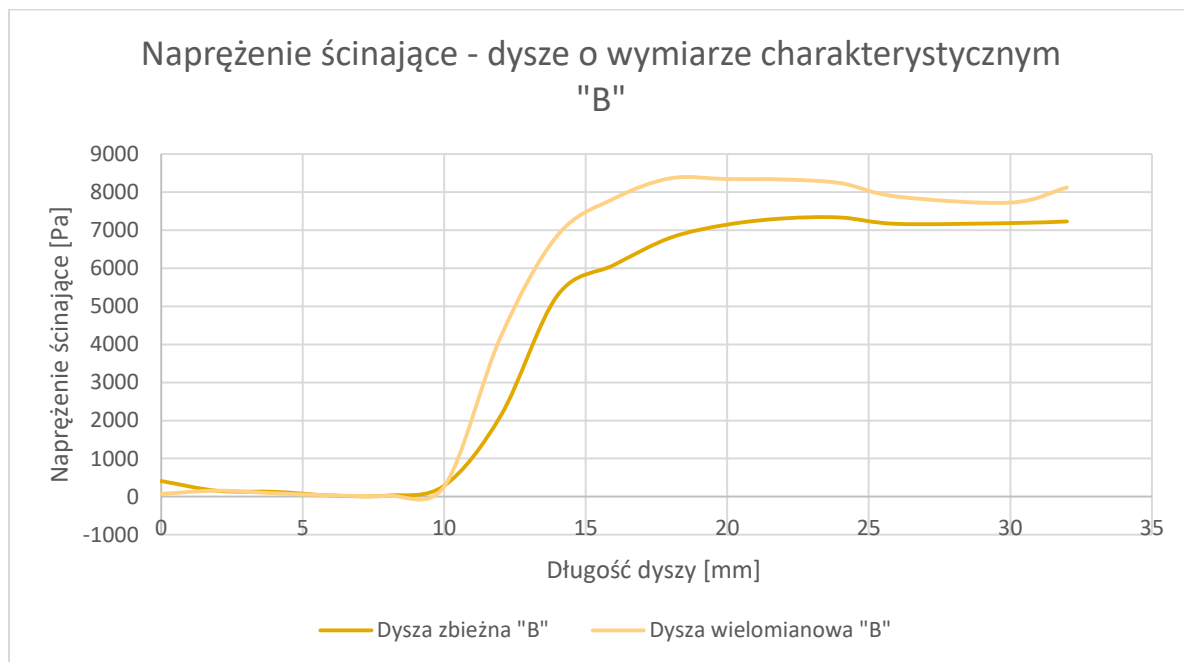


Rys. 82. Naprężenia ścinające działające na ścianę dyszy – dysze opisane wymiarem charakterystycznym „A”

Długość każdej z dysz mieści się pomiędzy wartością 0 (oznaczającej wlot) do wartości 32,18 (oznaczającej wylot). Na podstawie powyższych danych można zauważyć, że dysza wielomianowa o wymiarze charakterystycznym A cechuje się większymi wartościami naprężeń ścinających. Z powyższych danych wynika, iż istnieje mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia degradacji mechanicznej podczas przepływu polipropylenu przez kanał zbieżny o wymiarze charakterystycznym A. Dysza wielomianowa cechuje się natomiast przyspieszoną, w stosunku do dyszy zbieżnej, odpowiedzią na zmianę średnicy kanału. Maksymalna odnotowana wartość naprężenia dla dyszy zbieżnej to 7,4 kPa, natomiast dla dyszy wielomianowej 8,7 kPa, co stanowi wzrost o 17,6% w stosunku do dyszy bazowej.

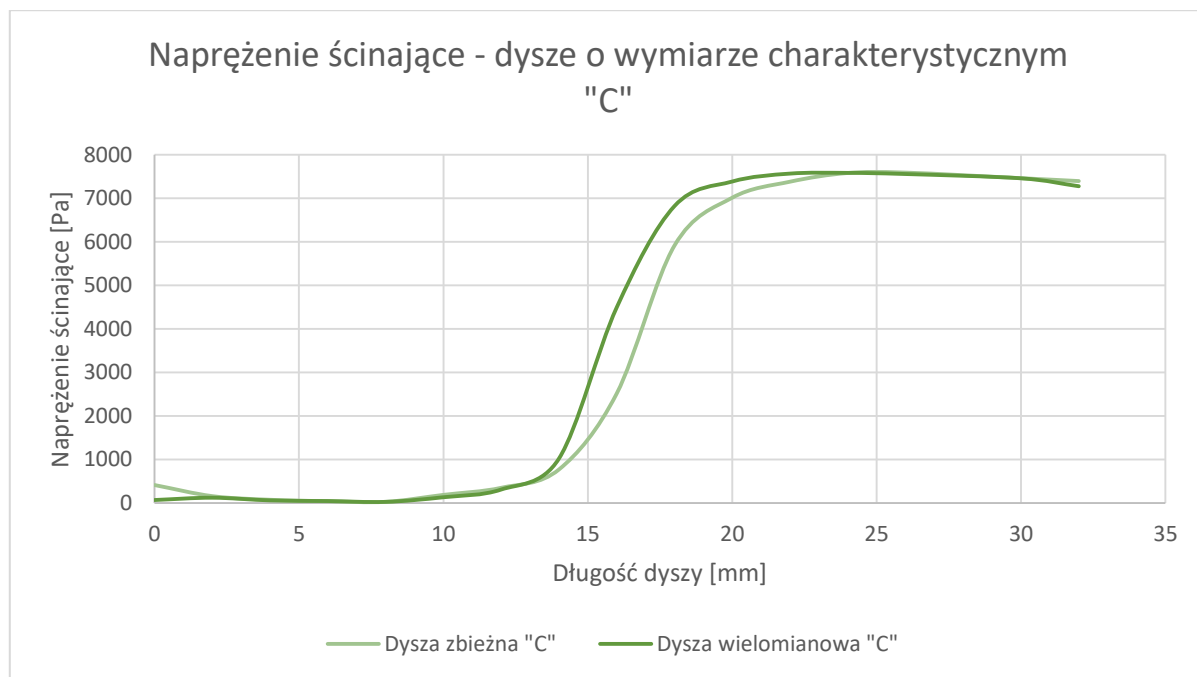
Zestawienie wyników dla dysz o wymiarze charakterystycznym B wskazuje, że mniejsze naprężenia ścinające występują dla dyszy zbieżnej. W sekcji wlotowej dysz wartości naprężeń

ścinających są porównywalne. Dysza wielomianowa cechuje się przyspieszoną, w stosunku do dyszy zbieżnej, odpowiedzią na zmianę średnicy kanału.



