

## **Analiza numeryczna procesu otrzymywania kompozytów polimerowych**

Z. Hlubek <sup>a</sup>, M. Król <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Studentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład  
email: mariusz.krol@polsl.pl

**Streszczenie:** Celem pracy było przedstawienie możliwości jakie płyną z zastosowania analizy numerycznej wytwarzania elementów z kompozytów polimerowych otrzymywanych z połączenia formowania wtryskowego (IM) i od niedawna stosowanej techniki wytwarzania przyrostowego (SLM) w wyniku połączenia których możliwe jest otrzymanie lżejszych i bardziej wytrzymałych struktur o bardzo wysokim wskaźniku wytrzymałości do wagi.

W pierwszym etapie opracowano struktury porowate i dokonano ich numerycznej oceny wytrzymałościowej w warunkach statycznego obciążenia w środowisku SolidWorks. Drugi etap pracy stanowił opracowanie symulacji numerycznej w oprogramowaniu wypełnienia formy MoldFlow z modelem porowatym w celu określenia sił tarcia podczas wtrysku materiału osnowy do formy dając realne korzyści w postaci skrócenia czasu otrzymywania gotowego wyrobu.

Dobór wszystkich parametrów wytwarzania i połączenia dwóch technologii tj. formowania wtryskowego i wytwarzania przyrostowego jakimi są między innymi temperatura, czas i szybkość wtrysku oraz parametry wytwarzania modeli w druku 3d a mianowicie mocy lasera, średnicy plamki lasera, szybkości skanowania, wysokości warstwy osadzonej i odległości pomiędzy punktami spiekania oparty został o analizę wariancji Taguchi'ego.

**Abstract:** The aim of the work was to present the possibilities that flow from the numerical analysis of the production of polymer composites obtained from the combination of injection molding (IM) and the recently used incremental manufacturing technique (SLM) as a result of which it is possible to obtain lighter and more robust structures with a very high index strength to weight. In the first stage, porous structures were developed and their numerical strength assessment was performed under static model load conditions in the SolidWorks environment. The second stage of work was selection of material for the composite matrix together with numerical simulation in MoldFlow mold filling software with a porous model to reduce friction forces during the injection of matrix material into the mold giving real benefits in the form of shortening the time of obtaining the finished product.

Selection of all parameters of production and connection of two technologies, ie injection molding and incremental production, such as temperature, time and speed of injection and parameters of making models in 3D printing namely laser power, laser spot diameter,

scanning speed, embedded layer height and distance between sintering points was based on the analysis of Taguchi variance.

