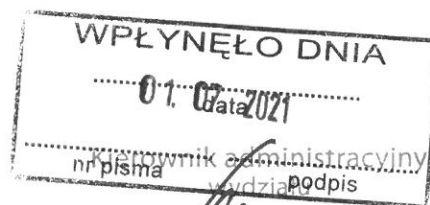


Dr hab. inż. Dariusz Sykutera, prof. uczelni  
Katedra Technik Wytwarzania  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

Bydgoszcz 29.06.2021 r.



**Recenzja rozprawy doktorskiej** mgr Kamila Czerniak

mgr. inż. **Pawła Muszyńskiego**

pt. „**Układ chłodzenia form wtryskowych stosowany w warunkach dynamicznych zmian temperatury (RHCM)**”

Promotor rozprawy:  
prof. dr hab. inż. **Roman Staniek**

Promotor pomocniczy:  
dr inż. **Krzysztof Mrozek**

#### **1. Podstawa formalna opracowania recenzji**

Recenzja została opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej z dnia 29 marca 2021 r. oraz na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Pana dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP (pismo nr DIM.075.60.2021z dnia 29.04.2021 r.).

Stwierdzam, że tematyka recenzowanej pracy jest zgodna z obszarem moich zainteresowań naukowych. Oświadczam jednocześnie, że nie prowadziłem i nie prowadzę z Doktorantem żadnych wspólnych badań naukowych oraz że nie jesteśmy wspólnie autorami jakiegokolwiek publikacji naukowej.

## 2. Znaczenie podjętej tematyki

Proces wtryskiwania jest najważniejszym sposobem cyklicznego wytwarzania wyrobów z tworzyw polimerowych. Wymaga dobrze zaprojektowanej i wykonanej formy wtryskowej oraz wtryskarki, gwarantującej powtarzalność realizacji nastaw procesowych. Z uwagi na specyficzne i różne właściwości tworzyw termoplastycznych (nienewtonowski charakter przepływu, znacząca lepkość dynamiczna i ściśliwość stopu oraz duża wartość rozszerzalności cieplnej i skurczu przetwórczego), wytwarzanie wyprasek wtryskowych odbywa się w różnych warunkach procesowych i przy zastosowaniu form wtryskowych, dostosowanych do cech konstrukcyjnych wyrobów. Obecnie znanych jest ponad 100 odmian tego procesu, a jednocześnie można zaobserwować tendencję do wytwarzania w formach wtryskowych kompozytów hybrydowych o bardzo dobrej wytrzymałości i module Younga. Jak słusznie zauważył Autor rozprawy, forma wtryskowa jest najbardziej istotnym elementem technologii wtryskiwania, ponieważ w jej gniazdach następuje ostateczne formowanie wypraski i finalnie konstytuują się jej cechy geometryczne i użytkowe. Dynamika przejścia stopu polimerowego ze stanu lepkopłynnego do stanu twardego/kruchego wymuszonej elastyczności zależy od intensywności odbioru ciepła od tworzywa termoplastycznego do układu chłodzenia narzędzia. Jest to jedno z istotnych ograniczeń dynamicznego rozwoju technologii wtryskiwania.

Przedmiotem recenzowanej rozprawy jest eksperymentalne zbadanie wpływu cech konstrukcyjnych kanałów chłodzących oryginalnego układu chłodzenia formy wtryskowej na efektywność odbioru ciepła w warunkach dynamicznych zmian temperatury podczas realizacji pojedynczego cyklu wtryskiwania (ang. *Rapid Heat Cycle Moulding* lub *Rapid Head Cooling Moulding*, w skrócie RHCM). W tym procesie, podczas realizacji fazy wtrysku jest wymagana precyzyjna kontrola wysokiej temperatury gniazd formujących. Monitorowanie tego parametru jest także konieczne w fazie docisku, kiedy zimna ciecz cyrkulująca w układzie chłodzenia formy powinna bardzo szybko schłodzić formę wtryskową i odebrać ciepło od krzepnącej wypraski. Dzięki dynamicznej zmianie temperatury narzędzia przetwórczego w fazie wtrysku, zachodzi możliwość minimalizacji, a nawet likwidacji typowych dla konwencjonalnego wtryskiwania wad powierzchniowych, takich jak linie płynięcia oraz linie łączenia strumieni tworzywa. Autor rozprawy wspominał o tym we wprowadzeniu. W ten sposób można otrzymywać wypraski o bardzo estetycznej powierzchni i podwyższonym połysku, które są stosowane jako elementy dekoracyjne np. we wnętrzach

samochodów lub jako ramki ekranów laptopów, tabletów itp. (efekt czerni fortepianowej, ang. *black piano*).