Rys. 83. Naprężenia ścinające działające na ścianę dyszy – dysze opisane wymiarem charakterystycznym „B”

Podobnie jak w przypadku dwóch poprzednich dysz, przepływ przez dyszę zbieżną wiąże się z mniejszym prawdopodobieństwem wystąpienia degradacji, w stosunku do dyszy wielomianowej. Maksymalna wartość naprężenia dla dyszy zbieżnej wynosi 7,66 kPa, natomiast dla dyszy wielomianowej wartość ta wynosi 8,63 kPa, co daje wzrost o 13,9% w stosunku do dyszy bazowej.



Rys. 84. Naprężenia ścinające działające na ścianę dyszy – dysze opisane wymiarem charakterystycznym „C”

Dysze najbardziej wydłużone w sekcji zmiany średnicy – opisane wymiarem charakterystycznym C – cechują się podobnym rozkładem naprężeń ścinających. Podobnie jak w przypadku poprzednich dysz, dysza wielomianowa charakteryzuje się przyspieszoną odpowiedzią na zmianę średnicy kanału, w zestawieniu z dyszą zbieżną. Maksymalna wartość naprężenia odnotowana dla dyszy zbieżnej wynosi 7,75 kPa, natomiast dla dyszy wielomianowej jest to wartość 7,77 kPa, co stanowi wzrost o 0,4% w stosunku do dyszy bazowej.

W tabeli 8 zestawiono maksymalne naprężenia występujące w badanych kształtach oraz procentowy wzrost wartości naprężeń w odniesieniu do dyszy zbieżnej opisanej wymiarem charakterystycznym A.

Tabela 8

Wartości naprężenia występującego w zwężonej sekcji kapilary

Wymiar charakterystyczny	Typ kanału	Maksymalna wartość naprężenia [kPa]	Wzrost naprężenia
A, H	Dysza zbieżna	7,4	0%
A, H	Dysza wielomianowa	8,7	17,6%
B, H	Dysza zbieżna	7,7	3,5%
B, H	Dysza wielomianowa	8,6	16,6%
C, H	Dysza zbieżna	7,7	4,7%
C, H	Dysza wielomianowa	7,8	5,1%

Na podstawie powyższych analiz można stwierdzić, że najmniejsze ryzyko pojawienia się degradacji mechanicznej występuje w dyszy zbieżnej o wymiarze charakterystycznym A oraz w dyszy zbieżnej o wymiarze charakterystycznym B. Maksymalne wartości naprężeń ścinających odnotowuje się tuż za zmianą średnicy kanału, natomiast wartości najmniejsze w centralnej części sekcji wlotowej (na odcinku 22 mm dyszy). Zastosowanie kształtu wielomianowego powoduje zwiększenie naprężeń ścinających. Wydłużenie sekcji, w której dochodzi do zmiany średnicy dyszy, powoduje obniżenie wartości naprężeń ścinających ściany dla dysz wielomianowych. Dla dysz wielomianowych o wymiarze charakterystycznym „B” oraz „C” obserwuje się także zmniejszenie wartości naprężenia przy wylocie z dyszy w zestawieniu z dyszami zbieżnymi.

8. Omówienie wyników i wnioski

Badania symulacyjne zostały potwierdzone przez badania rzeczywiste oraz eksperyment wizualizacyjny. Badania symulacyjne wykazały, że strata ciśnienia w odniesieniu do dyszy zbieżnej „A” w dyszy wielomianowej „C” zmniejszyła się o 20 %. W porównaniu z dyszą zbieżną „A” dysza zbieżna „C” wykazała spadek ciśnienia o 20%. W zestawieniu z dyszą zbieżną „C” dysza wielomianowa „C” wykazuje zmniejszenie strat o 0,08%. W przypadku pozostałych dysz wielomianowych również zauważono nieznaczne zmiany w stratach ciśnienia. Dysza wielomianowa „A” zwiększa straty ciśnienia w stosunku do dyszy zbieżnej „A” o 7,2 %. Dysza wielomianowa „B” w stosunku do dyszy zbieżnej „A” zmniejsza je o 3,3%. W porównaniu z dyszą zbieżną „B” dysza wielomianowa „B” wykazuje się zwiększeniem strat ciśnienia o 3,7%.

Tendencja badań symulacyjnych została zachowana w badaniach eksperymentalnych wykonanych reometrem kapilarnym. Przy mniejszym przepływie (strumieniu objętości) zarówno dysze wielomianowe jak i dysze opisane nieciągłą pierwszą pochodną (zbieżne) wykazują się mniejszymi zyskami energetycznymi w zestawieniu z większymi przepływami strumienia płynu. Im większy strumień objętości, tym straty ciśnienia w odniesieniu do dyszy bazowej są mniejsze.

W badaniach reometrem kapilarnym największe zyski energetyczne zostały zauważone dla największego strumienia przepływającego płynu. Strata ciśnienia w odniesieniu do wzorcowej dyszy zbieżnej „A” zmniejszyła się o 19,3% w dyszy wielomianowej „C”.. Dysza zbieżna „A” w zestawieniu z dyszą zbieżną „C” wykazała spadek ciśnienia o 16%. W porównaniu z dyszą zbieżną „C”, dysza wielomianowa „C” wykazuje zmniejszenie strat o 3,9%. W przypadku dysz, w których badana sekcja nie została wydłużona, dysza wielomianowa „A” powoduje zwiększenie strat ciśnienia o 7% w porównaniu do dyszy zbieżnej „A”. Dysza wielomianowa „B” w stosunku do dyszy zbieżnej „A” zmniejsza straty o 3,1%. Porównując dyszę zbieżną „B” z dyszą wielomianową „B” dysza wielomianowa wykazuje zwiększenie strat o 3,6%.

Wyniki liczby Reynoldsa, znajdujące się w przedziale od $5 \cdot 10^{-12}$ do $2,5 \cdot 10^{-11}$ wskazują na brak przepływu turbulentnego, tak więc ruch płynu jest stateczny (laminarny), stąd też wykonane zostały obliczenia dla przepływu laminarnego. Wpływ liczby Reynoldsa na straty ciśnienia jest więc znikomy – człon konwekcyjny nie ma w tym przypadku wpływu

Poprawa przepływu przez dyszę wielomianową opisaną wymiarem charakterystycznym „C” w symulacji wynosi 20%, natomiast w eksperymencie rzeczywistym wynosi 19,3%.