**Słowa kluczowe:** formowanie wtryskowe, komputerowe wspomaganie, Moldflow

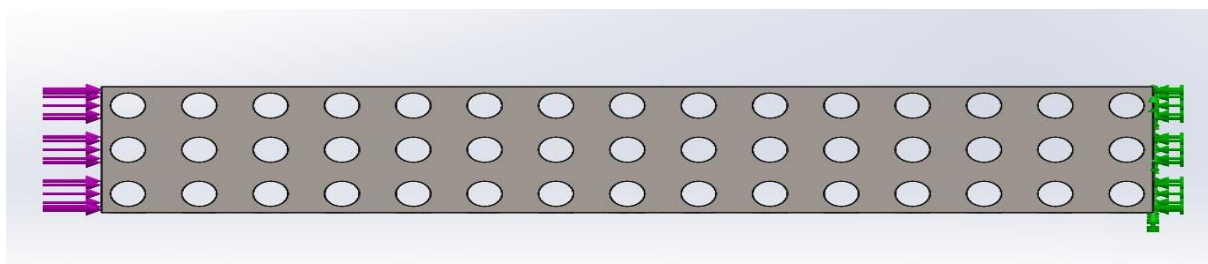
## 1. WSTĘP

Analiza numeryczna pozwala na pozyskaniu wielu cennych informacji w relatywnie krótkim przedziale czasu w zakresie otrzymywania kompozytów polimerowych. W wyniku połączenia formowania wtryskowego (IM) i techniki wytwarzania przyrostowego (SLM) istnieje możliwość otrzymania struktur lżejszych, bardziej wytrzymałych i o wysokim wskaźniku wytrzymałości do wagi. Obecnie wyroby z tworzyw sztucznych odgrywają istotną rolę w naszym codziennym życiu. Do wytwarzania produktów z tworzyw sztucznych stosuje się różne metody produkcji. Materiały z tworzyw sztucznych wytwarza się za pomocą formowania wtryskowego, rozdmuchiwania, termoformowania czy wyłaczania. Najczęściej stosowaną metodą jest metoda formowania wtryskowego, gdyż jest najbardziej ekonomiczną i powszechną metodą produkcji wyrobów z tworzyw sztucznych. Wtryskiwanie to metoda przetwarzania tworzyw sztucznych polegająca na wprowadzeniu stopionego tworzywa do formy, w której zastyga. Podczas procesu formowania wtryskowego najważniejszą rolę odgrywa forma, ponieważ to ona nadaje produktowi wymagany kształt. Współcześnie do projektowania form i produktów wykorzystuje się oprogramowania do projektowania komputerowego takiego jak Moldflow czy SolidWorks.

## 2. OPIS BADAŃ

W pierwszym etapie prac opracowano struktury porowate w środowisku SolidWorks. Celem komputerowego wspomagania było otrzymanie kompozytów wzmacnianych rdzeniami ażurowymi. Opracowano cyfrowe modele trzech próbek, które w kolejnym etapie poddane zostały cyfrowej statycznej analizie ściskania w celu określenia maksymalnych naprężeń występujących w modelu. Jako materiał na rdzeń wybrano stal nierdzewną AISi 316L, ponieważ posiada strukturę austenityczną zapewniającą odporność korozyjną oraz charakteryzuje się wysokim współczynnikiem wytrzymałości do wagi, umocnieniem odkształceniowym oraz wydłużeniem. Stal ta zatem nadaje się na elementy o skomplikowanych kształtach i spełnia założone wymagania. Następnie wykorzystano doradcę umocowań w oprogramowaniu SolidWorks i wybrano miejsce nieruchomej geometrii oraz miejsce przyłożenia siły [5].

Na osnowę kompozytu wybrano materiał polimerowy polipropylen, który jest powszechnie stosowany w procesie formowania wtryskowego. Następnie wykonano symulację numeryczną wypełnienia formy w oprogramowaniu MoldFlow z modelem porowatym czego celem było osiągnięcie minimalnych sił tarcia w modelu w procesie wtryskiwania.



Rysunek 1. Miejsce usytuowania siły oraz nieruchomej geometrii

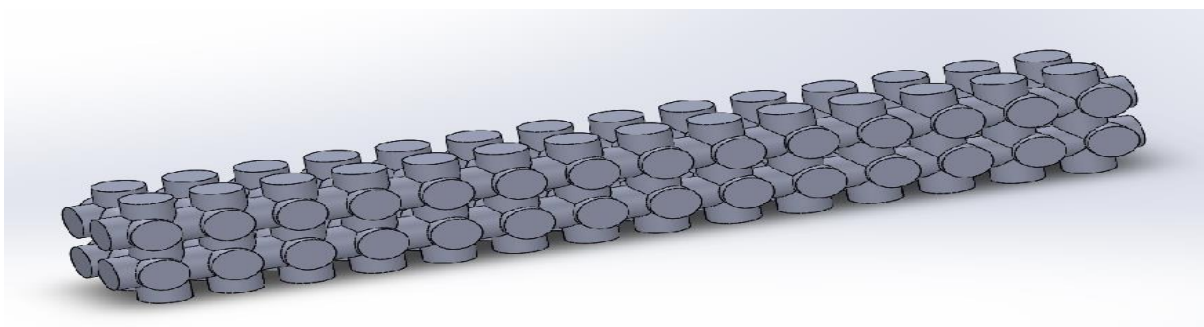
Figure 1. Location of force and fixed geometry