Podjęta tematyka wpisuje się w działanie, którego celem jest bardziej równomierne nagrzanie formy wtryskowej i efektywniejsze odebranie ciepła od krzepnącego w jej gniazdach tworzywa. Pozytywnie oceniam zakres podjętej problematyki, jej aktualność i istotność ze względu na aspekty naukowe i praktyczne. W bazie Scopus<sup>®</sup> znaleziono 5 tegorocznych i 25 artykułów naukowych z ostatnich trzech lat (2018-2020), które w swoich streszczeniach zawierają skrót nazwy technologii dynamicznego grzania i chłodzenia formy-RHCM.

### **3. Charakterystyka formalna i ocena merytoryczna rozprawy**

Recenzowana praca doktorska została napisana łącznie na 146 stronach maszynopisu w formacie A4. Składa się z 8 rozdziałów, streszczeń w języku polskim i angielskim, wykazu oznaczeń oraz bibliografii, w skład której wchodzi 143 pozycje literaturowe. Praca zawiera także spis treści i załącznik 1 pt.: „*Studium przypadku – Analiza opłacalności stosowania nowego układu chłodzenia*”. Tytuły poszczególnych rozdziałów są następujące: (1) Wprowadzenie; (2) Przegląd stanu wiedzy; (3) Cel, sposób rozwiązania problemu i zakres pracy; (4) Analiza wpływu szybkiego chłodzenia formy na strukturę wyprasek; (5) Opracowanie założeń konstrukcyjnych układu chłodzenia i analiza oraz badania symulacyjne; (6) Budowa prototypów wybranych elementów układu chłodzenia; (7) Badania doświadczalne prototypowego układu chłodzenia; (8) Podsumowanie, wnioski oraz kierunki przyszłych badań.

Struktura analizowanej pracy jest uporządkowana. W części badań własnych Doktorant zastosował współczesne narzędzia wsparcia inżynierskiego takie jak: oprogramowanie CAD oraz metodę elementów skończonych MES. Jest współtwórcą stanowiska badawczego, które zostało użyte do badań doświadczalnych przedstawionych w rozdziale 7. **Uważam, że rozprawa spełnia regulacje ustawowe obowiązujące dla prac doktorskich, jest poprawna merytorycznie i mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.**

Doktorant wykazał się dojrzałością, zarówno w zakresie doboru i analizy cytowanej w pracy literatury, a także w przyjęciu dynamicznego i szerokiego programu badań, znamiennego dla prac doświadczalnych. Rozprawa w swoim zamyśle jest oryginalna pod względem naukowym, jej zrealizowanie wymagało doświadczenia praktycznego w zakresie konstruowania narzędzi specjalnych i systemu pomiarowego oraz znacznego nakładu pracy.

Literatura jest dostatecznie reprezentatywna dla problematyki rozprawy. Jest to duży zbiór piśmiennictwa zagranicznego i polskiego obejmujący 143 pozycje, w tym 111 to artykuły i książki naukowe. Ponad 100 z nich napisano w języku angielskim, a 32 pozycje są nie starsze niż 6 lat (licząc od 2016 r.). Bibliografia zawiera także 4 patenty i 28 źródeł internetowych. Już na tej podstawie można zauważyć, że tematyka jest aktualna a zakres badań eksperymentalnych został ustalony z uwzględnieniem dotychczasowych osiągnięć naukowych. Warto podkreślić, że Autor jest współautorem dziewięciu cytowanych w pracy źródeł literaturowych oraz 2 patentów i jednego zgłoszenia patentowego. Doktorant gruntownie zapoznał się z treściami przywołanej w spisie literatury, niektóre z nich obszernie przytacza, jednak moim zdaniem nazbyt oszczędnie z nimi dyskutuje.