Przeprowadzenie obu eksperymentów wykazało, że możliwa jest poprawa w kierunku zmniejszenia strat ciśnienia. Wydłużenie sekcji zmiany średnicy w prawie każdym z przypadków dało pozytywny rezultat w postaci obniżenia strat ciśnienia. Wyjątek stanowią dysze o kształcie opisanym nieciągłą pierwszą pochodną (dysze zbieżne) o wymiarze „B” oraz „C” dla małych strumieni objętości. Dla największego strumienia objętości w eksperymencie z reometrem kapilarnym wydłużenie sekcji, w której ma miejsce zmiana średnicy w dyszach opisanych nieciągłą pierwszą pochodną spowodowało obniżenie ciśnienia o 6,6% w dyszy zbieżnej „B” oraz o 16% w dyszy zbieżnej „C” w porównaniu z dyszą zbieżną „A”. Dla najmniejszego strumienia objętości zaobserwowano wzrost strat ciśnienia w dyszy zbieżnej „B” o 1,8% oraz w dyszy zbieżnej „C” o 6,6% w zestawieniu z dyszą zbieżną „A”.

Porównując dysze wielomianowe, w kształcie opisanej wymiarem charakterystycznym „B” zauważono obniżenie strat ciśnienia o 9,5% , natomiast w dyszy wielomianowej „C” o 24,6% w porównaniu z dyszą wielomianową „A” dla największego strumienia objętości. Dla najmniejszego badanego strumienia objętości w dyszy wielomianowej „B” zauważono obniżenie strat ciśnienia o 15,5% , natomiast w dyszy wielomianowej „C” obniżenie o 24,9% w porównaniu z dyszą wielomianową „A”.

Straty w dyszach o nieergonomicznym kształcie spowodowane są występowaniem w nich większych stref zastoju płynu, które hamują przepływ. W dyszy najbardziej wydłużonej wielomianowej „C” strefy zastoju płynu występują jedynie w cienkiej strefie przyściennej. Podobny rezultat wykazał eksperyment wizualizacyjny i symulacyjny z wodą i opiłkami metalu oraz wodnym roztworem karboksymetylocelulozy. Zastosowanie kształtu, w którym zmiana średnicy nie jest odpowiednio wyprofilowana, powodowało powstanie zauważalnych stref zastoju płynu. Zastosowanie w kanale dyszy z „płynnym” przejściem zniwelowało ten problem.

Przeprowadzenie eksperymentu wizualizacyjnego wskazywało, że przejście ze średnicy większej do mniejszej przy wykorzystaniu modelu nr 3 nie jest pożądane ze względu na zaburzenia przepływu płynu (model nr 3 na stanowisku wizualizacyjnym). Zainstalowanie kształtów wielomianowych i krzywej opisanej nieciągłą pierwszą pochodną dało lepszy rezultat, jednakże nie można było jednoznacznie stwierdzić, czy któraś z dysz okazała się bardziej odpowiednia od pozostałych. Wpływu wydłużenia sekcji zmiany kształtu średnicy na charakter przepływu płynu również nie dało się dokładnie oszacować na podstawie eksperymentu wizualizacyjnego. Dlatego konieczne było przeprowadzenie symulacji komputerowej. Symulacja jednoznacznie wykazała, że wydłużenie wybranej sekcji obniża straty energii. Ponadto, wprowadzenie rozwiązania w postaci dyszy o kształcie wielomianu także dało pewne zyski ciśnienia.

W celu potwierdzenia wyników symulacji przeprowadzono eksperyment doświadczalny, w którym wykorzystano reometr kapilarny i nowo utworzone dysze zgodne z kształtami zastosowanymi w symulacji. Po przeprowadzeniu serii pomiarów dla każdej z dysz oraz opracowaniu danych stwierdzono, że wyniki eksperymentu na stanowisku laboratoryjnym są zbieżne z wynikami symulacji komputerowej.

Badanie przy wykorzystaniu reometru kapilarnego wykluczyło możliwość wystąpienia degradacji termicznej. Temperatura przepływającego przez dyszę polimeru w obu przypadkach pozostawała stała. Badania symulacyjne pod kątem wystąpienia degradacji mechanicznej pokazały, że zmiana kształtu dysz na te opisane wielomianem trzeciego stopnia może w niewielkim stopniu wpłynąć na wystąpienie degradacji. Szczególnie dotyczy to dysz wielomianowych opisanych wymiarem charakterystycznym „A” i „B”.

ZAKOŃCZENIE

Wyroby i elementy z tworzyw sztucznych są wykorzystywane na każdym kroku w wielu dziedzinach i gałęziach gospodarki. Kompozyty tworzyw sztucznych są obecne w codziennym funkcjonowaniu człowieka. Wszelkie urządzenia elektryczne i elektroniczne, takie jak laptopy, telefony, sprzęty AGD, a także pojazdy, elementy infrastruktury, meble, materiały budowlane, pojemniki na żywność, produkty chemiczne oraz wiele innych elementów codziennego użytku są zbudowane z tworzyw sztucznych bądź posiadają elementy wykonane z polimerów i ich pochodnych. Tak powszechne stosowanie wymaga wykorzystywania do produkcji tychże elementów odpowiednich maszyn i urządzeń. Ze względu na coraz większe restrykcje związane z ochroną środowiska podejmowane są próby bardziej ekologicznego wytwarzania wszelkich dóbr. Dzięki powszechności tworzyw sztucznych oraz używanych do ich przetwórstwa i wytwarzania wtryskarek i wylączarek zastosowanie bardziej ergonomicznego kształtu dyszy jest wskazane. Wylączarki i wtryskarki to urządzenia wykorzystywane także w wielu innych gałęziach przemysłu. Za ich pośrednictwem, po odpowiednim dostosowaniu do potrzeb przedsiębiorstwa, można nimi przetłaczać inne media, które bardzo często posiadają właściwości płynu nienewtonowskiego. Dlatego proponowane w rozprawie udoskonalenie może dać efekty w postaci zysków energetycznych także w innych gałęziach przemysłu i przetwórstwa.

Badania przedstawione w niniejszej pracy przeprowadzono za pomocą reometru. Przełożenie kształtu dyszy do innych urządzeń i jego skuteczność należałoby dokładnie zweryfikować. Jeśli dla polipropylenu, który jest płynem nienewtonowskim, zaistniały oszczędności energii na skutek zmiany kształtu kanału w którym płyną, to może to mieć zastosowanie również dla innych płynów nienewtonowskich. Badania przeprowadzono dla polipropylenu Moplen HP500N. W celu sprawdzenia pokrewnych cech dla innych materiałów polimerowych należałoby podjąć kolejne badania. W zależności od zastosowanego materiału lub substancji można uzyskać mniejsze lub większe zyski energetyczne.

Energia potrzebna do przetłoczenia płynu to jedynie ułamek wartości energii, która jest potrzebna na zasilenie innych elementów składających się na urządzenia do przetłaczania. Jednakże ze względu na aspekty ekologiczne szuka się możliwych ulepszeń i oszczędności na każdym polu.