Do programu MoldFlow, który jest przeznaczony do analizy przepływu tworzyw sztucznych w formach wtryskowych wprowadzono negatyw próbki o najlepszych własnościach. Po wprowadzeniu formy do środowiska MoldFlow wybrano materiał z bazy danych tworzyw sztucznych, którym został wypełniony negatyw-polipropylen, rodzaj symulacji- symulacja fazy wypełnienia gniazda formy oraz lokalizację punktu wtrysku. Lokalizacja wtrysku jest bardzo ważnym elementem podczas prowadzenia symulacji wtrysku, ponieważ dzięki dobremu ulokowaniu miejsca wtrysku można zapobiec defektom oraz uzyskać równomierne wypełnienie formy. Krok ten jest głównie spowodowany wymogami ciśnienia. Ciśnienie wymagane do napełnienia powinno być znacznie poniżej wydajności maszyny. Zaleca się aby zostało wyznaczone jedno miejsce wtrysku, jednak gdy ciśnienie jest za wysokie wyznacza się więcej dojsć wtrysku. Pozycja dojsć powinna zapewniać zrównoważony front przepływu wewnątrz części, bez efektów niedopełnienia. Należy upewnić się, że lokalizacje dojsć są prowadzone w jednym kierunku. Wzór wypełnienia powinien być prosty i jednolity. Ponadto nie powinno być problemów z wahaniem, niedomiarem, liniami zgrzewania czy defektami powietrznymi [1,4].

Dzięki oprogramowaniu można zdefiniować następujące parametry:

- temperatura wtryskiwanego materiału,
- temperatura formy wtryskowej,
- kontrola fazy wypełnienia,
- przełączenie fazy wypełnienia na fazę docisku,
- kontrola fazy docisku,
- czas wtryskiwania i chłodzenia,
- czas przerwy.

Po zdefiniowaniu parametrów można zacząć symulację wtryskiwania, a następnie dokonać analizy przepływu tworzywa.