W rozdziale drugim Autor w obszerny sposób omawia istotę technologii RHCM i różnice w stosunku do standardowej technologii wtryskiwania (CIM – *Conventional Injection Moulding*), by następnie przedstawić obszernie podstawy teoretyczne wymiany ciepła w formie wtryskowej, mechanizmy jej intensyfikowania i współczesne sposoby chłodzenia form stosowane w narzędziach przetwórczych do wtryskiwania termoplastów. Uważam, że rozdział ten został opracowany na dobrym poziomie. W mojej ocenie małym mankamentem tej części jest analiza wad wyprasek powstałych w wyniku nieprawidłowego chłodzenia. Źródłem wystąpienia co najmniej części z wymienionych wad mogą być także błędy w projektowaniu wyprasek, doborze i umiejscowieniu punktów wtrysku, zwłaszcza dla tworzyw napełnionych krótkim włóknem oraz nieodpowiedni dobór parametrów procesowych. Wystąpienie określonej wady to często interakcja wielu czynników, których wzajemne oddziaływanie intensyfikuje lub minimalizuje ryzyko jej wystąpienia. W przypadku deformacji i wypaczeń kształtu warto odnieść ich poziom do skurczu pierwotnego i wtórnego, sposobu płynięcia stopu, anizotropii ułożenia łańcuchów makrocząsteczkowych i napełniaczy, co w efekcie powoduje anizotropie skurczową – główne źródło deformacji wyrobu. W rozdziale 2.1.3 zabrakło informacji o stosowaniu dynamicznego grzania i chłodzenia formy we wtryskiwaniu mikrooporującym z użyciem gazu obojętnego (Microcellular Injection Moulding – MIM). Stwierdzono, że zastosowanie podwyższonej temperatury formy minimalizuje powstawanie srebrzeń i wykwitów na powierzchni wypraski (bynajmniej nie od zawartej wilgoci w granulacie tworzywa). Nagrzanie ścian gniazd formujących do wysokiej temperatury ogranicza orientację w strefie przyściennej i gradient prędkości oraz efekt „fontannowy” podczas przepływu stopu. Ta modyfikacja procesowa jest szczególnie rekomendowana dla tworzyw o dużej lepkości dynamicznej. Dzięki niej można

minimalizować przebarwienia powierzchni wypraski, wynikające z ułożenie krótkich włókien w warstwie przyściennej w kierunku prostopadłym do płynięcia stopu.

W rozdziale 3 Autor przywołuje projekty badawcze LIDER (2) i INNOTECH (1), które stały się zaczynem podjętej tematyki rozprawy i nakreślonego celu. Dotyczy on poszukiwania korzystnego kształtu przekroju poprzecznego kanału chłodzącego w układzie chłodzenia formy wtryskowej ze względu na szybkość i równomierność odbioru ciepła od tworzywa formowanego w formie wtryskowej. Ambitny i poprawnie sformułowany przez Autora cel stał się głównym powodem opracowania bardzo szerokiego zakresu badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Całość tego zamysłu oceniam bardzo pozytywnie, jednak dyskusyjny wydaje się punkt 2 zakresu (str. 48) i w konsekwencji analiza wpływu szybkiego chłodzenia wyprasek z tworzyw częściowo krystalicznych w formie na ich strukturę. Zawarte wyniki są poprawne, ale zarówno wpływ temperatury formy jak i zawartości dodatków nukleujących na stopień krystaliczności wyprasek jest powszechnie znany i ma bardzo bogatą bibliografię. Zresztą również Autor w swojej analizie przywołuje niektóre pozycje literaturowe poz. 23, 33, 38, 97. Można było tej ważnej tematyce poświęcić podrozdział w punkcie 2 pracy. Pozytywnym aspektem podjęcia tego wątku w ramach badań własnych jest potwierdzenie, że kwestie konstrukcji elementów i układów formy wtryskowej, w tym sprawności działania układu chłodzenia, bardzo istotnie przekładają się na strukturę wyprasek, a co za tym idzie na ich cechy geometryczne i właściwości mechaniczne.

Według mojej oceny największe wartości poznawcze i użytkowe zawierają treści rozdziałów 5-7 oraz sformułowane na ich podstawie wnioski. W rozdziale 5 przedstawiono założenia konstrukcyjne nowego układu chłodzenia w kontekście realizacji badań symulacyjnych i celu pracy. Na pochwałę zasługuje jakość opracowania założeń w zakresie doboru materiału oraz kształtu kanałów wkładek formujących w powiązaniu z ich technologicznością i kosztami wykonania. Na dobrym poziomie merytorycznym jest także przegląd cieczy chłodzących pod kątem spadku ciśnienia na jednostkę długości kanału, w zależności od temperatury i natężenia przepływu. Procedurę przygotowania modelu do badań symulacyjnych w środowisku ANSYS Fluent 14.5 (podrozdział 5.3) również oceniam bardzo dobrze. Dużą wartość poznawczą wnoszą zawarte w rozprawie wyniki eksperymentu symulacyjnego w postaci krzywych zmian temperatury na powierzchni elementu formującego, w zależności od rodzaju materiału i kształtu przekroju kanału chłodzącego wkładki. Na ich podstawie sporządzono wykresy zmian liczby Nusselta i współczynnika tarcia Fleming'a w zależności od liczby Reynoldsa. Pozwoliło to na wytypowanie korzystnej geometrii kanałów chłodzących w stosunku do referencyjnego kanału gładkiego oraz na