Badania innych autorów, które opisano w części pracy, przeprowadzone na rzecz ulepszenia wtryskarek i wylączarek wskazują, że istnieje potrzeba poprawy parametrów wytłaczania na wielu polach i w wielu elementach wtryskarek i wylączarek.

Praca miała na celu dążenie do zmniejszenia strat ciśnienia przy przepływie płynu nienewtonowskiego. Problem badawczy rozwiązano poprzez zmodyfikowanie geometrii kanału na kilka sposobów. Przeprowadzono eksperyment wizualizacyjny nakreślający charakter problemu. Przeprowadzono również pomiary symulacyjne w programie pozwalającym na badanie mechaniki płynów omawianego przypadku. Dodatkowo, podjęto się również badania na stanowisku laboratoryjnym – reometrze kapilarnym – w warunkach rzeczywistych. Zastosowanie kilku metod pozwoliło na bardziej poprawną weryfikację wyników. Potwierdzono tezę, iż poprawa kształtu dyszy spowodowała zmniejszenie zalegania materiału przepływającego przez kanał zbieżny. Potwierdzono także brak wpływu zmiany kształtu na degradację wybranej substancji. Poprawa kształtu dyszy spowodowała zmniejszenie strat ciśnienia przepływającego płynu.

Kształt opisany wielomianem trzeciego stopnia o wymiarze charakterystycznym „C” wykazał korzystniejsze parametry przepływu niż w przypadku kanału zbieżnego opisanego równaniem liniowym o tym samym kształcie. Wykonano także założone w pracy zadania, między innymi zweryfikowano zachowanie się płynu nienewtonowskiego przy przepływie przez kanał zbieżny oraz przez kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia. Ponadto, opracowano zmodyfikowane dysze, które można wykorzystać do pomiarów w reometrze kapilarnym oraz skonfrontowano wyniki badań symulacyjnych z wynikami pochodzącymi z modelu rzeczywistego.

Symulacje komputerowe stały się nieocenionym narzędziem przy prowadzeniu badań naukowych oraz przy działaniach zmierzających do optymalizacji procesów inżynierskich. Dotychczas istniejący podział mechaniki płynów na teoretyczny i eksperymentalny należy uzupełnić o mechanikę numeryczną płynów [82]. W związku z postępem i wykorzystaniem nowej dyscypliny prowadzenia badań należy zwrócić uwagę na wiarygodność obliczeń numerycznych. Jest to bardzo istotne, gdyż opierając się o wyniki badań symulacji komputerowych dąży się do wyjaśnienia pewnych zjawisk fizycznych. W celu oceny poprawności i dokładności wyników pochodzących z obliczeniowej mechaniki płynów przeprowadza się weryfikację oraz walidację. Weryfikacja to proces, który ma za zadanie odpowiedzieć na pytanie, czy wybrane równania opisujące badany model zostały poprawnie rozwiązane. Natomiast walidacja to proces, który odpowiada na pytanie, czy w celu zamodelowania procesu fizycznego zostały rozwiązane odpowiednie równania. Definicje obu procedur mają doprowadzić badacza do sprawdzenia i oszacowania błędów, które wynikają z wykorzystania metod numerycznych do rozwiązania równań modelu, a także do oszacowania tego, czy wybrano poprawny model [86]. W niniejszej pracy zaprezentowano weryfikację

i walidację oraz przedstawiono wyniki tychże działań. Dzięki przeprowadzeniu obserwacji i pomiarów przy użyciu stanowiska wizualizacyjnego, symulacji numerycznej oraz badaniu reometrem kapilarnym z autorskimi dyszami stwierdzono, że wyniki są zbieżne dla wybranych metod. Wykazane w pracy udoskonalenie w postaci modyfikacji kształtu dyszy, może być szeroko stosowane w urządzeniach wytłaczarskich, wtryskarkach i prasach, które współpracują z płynami nienewtonowskimi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] <https://sjp.pwn.pl/sjp/;2501421> (dostęp: 2.10.2023)
- [2] <https://sjp.pwn.pl/sjp/ciecz;2449097.html> (dostęp: 10.02.2024)
- [3] <https://sjp.pl/ciecz> (dostęp: 10.12.2023)
- [4] <https://zpe.gov.pl/a/gazy-ciecze-i-ciala-stale/D1Cy4qgUe> (dostęp: 10.02.2024)
- [5] Drygas W., Jegier A.: *Zalecenia dotyczące aktywności ruchowej w profilaktyce chorób układu krążenia*. Katedra Medycyny Społecznej i Zapobiegawczej Akademii Medycznej w Łodzi. Czynniki ryzyka 2003.
- [6] Wasilewski J., Kiljański T.: *Biomechaniczna przyczyna miażdżycy*. Monografie Politechniki Łódzkiej, 2011.
- [7] Dziubiński M.: *Podstawy teoretyczne i metody pomiarowe reologii*, Monografie Politechniki Łódzkiej 2014.
- [8] Oleksy M., Heneczkowski M., Mossety-Leszczak B.: *Elementy reologii w przetwórstwie tworzyw polimerowych – materiały pomocnicze*, Zakład Technologii Tworzyw Sztucznych Wydziału Chemicznego Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2013.
- [9] <https://fluidflow.pl/ciecz-nienewtonowska> (dostęp: 23.02.2024)
- [10] Schramm G.: *Reologia podstawy i zastosowania*, Ośrodek wydawnictw naukowych Poznań 1998
- [11] Paradowski M.B.: *Wizualizacja danych – dużo więcej, niż prezentacja*. Lublin: Wiedza i Edukacja, 2011, s. 37-60.
- [12] Liu X, Fan Y, Deng X, Zhan F.: *Effect of non-Newtonian and pulsatile blood flow on mass transport in the human aorta*. J Biomech. 2011, 44(6):1123–1131.
- [13] Soulis JV, Fytanidis DK, Papaioannou VC, Styliadis H, Giannoglou G.: *Oscillating LDL accumulation in normal human aortic arch-shear dependent endothelium*. Hippokratia, 2011, 15:22–25.
- [14] Vasava P, Jalali P, Dabagh M, Kolari P.: *Finite element modelling of pulsatile blood flow in idealized model of human aortic arch: study of hypotension and hypertension*. Comput Math Methods Med., 2012, <http://dx.doi.org/10.1155/2012/861837>.
- [15] Jhunjhunwala P., Padole P. M., Thombre S. B.: *CFD analysis of pulsatile flow and non-Newtonian behavior of blood in arteries*. Molecular & Cellular Biomechanics 2015(12): 37-47.