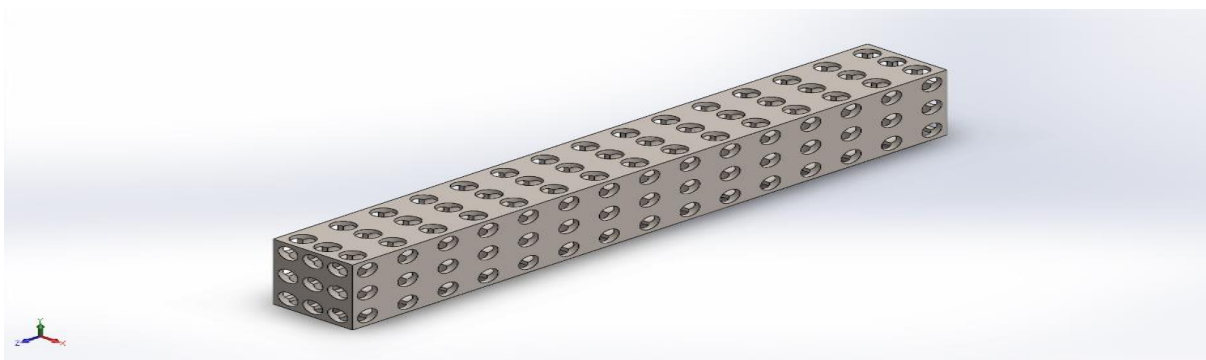


Rysunek 2. Model negatywu- polipropylen

*Figure 2. Negative-polypropylene model*

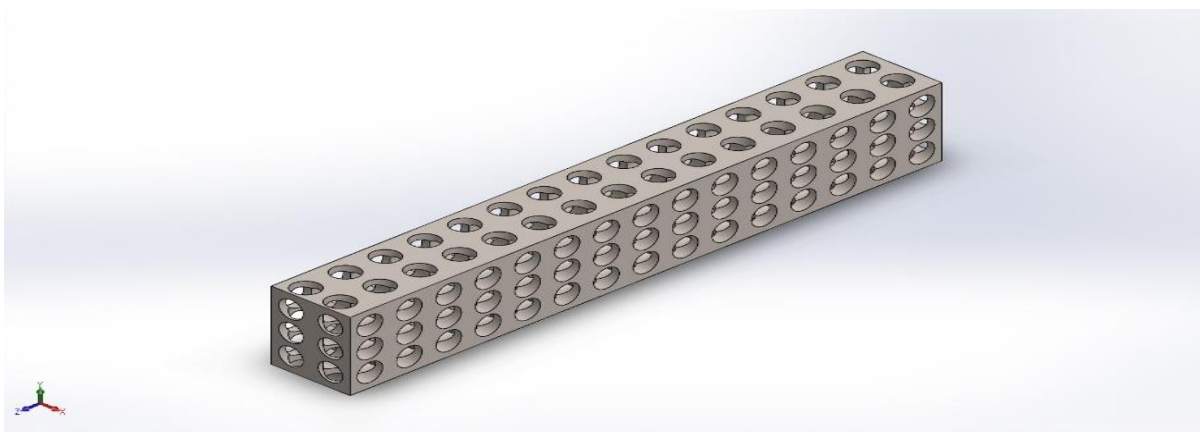
### 3. OPIS WYNIKU BADAŃ

Przeprowadzono statystyczną analizę ściskania w środowisku SolidWorks, w której siła wynosiła 500N a materiałem badań była stal 316L. Stworzono tabelę, w której zostały zestawione trzy próby statycznej analizy ściskania. Pod uwagę zostały uwzględnione trzy aspekty. Waga, naprężenie minimalnie oraz naprężenie maksymalne. Ustalono, że Analiza III posiada najlepsze własności. Następnie stworzono negatyw próbki i poddano go badaniom w środowisku MoldFlow, w którym dokonano analizy przepływu tworzywa, a model został wypełniony materiałem polipropylen (Polytrope TPP518-31 A. Schulman, Inc.) oraz nadane zostało miejsce wtrysku.

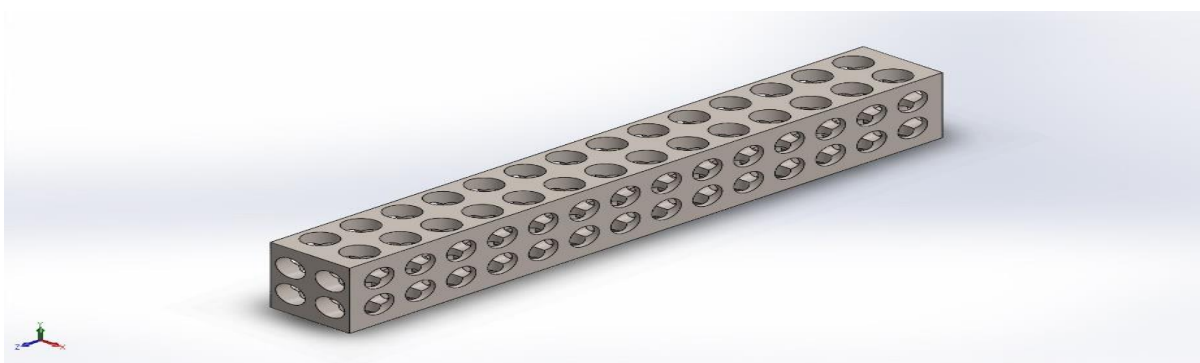


Rysunek 3.1. Model próbki I

*Figure 3.1. Sample model I*



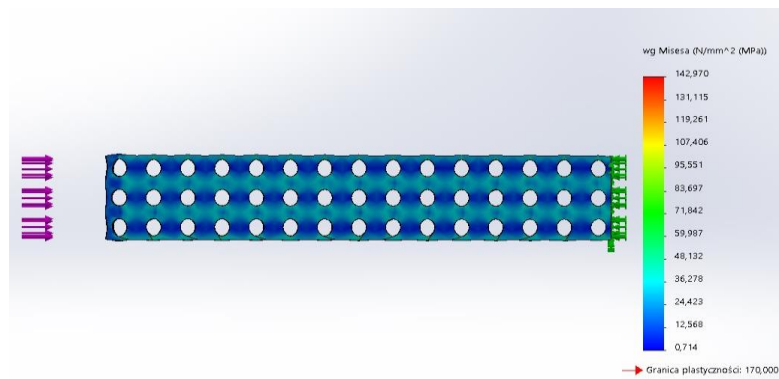
Rysunek 3.2. Model próbki II  
*Figure 3.2. Sample model II*