- [16] Losito A., Fagugli R., Zampi I., Parente B., De Range P., Giordano G., Cao P.: *Comparison of Target Organ Damage in Renovascular and Essential Hypertension*, American journal of Hypertension, 1996.
- [17] Uzu T., Inoue T., Fujii T., Nakamura S., Inenaga T., Yutani C., and Kimura G.: *Prevalence and Predictors of Renal Artery Stenosis in Patients With Myocardial Infarction*, American Journal of Kidney Diseases. 5, 1997, 733-738.
- [18] Hunt J., Sheps S., Harrison E., Strong C., Bernatz P., Minn R.: *Renal and Renovascular Hypertension*, Arch Intern Med. 133, 1974.
- [19] Juszkat R., Kostka-Jeziorny K., Karczewski M., Głyda M., Tykarski A.: *Plastyka zwężenia tętnicy nerkowej przeszczepionej nerki*, ISSN 1428-5851.
- [20] Boudewijn G., Vasbinder C., P.Nelemans P., Kessels A., Kroon A., Maki J., Leiner T., Beek F., Korst Flobbe M., De Haan M., Van Zwam W., Postma C., Hunink M., De Leeuw P., Van Engelshoven J.: *Accuracy of Computed Tomographic Angiography and Magnetic Resonance Angiography for Diagnosing Renal Artery Stenosis*, Ann Intern Med. 2004, 141:674-682.
- [21] Głuszek J., Januszewicz A.: *Zalecenia dotyczące diagnostyki i leczenia chorych z nadciśnieniem tętniczym spowodowanym zwężeniem tętnicy nerkowej (nadciśnieniem naczyniowo-nerkowym)*, Grupa Robocza Polskiego Towarzystwa Nadciśnienia Tętniczego pod przewodnictwem Jerzego Głuszka, 2006.
- [22] Krijnen P., Van Jaarsveld B., Deinum J., Steyerberg E., Habbema J.: *Which patients with hypertension and atherosclerotic renal artery stenosis benefit from immediate intervention?* Journal of human Hypertension. 2004, 18, 91–96. doi:10.1038/sj.jhh.1001641.
- [23] Lewandowska N., Mosiężny J.: *Meshing strategy for bifurcation arteries in the context of blood flow simulation accuracy*, E3S Web of Conferences - 2019, vol. 128, s. 02003-1-02003-6.
- [24] Kowal P., Marcinkowska-Gapińska A.: *Przegląd matematycznych modeli reologicznych w badaniach krwi*. Neuroskop, 2010, nr 12.
- [25] Lewandowska N., Ciałkowski M.: *A new concept of surgical patch used in vascular surgery*, E3S Web of Conferences - 2019, vol. 128, s. 02004-1-02004-5
- [26] Sekou G., Y. Li T., Marie-France Héту, Pang S., Ewart P., Johri A.: *Relationship between carotid artery atherosclerosis and bulb geometry*, The International Journal of Cardiovascular Imaging, Volume 34, pages 1081–1090, 2018.

- [27] Lewandowska N., Ciałkowski M., Ziegler B., Jójka J.: *Impact of the artery diameter and the surgical patch geometry on the boundary layer thickness and wall shear stresses distribution*, Energy - 2020, vol. 197.
- [28] Izdebska E., Wojciechowska M.: *Profilaktyka nadciśnienia tętniczego*, Medycyna Ogólna i Nauki o Zdrowiu 20(49), 2014.
- [29] Rosińska A.(Nowakowska): *Zwężenie tętnicy nerkowej. Badanie numeryczne wpływu geometrii na zaburzenia przepływu krwi*, W: Na pograniczu chemii, biologii i fizyki – rozwój nauk. Tom 3 / red. Edward Szłyk, Sylwia Grabska-Zielińska, Anna Kmieciak, Anna Filipiak-Szok - Toruń, Polska : Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2022 - s. 291-302
- [30] Pielichowski J., Puszyński A.: *Chemia polimerów*, Kraków: Wydawnictwo „Teza”, 2004, ISBN 83-920988-0-3, OCLC 749409811.
- [31] Praca zbiorowa, „Chemia polimerów”, red. Zbigniew Florjańczyk, Stanisław Penczek, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 2002, tom 1 i 2, ISBN 83-7207-368-6.
- [32] Osiecka E.: *Materiały budowlane. Tworzywa sztuczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005, ISBN 83-7207-540-9, OCLC 69455908.
- [33] Brandrup J., Immergut E., Grulke E.: *Polymer Handbook*, Willey VCH, 2003, ISBN 978-0-471-47936-9.
- [34] Praca zbiorowa, „Chemia polimerów”, red. Florjańczyk Z., Penczek S., Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 2002, tom 1, ISBN 83-7207-368-6.
- [35] Koszkuł J.: *Polipropylen i jego kompozyty*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 1999.
- [36] <http://beta.chem.uw.edu.pl/people/JSkupinska/ChF2cw4/cw4.htm> (dostęp: 12.04.2024)
- [37] Biernacki K.: *Model reologiczny warstwy przyściennej smaru plastycznego*, Tribologia, nr 5, 2007, ISSN: 0208-7774.
- [38] Brzozowska T., Zieliński J.: *Badanie reologicznych właściwości kompozycji polimerowo-pakowych*, Polimery 2006, 51, nr 3.
- [39] Kuźniar P., Gorzelany J., Lenik J., Migut D., Witek G.: *Wpływ temperatury na właściwości reologiczne syropów z płatków i owoców róży*, Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego 2017, 21.
- [40] Saechtling H.: *Tworzywa sztuczne. Poradnik*. WNT. Warszawa 2000.
- [41] Rojek M.: *Metodologia badań diagnostycznych warstwowych materiałów kompozytowych o podstawie polimerowej*, Scientific International Journal of the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering, vol. 2, 2011.