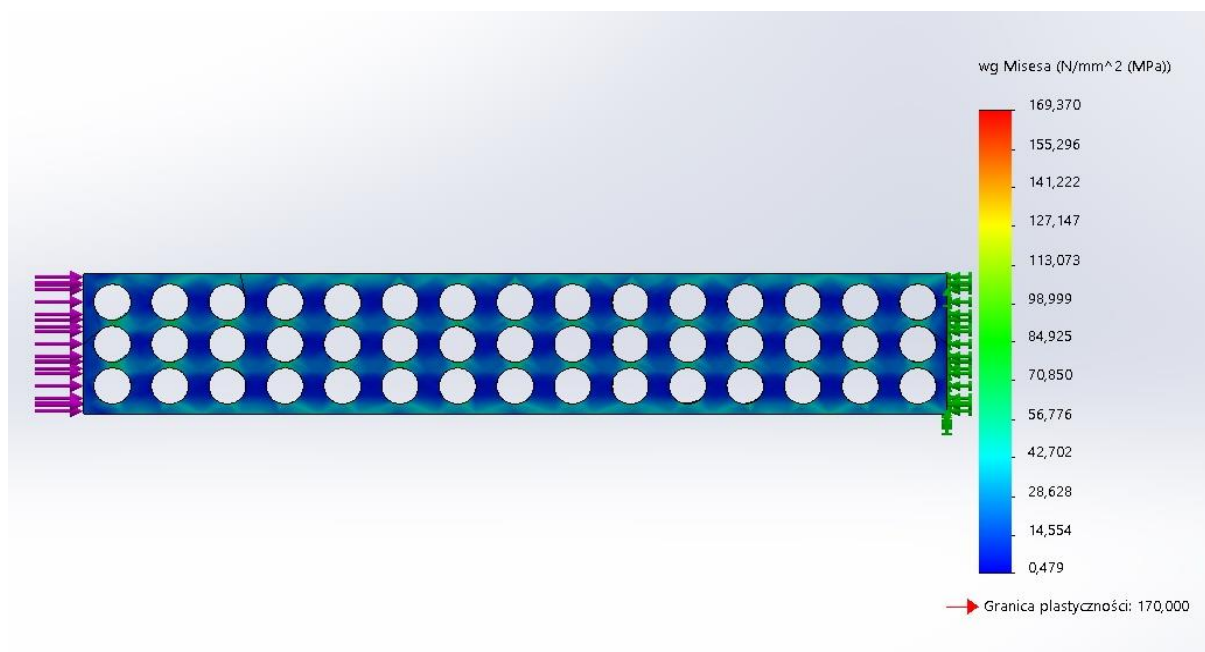
Rysunek 3.3. Model próbki III  
*Figure 3.3. Sample model III*

### 3.1. Analiza ściskania

Próba ściskania jest podstawową próbą stosowaną w celu wyznaczenia właściwości mechanicznych materiału. Próba ściskania jest wykonywana w temperaturze pokojowej według normy, a także ma na celu wyznaczenie naprężeń i odkształceń aby zweryfikować naprężenia doprowadzające do zniszczenia materiału i wartości parametryczne. Raport oprogramowania SolidWorks umożliwił uzyskanie wykresów statycznej analizy ściskania

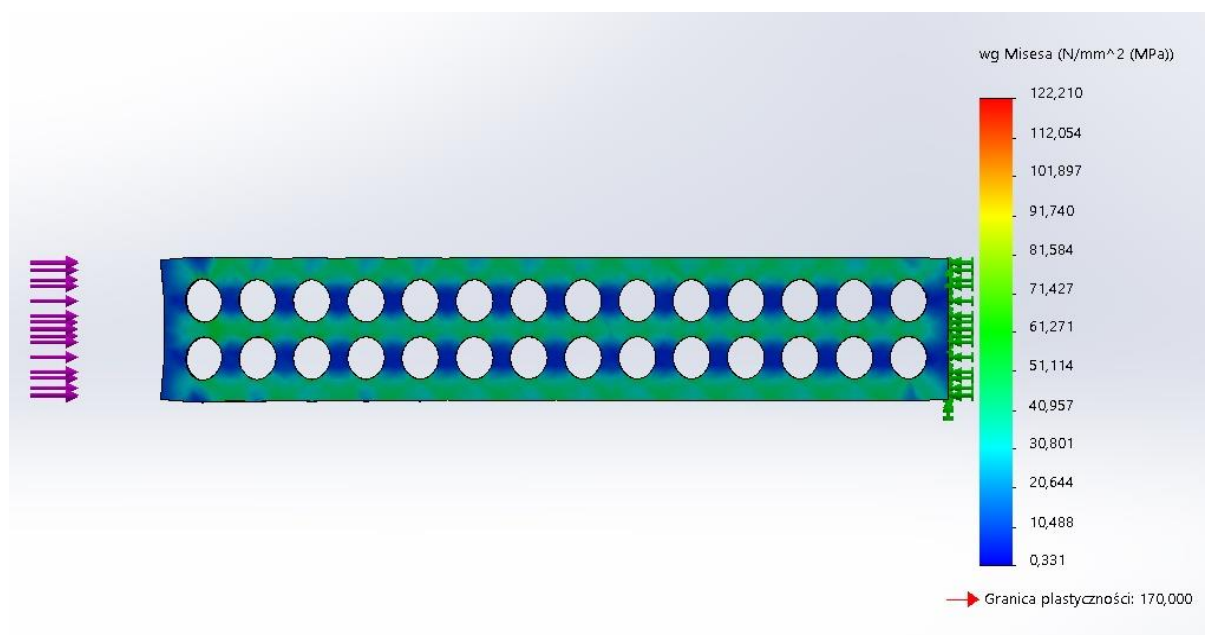


Rysunek 3.1.1. Analiza ściskania I próbki  
*Figure 3.1.1. Analysis of the compression of the I sample*



Rysunek 3.1.2. Analiza II próbki

Figure 3.1.2. Analysis of the compression of the II sample



Rysunek 3.1.3. Analiza ściskania III próbki

Figure 3.1.3. Analysis of the compression of the III sample

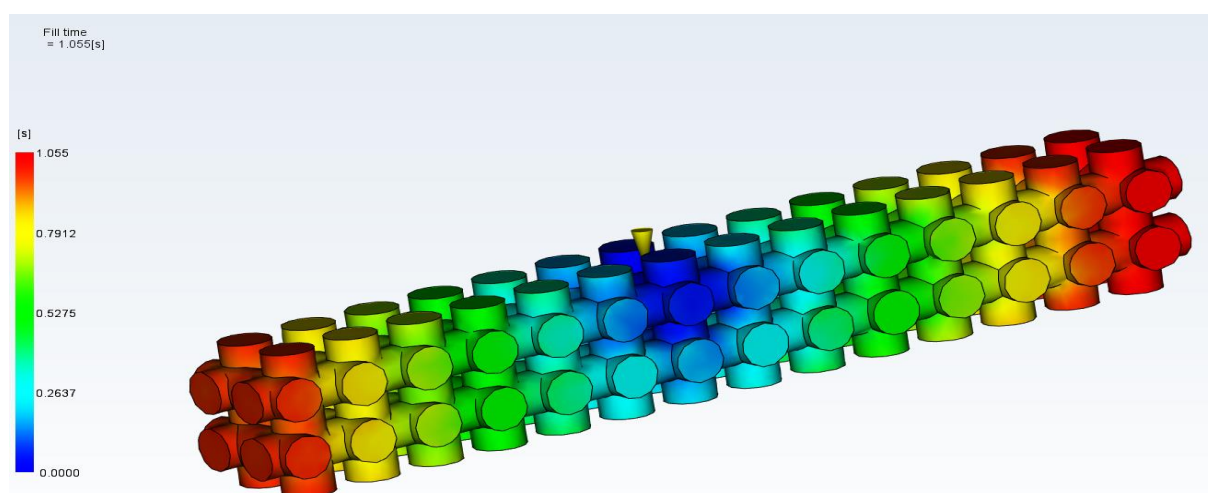
W tabeli przedstawiono wyniki z symulacji komputerowej, w której przedstawiono dwa najważniejsze parametry wagę i naprężenie maksymalne. Próbka III posiada jak najmniejsze naprężenia i jest stosunkowo lekka aby uniknąć odkształceń.