- [42] Cypryk M.: *Application of ^{29}Si NMR spectroscopy in organosilicon polymers' investigations*, Polimery, 52(10), 730-735, 2022.
- [43] Wilczyński K.: *Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2018.
- [44] Wilczyński K.: *Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych*, WNT, Warszawa 2001.
- [45] Sikora R., Bociąga E.: *Wybrane zagadnienia przepływu tworzywa w formie wtryskowej*, Polimery 2003, 48 nr 2.
- [46] Boral P., Nieszporek T.: *Analiza geometryczna układu uplastyczniającego wylączarki złożonego z dwóch ślimaków stożkowych*, Polimery 2012, 57, nr 7-8.
- [47] Wilczyński K., Buziak K.: *Badanie przepływu polimerowych kompozytów drzewnych w procesie wytłaczania jednoślیمakowego z dozowanym zasilaniem*, Polimery 2017, 62, nr 9.
- [48] Wilczyński K., Szymaniak Z., Nastaj A.: *Modelowanie MES procesu wytłaczania jednoślیمakowego*, Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych, 2016.
- [49] Wilczyński K., White J. L.: *Modelowanie procesu wytłaczania dwuślیمakowego cz. I. Model wytłaczania przeciwbieżnego*, Polimery 2008, 53, nr 10.
- [50] Wilczyński K., White J. L.: *Modelowanie procesu wytłaczania dwuślیمakowego cz. II. Weryfikacja modelu*, Polimery 2009, 54 nr 1.
- [51] Wilczyński K., Nastaj A.: *Modelowanie procesu wytłaczania jednoślیمakowego mieszanin polimerów z zastosowaniem ślimaków niekonwencjonalnych i dozowanego zasilania wylączarki*, Polimery 2016, 61 nr 5.
- [52] Wilczyński K., Lewandowski A.: *Modelowanie przepływu tworzyw w procesie wytłaczania dwuślیمakowego przeciwbieżnego cz. I. Symulacja przepływu*, Polimery 2010, 55 nr 11-12.
- [53] Sikora R., Sasimowski E.: *Przepływ poprzeczny tworzywa w ślimakowym układzie uplastyczniającym*, Polimery 2001, 46, nr 3.
- [54] Stasiek A.: *Wpływ cech konstrukcyjnych ślimaków na degradację tworzywa w procesie wytłaczania dwuślیمakowego*, Teki Kom. Bud. Eksp. Masz. Elektrotech. Bud. – OL PAN, 2008, 171-175.
- [55] Stasiek J.: *Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych ślimaków układów uplastyczniających oraz warunków procesu wytłaczania na właściwości kompozytu polipropylenowego*, Polimery 2005, 50, nr 11-12.
- [56] Wilczyński K., Szymaniak Z., Nastaj A.: *Badanie za pomocą systemu Polyflow wpływu warunków przepływu na rozszerzanie strugi polimerów*, Polimery 2002, 47 nr 2.

- [57] Bociąga E.: *Modelowanie procesu wypełniania gniazda formy wtryskowej*, Polimery 2002, 47 nr 26.
- [58] Bociąga E.: *Analiza przepływu tworzywa w kanałach formy wtryskowej*, Akademia Techniczno – Rolnicza im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy, Zeszyty Naukowe nr 246 – Chemia i Technologia Chemiczna 11 (2006).
- [59] Bociąga E., Jaruga T.: *Badania mikroskopowe przepływu tworzywa w kanałach 16-gniazdowej formy wtryskowej*, Polimery 2006, 51, nr 11-12.
- [60] Kłodziński A., Sterzyński T.: *Ocena poprawek w pomiarach reometrycznych polietylenu cz. I. Poślizg przy ściance kanału*, Polimery 2007, 52, nr 7-8.
- [61] Azdast T., Behraves A. H., Mazaheri K., Darvishi M. M.: *Numerical simulation and experimental validation of residual stress induced constrained shrinkage of injection molded parts*, Polimery 2008, 53, nr 4.
- [62] Diakun J., Michalska-Požoga I.: *Symulacja przemieszczania się cząstek polietylenu w tarczowej strefie wylaczarki*, Polimery 2004, 49, nr 11.
- [63] Iwko J., Wroblewski J., Steller R.: *Experimentl study on Energy consumption in the plasticizing unit of the injection molding machine*, Polimery 2018, 63, nr 5.
- [64] Sikora J. W., Kapuśniak T.: *Efektywność procesu wytłaczania a charakterystyka dyszy stożkowo-walcowej głowicy wylaczarskiej*, Polimery 2005, 50, nr 10.
- [65] Sasimowski E.: *Badania efektywności działania wylaczarki nowej generacji cz. IV. Porównanie funkcjonowania modelu wylaczarki i jej prototypu*, Polimery 2013, 58, nr 7-8.
- [66] Sasimowski E.: *Badania efektywności działania wylaczarki nowej generacji cz. II. Ukształtowanie powierzchni wewnętrznej tulei obrotowej cylindra*, Polimery 2012, 57, nr 4.
- [67] Wilczyński K., Narowski K.: *Badania symulacyjno – doświadczalne nierównomiernego wypełniania wielogniazdowych form wtryskowych zrównoważonych geometrycznie*, Polimery 2015, 50, nr 6.
- [68] Nabiałek J., Koszkuł J.: *Badania wizualizacyjne przepływu tworzyw termoplastycznych w procesie wtryskiwania*, Akademia Techniczno – Rolnicza im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy, Zeszyty Naukowe nr 246 – Chemia i Technologia Chemiczna 11 (2006).
- [69] Bociąga E.: *Doświadczalne metody badania przepływu tworzywa w kanałach form wtryskowych*, Polimery 2007, 52, nr 3.

- [70] Bociąga E.: Jaruga T., *Powstawanie obszarów łączenia strumieni tworzywa w wypraskach z wielogniazdowej formy wtryskowej*, Polimery 2009, 54, nr 9.
- [71] Peryt-Stawiarska S.: Wasilewski J., *Możliwości zastosowania metody CFD do symulacji przepływu płynów nienewtonowskich*, I Polska Konferencja Reologiczna, Streszczenia komunikatów, 2010.
- [72] Kiljański T.: *Metody pomiaru własności lepkością*, Inż. Ap. Chem. 53 (5), 2014.
- [73] Tor-Świątek A.: *Ocena efektywności procesu wytłaczania mikroporującego polietylenu małej gęstości, Eksploatacja i niezawodność*, Vol. 15, No. 3, 2013.
- [74] Ferziger J. H., Perić M., Street R. L.: *Computational Methods for Fluid Dynamics*, “Springer”, 2020.
- [75] Kohnke P.: *Finite Element Systems*, Kalifornia Brebbia, Houston, USA, 1982.
- [76] Wilczyński K.: *Wyznaczanie krzywych lepkości na podstawie ograniczonej liczby pomiarów reometrycznych*, Polimery 2017, 62, nr 6.
- [77] Zajchowski S., Tomaszewska J., Lewandowski K.: *Właściwości mieszanin polimerowych z mączką drzewną, Biokompozyty z surowców odnawialnych*, pod red. S. Kuciel, H. Rydarowski, Wyd. Politechnika Krakowska, Kraków 2012, s. 134-163
- [78] Blicharski M.: *Inżynieria Materiałowa – Stal*, Wydawnictwo WNT, 2016.
- [79] <https://www.lyondellbasell.com/en/polymers/p/Moplen-HP500N/e8c2d3bb-d271-459f-a439-629a5d85a7da> (dostęp: 1.08.2024)
- [80] Rygiel S., Kozioł W., Jasnosz J., Kawa D., Kwiecień I.: *Tarnowskie tworzywa konstrukcyjne. Znaczenie tworzyw konstrukcyjnych dla Grupy Kapitałowej Azoty Tarnów*, Chemik 2012, 66, 10. 1071-1082.
- [81] Rojek M.: *Degradacja tworzyw polimerowych, Metodologia badań diagnostycznych warstwowych materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej*, Open Access Library Volume 2, 2011.
- [82] Michałek T.: *Metoda oceny wiarygodności symulacji numerycznych przepływów lepkich i termicznych*, Praca doktorska pod kierunkiem doc. Dr hab. Tomasza A. Kowalewskiego, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Polska Akademia Nauk, Warszawa 2005.
- [83] <http://darmowa-energia.eko.org.pl/pliki/ekoauto/diesel.html> (dostęp: 11.08.2024)
- [84] Bernesson S.: *Farm-scale production of RME and ethanol for heavy diesel engines*, Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala 2004.
- [85] Dłużewski M.: *Technologia żywności: podręcznik dla technikum, Część 2*, WSiP, Warszawa 2001.