Tabela 1. Wynik statycznej próby ściskania

Tabela 1. The result of a static compression test

Właściwości	Analiza I	Analiza II	Analiza III
Waga [g]	2,09	1,7	1,68
Naprężenia max.[MPa]	142,970	169,370	122,210

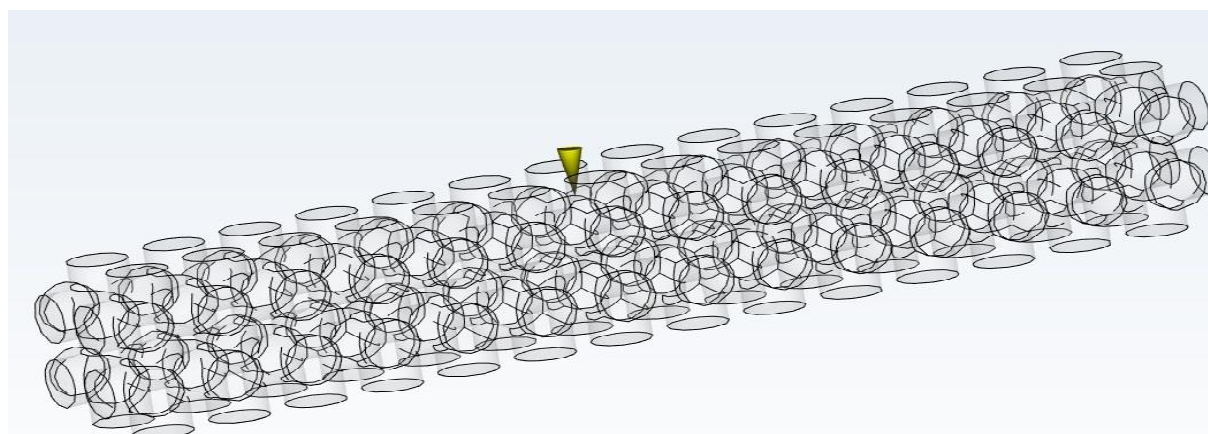
### 3.2. Analiza przepływu



Rysunek 3.2.1. Czas wypełnienia gniazda formującego

Figure 3.2.1. Time to fill the forming cavity

Czas wypełnienia gniazda wynosił 1,055 s. Wyniki obrazują fazę wypełnienia gniazda, która wykonana w równych odstępach czasowych. Dzięki lokalizacji wtrysku w środku próbki udało uzyskać się materiał bez defektów i pułapek powietrznych.



Rysunek 3.2.2. Miejsce występowania pułapek powietrznych

Figure 3.2.2. Place of occurrence of air traps

Wyniki wskazują miejsca, w których dochodzi do zamknięcia pęcherzyków powietrza. Pułapki występują najczęściej w miejscach, gdzie tworzywo dociera na samym końcu. W tym przypadku pęcherze występują w niewielkiej ilości, praktycznie nie ma ich w ogóle. W celu prawidłowego otrzymania kompozytu polimerowego, wg analizy numerycznej należy zastosować następujące parametry procesu oraz materiału:

- **Parametry procesu**

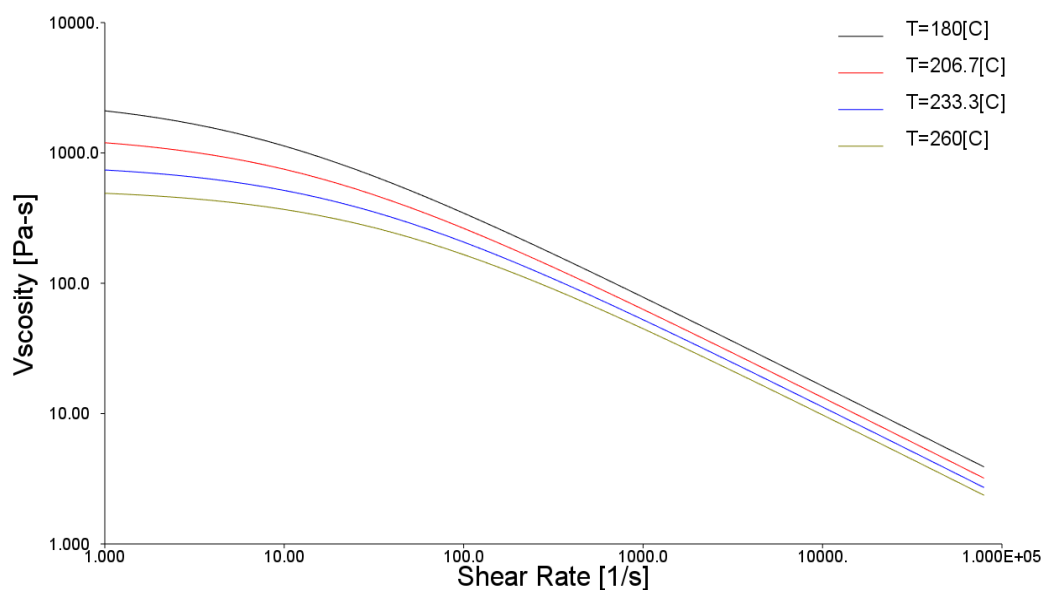
Materiał: Polytrope TTP515-31  
Czas napełnienia: 1,055 s  
Ciśnienie wtrysku: 8 MPa  
Obszar siły docisku: 6,6011 cm<sup>2</sup>  
Temperatura topnienia: 205°C  
Temperatura formy: 38 °C