- [86] Górski J.: Inżynieria oprogramowania w projekcie informatycznym, Warszawa, Mikom, 1999.
- [87] Mrokowska M. M., Krztoń-Maziopa A., Dęgowski M.: *Effect of exopolymer gels on the viscoelasticity of mucus-rich saltwater and settling dynamics of particles*, Marine Chemistry, Vol. 245, 2022.
- [88] Różańska S.: *Właściwości reologiczne wodnych roztworów soli sodowej karboksymetylocelulozy w przepływie wzdłużnym*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2013, 52, 6, 557-558.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Dysza w maszynie drukarskiej do oprawiania książek	10
Rys. 2. Homogenizator ultrasoniczny (1 – doprowadzenie surowca, 2 – stroiciel, 3 – odprowadzenie produktu, 4 – czujnik, 5 – płytką drgająca, 6 – szczelina).....	10
Rys. 3. Schemat półzamkniętej wirówki odtłuszczającej do mleka Westfalia (1 – obudowa bąka, 2 – pokrywa bąka, 3 – talerze, 4 – krzyż rozdzielczy, 5 – podstawa bąka, 6 – krzyż rozdzielczy, 7 – silnik elektryczny)	11
Rys. 4. Przekrój prasy olejowej Komet.....	11
Rys. 5. Prasa do tłoczenia oleju.....	12
Rys. 6. Podział cieczy nienewtonowskich	16
Rys. 7. Krzywe płynięcia cieczy bez granicy płynięcia w zestawieniu z cieczą newtonowską.....	16
Rys. 8. Krzywe płynięcia cieczy z granicą płynięcia	17
Rys. 9. Krzywe płynięcia cieczy antytiksotropowej	17
Rys. 10. Krzywe płynięcia cieczy tiksotropowej bez granicy płynięcia	18
Rys. 11. Krzywe płynięcia cieczy tiksotropowej z granicą płynięcia	18
Rys. 12. Przebieg relaksacji naprężenia po skokowym przyroście odkształcenia w czasie t dla cieczy lepkosprężystej.....	19
Rys. 13. Czynniki wpływające na degradację tworzyw polimerowych i jej rodzaje.....	29
Rys. 14. Schemat wyłaczarki (1 – przekładnia, 2 – zasobnik, 3 – układ chłodzenia strefy zasilania wyłaczarki, 4 – układ nagrzewająco-chłodzący, 5 – ślimak, 6 – cylinder, 7 – głowica, 8 – wyłaczany wyrób, 9 – silnik napędowy).....	31
Rys. 15. Schemat przykładowej głowicy wyłaczarskiej (do wyłaczania rur) 1 – końcówka mocująca głowicę do wyłaczarki, 2 – grzejniki, 3 – rdzeń, 4 – obudowa, 5 – śruba centrująca, 6 – pierścień formujący, 7 – pierścień centrujący, 8 – wspornik rdzenia, 9 – sprężone powietrze, 10 – kanał głowicy	31
Rys. 16. Schemat konstrukcyjny wtryskarki ślimakowej: 1 – siłownik napędu stołu, 2 – kolumny prowadzące stół, 3 – nakrętki do nastawiania wysokości formy, 4 – stół tylny nieruchomy przestawny, 5 – zespół kolanowo dźwigniowy, 6 – stół ruchomy, 7 – zderzak wtryskarki, 8 – stół przedni nieruchomy, 9 – cylinder wtryskowy, 10 – dysza wtryskarki, 11 – ślimak, 12 – grzejniki, 13 – chłodzenie strefy zasypowej cylindra, 14 – lej zasypowy, 15 – silnik napędu ruchu obrotowego ślimaka, 16 – siłownik przesuwu ślimaka, 17 – prowadnice agregatu	

wtryskowego, 18 – zbiornik oleju układu hydraulicznego, 19 – siłownik przesuwu cylindra, 20 – dławik, 21 – regulator ciśnienia oleju układu hydraulicznego	32
Rys. 17. Przykłady geometrii dysz stosowanych we wtryskarkach do tworzyw termoplastycznych i twardego PVC	33
Rys. 18. Schematyczny kształt dysz urządzeń przetłaczających polimery	38
Rys. 19. Schemat stanowiska do wizualizacji przy wykorzystaniu opiłków proszku aluminiowego (1 – pompa, 2 – sekcja badawcza, 3 – zbiornik cieczy)	42
Rys. 20. Stanowisko pomiarowe do wizualizacji przy wykorzystaniu opiłków proszku aluminiowego (1 – pompa, 2 – sekcja badawcza, 3 – zbiornik cieczy)	42
Rys. 21. Kształty kanałów - elementy wymienne	43
Rys. 22. Montaż elementu wymiennego na stanowisku	44
Rys. 23. Wynik badania modelu nr 1	44
Rys. 24. Symulacja komputerowa przepływu wody (a) i płynu nienewtonowskiego (b) dla modelu nr 1.....	45
Rys. 25. Wynik badania modelu nr 2	46
Rys. 26. Symulacja komputerowa przepływu wody (a) i płynu nienewtonowskiego (b) dla modelu nr 2.....	46
Rys. 27. Wynik badania modelu nr 3 (1)	47
Rys. 28. Wynik badania modelu nr 3 (2)	48
Rys. 29. Symulacja komputerowa przepływu wody (a) i płynu nienewtonowskiego (b) dla modelu nr 3.....	48
Rys. 30. Wynik badania modelu nr 4	49
Rys. 31. Symulacja komputerowa przepływu wody (a) i płynu nienewtonowskiego (b) dla modelu nr 4.....	49
Rys. 32. Wynik badania modelu nr 5	50
Rys. 33. Symulacja komputerowa przepływu wody (a) i płynu nienewtonowskiego (b) dla modelu nr 5.....	50
Rys. 34. Schemat budowy reometru kapilarnego: 1 – mechanizm zapewniający określony posuw tłoka, 2 – czujnik nacisku, 3 – tłok, 4 – termostatowany cylinder, 5 – uplastycznione tworzywo polimerowe, 6 – kapilara pomiarowa, 7 – czujnik ciśnienia	54
Rys. 35. Kapilara pomiarowa	55
Rys. 36. Geometria kanału zbieżnego – wydłużenie części wlotowej (A = 2,18 mm, B = 4,36 mm, C = 8,72 mm, H=22,18 mm).....	55
Rys. 37. Funkcja opisująca geometrię kanału	56

Rys. 38. Geometria kanału przejściowego opisanego wielomianem trzeciego stopnia – wydłużenie części wlotowej ($A = 2,18 \text{ mm}$, $B = 4,36 \text{ mm}$, $C = 8,72 \text{ mm}$, $H = 22,18 \text{ mm}$)	57
Rys. 39. Siatka - kanał zbieżny A	58
Rys. 40. Parametry jakościowe siatki kanału zbieżnego A: a) – jakość elementu, b) – współczynnik kształtu, c) – skośność, d) – ortogonalność	59
Rys. 41. Siatka - kanał zbieżny B	60
Rys. 42. Parametry jakościowe siatki kanału zbieżnego B: a) – jakość elementu, b) – współczynnik kształtu, c) – skośność, d) – ortogonalność	60
Rys. 43. Siatka - kanał zbieżny C	61
Rys. 44. Parametry jakościowe siatki kanału zbieżnego C: a) – jakość elementu, b) – współczynnik kształtu, c) – skośność, d) – ortogonalność	61
Rys. 45. Siatka - wielomian trzeciego stopnia A	62
Rys. 46. Parametry jakościowe siatki dyszy wielomianowej A: a) – jakość elementu, b) – współczynnik kształtu, c) – skośność, d) – ortogonalność	62
Rys. 47. Siatka - wielomian trzeciego stopnia B	63
Rys. 48. Parametry jakościowe siatki dyszy wielomianowej B: a) – jakość elementu, b) – współczynnik kształtu, c) – skośność, d) – ortogonalność	63
Rys. 49. Siatka - wielomian trzeciego stopnia C	64
Rys. 50. Parametry jakościowe siatki dyszy wielomianowej C: a) – jakość elementu, b) – współczynnik kształtu, c) – skośność, d) – ortogonalność)	64
Rys. 51. Historia zbieżności rozwiązania – dysza zbieżna A	66
Rys. 52. Historia zbieżności rozwiązania – dysza zbieżna B	66
Rys. 53. Historia zbieżności rozwiązania – dysza zbieżna C	66
Rys. 54. Historia zbieżności rozwiązania – dysza wielomianowa A	67
Rys. 55. Historia zbieżności rozwiązania – dysza wielomianowa B	67
Rys. 56. Historia zbieżności rozwiązania – dysza wielomianowa C	68
Rys. 57. Rozkład ciśnienia – przepływ medium przez kanał zbieżny A	68
Rys. 58. Rozkład ciśnienia – przepływ medium przez kanał zbieżny B	69
Rys. 59. Rozkład ciśnienia – przepływ medium przez kanał zbieżny C	69
Rys. 60. Rozkład ciśnienia – przepływ medium przez kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia A	70
Rys. 61. Rozkład ciśnienia – przepływ medium przez kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia B	70

Rys. 62. Rozkład ciśnienia – przepływ medium przez kanał opisany wielomianem trzeciego stopnia C.....	71
Rys. 63. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały zbieżne: Dysza zbieżna A	71
Rys. 64. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały zbieżne: Dysza zbieżna B	72
Rys. 65. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały zbieżne: Dysza zbieżna C	72
Rys. 66. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały opisane wielomianem trzeciego stopnia: Dysza wielomianowa A.....	73
Rys. 67. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały opisane wielomianem trzeciego stopnia: Dysza wielomianowa B	73
Rys. 68. Rozkład prędkości – przepływ medium przez kanały opisane wielomianem trzeciego stopnia: Dysza wielomianowa C	74
Rys. 69. Wykres przedstawiający rozkład ciśnienia statycznego – dysze o wymiarze charakterystycznym „A”	75
Rys. 70. Wykres przedstawiający rozkład ciśnienia statycznego – dysze o wymiarze charakterystycznym „B”	76
Rys. 71. Wykres przedstawiający rozkład ciśnienia statycznego – dysze o wymiarze charakterystycznym „C”	77
Rys. 72. Reometr kapilarny firmy Dynisco z czujnikiem ciśnienia – Politechnika Bydgoska	78
Rys. 73. Kapilary pomiarowe reometru – Politechnika Bydgoska	78
Rys. 74. Rysunki kapilar pomiarowych (kolejno od lewej: Dysza zbieżna „C”, Dysza zbieżna „B”, Dysza zbieżna „A”, Dysza wielomianowa „A”, Dysza wielomianowa „B”, Dysza wielomianowa „C”)	79
Rys. 75. Dysze z kanałem zbieżnym.....	79
Rys. 76. Dysze wielomianowe	80
Rys. 77. Przedmioty wykonanych z polipropylenu.....	81
Rys. 78. Karta charakterystyki polipropylenu.....	82
Rys. 79. Granulki polipropylenu	83
Rys. 80. Materiał badany w reometrze (z lewej granulki – umieszczone w reometrze, z prawej – materiał wypływający z reometru)	84
Rys. 81. Okno programu „Capillary Rheometer Control Center”- Politechnika Bydgoska	84
Rys. 82. Naprężenia ścinające działające na ścianę dyszy – dysze opisane wymiarem charakterystycznym „A”	88
Rys. 83. Naprężenia ścinające działające na ścianę dyszy – dysze opisane wymiarem charakterystycznym „B”	89

Rys. 84. Naprężenia ścinające działające na ścianę dyszy – dysze opisane wymiarem charakterystycznym „C”	89
--	----

SPIS TABEL

Tabela 1. Warunki brzegowe zastosowane w symulacji.....	65
Tabela 2. Właściwości materiału zastosowane w symulacji.....	65
Tabela 3. Zestawienie wyników strat ciśnienia otrzymanych dzięki symulacji CFD.....	74
Tabela 4. Zestawienie wyników zysku ciśnienia w związku ze zmianą kształtu kapilary dla badania symulacyjnego	75
Tabela 5. Wynik ciśnienia dla zastosowanych dysz podczas badania reometrem kapilarnym	85
Tabela 6. Zestawienie wyników zysku ciśnienia w związku ze zmianą kształtu kapilary dla eksperymentu z wykorzystaniem reometru kapilarnego	86
Tabela 7. Temperatura medium przepływającego przez kapilarę reometru	87
Tabela 8. Wartości naprężenia występującego w zwężonej sekcji kapilary	90