- **Stal 316L**

Do badań wybrano stal AISi 316L, ponieważ posiada strukturę austenityczną zapewniającą kwasoodporność, charakteryzuje się wysokim współczynnikiem wytrzymałości do wagi, umocnieniem odkształceniowym oraz wydłużeniem zatem stal nadaje się na elementy o skomplikowanych kształtach i spełnia nasze wymagania. Reasumując jest to stal o wysokiej wytrzymałości, kwasoodporności, odporności na korozję, daje możliwość pracy w temperaturze 300-400 °C oraz bardzo dobrze nadaje się na elementy konstrukcyjne [2].

- **Polytrope TTP515-31**

Materiał został wybrany ze względu na niską gęstość 0,90 g/cm<sup>3</sup>, wysoką odporność chemiczną i dowolną barwę. Materiał bardzo dobrze wypełnia gniazdo formy i łatwo się go usuwa z formy [3].



Rysunek 3.2.3. Dane materiałowe tworzywa POLYTROPE TTP515-31  
Figure 3.2.3. Material data for POLYTROPE TTP515-31



#### **4. PODSUMOWANIE**

Do analizy wybrano próbkę, która charakteryzowała się najlepszymi parametrami. Posiada najmniejszą wagę oraz najmniejsze naprężenie maksymalne, ponieważ wytrzymałość stali na ściskanie to opór, jaki stawia stal poddana działaniu sił powodujących odkształcenie materiału, a zatem materiał powinien posiadać jak najmniejsze naprężenia i być stosunkowo lekki by uniknąć odkształceń. Forma została wypełniona polipropylenem w czasie 1,055 s. Wtrysk rozchodził się równomiernie, bez zatrzymań i przyspieszeń ze względu umiejscowienia lokalizacji wtrysku w centrum formy. W trakcie wykonywania badań nie wystąpiły niepożądane zjawiska takie jak pęcherze powietrza co świadczy o wysokiej jakości wypełnienia, która wynosiła 100%.

#### **5. WNIOSKI**

Do modelowania szkieletu wykorzystano program SolidWorks, zaś do analiz numerycznych wykorzystano środowisko MoldFlow. Na proces wtrysku wpływa wiele czynników począwszy od doboru materiału, poprzez dobranie odpowiednich parametrów, kończąc na dokładności i wydajności maszyn. Po przeprowadzeniu symulacji komputerowych stwierdzono, że lokalizacja wtrysku daje nam równomierne i bardzo wysokiej jakości wypełnienie.

#### **LITERATURA**

1. K.Wilczynski.: Komputerowe wspomaganie projektowania w przetwórstwie tworzyw sztucznych, WPW, Warszawa 2016
2. P. Kosieradzki.: Materiałoznawstwo, WNT, Warszawa 1951
3. Henkel.: Design Guide for Bonding Plastics, Volume 6, 2011
4. J. Shoemaker.: Moldflow Design Guide a Resource for Plastics Engineers, U.S.A
5. Dassault Systemes.: Wprowadzenie do SolidWorks