sprawdzenie skuteczności odbioru ciepła w eksperymencie doświadczalnym. Powstałe oryginalne stanowisko badawcze wraz z wkładką zostało dobrze przemyślane, a do jego budowy Autor wykorzystał wyniki eksperymentu symulacyjnego i swoją ugruntowaną wiedzę inżynierską. Jego modułowa budowa umożliwia wymianę chłodzonych wkładek formujących i pozwala na jednoczesny pomiar zmian temperatury na ich powierzchni za pomocą czujników i kamery termowizyjnej. Zarejestrowane rozkłady zmian temperatury w zależności od wydajności przepływu wody, stały się podstawą do przeprowadzenia optymalizacji procesu chłodzenia dla technologii RHCM, podczas wtryskiwania poliamidu 6 i polipropylenu. Analizy zawarte w rozdziale 7, wzbogacone o dane liczbowe przedstawione w załączniku 1, stanowią oryginalny wkład do stanu wiedzy w zakresie chłodzenia form wtryskowych podczas realizacji procesu wtryskiwania RHCM. W moim przekonaniu recenzowana rozprawa doktorska spełnia także kryterium oryginalnego rozwiązania w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych Autora w sferze gospodarczej.

Podsumowując merytoryczny wkład rozprawy w aktualny stan wiedzy o procesach wymiany ciepła w formach wtryskowych i ich wpływie na kształtowanie się ostatecznych właściwości wyprasek, na uwagę zasługują przede wszystkim następujące osiągnięcia naukowe Autora rozprawy:

- a) opracowanie modelu oryginalnego układu chłodzenia i wykonanie eksperymentu symulacyjnego, w wyniku którego wytypowano korzystne, z punktu widzenia celu rozprawy, kształty przekroju porzecznego kanałów chłodzących,
- b) współuczestnictwo w zaprojektowaniu i wykonaniu oryginalnego, modułowego stanowiska do badań doświadczalnych układu chłodzenia formy wtryskowej, przeznaczonej do wytwarzania wyprasek w technologii RHCM,
- c) opracowanie oryginalnej metodyki badań doświadczalnych, wyznaczenie termogramów rozkładu temperatury powierzchni wkładki chłodzącej w funkcji natężenia przepływu wody chłodzącej i rodzaju kanałów chłodzących,
- d) pozytywna weryfikacja wyników symulacyjnych w warunkach eksperymentu rzeczywistego i optymalizacja procesu chłodzenia z wykorzystaniem nowego układu chłodzenia,
- e) wyznaczenie średnich szybkości odbioru ciepła dla wytypowanych kanałów chłodzących.



**Recenzowana rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.** Na wyróżnienie zasługuje fakt, że na każdym etapie realizacji prac doświadczalnych, Autor rozprawy odnosił uzyskane efekty wdrożenia nowego systemu chłodzenia formy wtryskowej do kosztów jego wytworzenia. W ten sposób można dostrzec znaczącą wartość utylitarną zaproponowanych w ramach rozprawy rozwiązań. Moim zdaniem, zaprezentowane treści są bardzo interesujące zwłaszcza dla tych narzędziowni, które specjalizują się w produkcji form wtryskowych o zintensyfikowanym odbiorze ciepła.

#### **4. Uwagi krytyczne oraz o charakterze dyskusyjnym**

W trakcie lektury rozprawy sformułowano pewne uwagi krytyczne i wątpliwości natury merytorycznej, z których najistotniejsze przedstawiono poniżej:

- 1) Dyskusyjne jest stwierdzenie Autora, że w standardowym procesie wtryskiwania (ang. CIM – *Conventional Injection Moulding*) wartość temperatury formy będzie utrzymywać się na stałym poziomie podczas całego cyklu (str. 17 w14↑). Przywołany w rozdziale 2.2 bilans cieplny formy wtryskowej oraz uwarunkowania w zakresie projektowania i wykonania układu chłodzenia, zwłaszcza dla form wielogniazdowych i produkcji wyrobów o złożonym kształcie wskazują, że uzyskanie warunków izotermicznego kształtowania ostatecznych właściwości wyprasek w formach wtryskowych jest niemożliwe. Można jedynie ograniczać rozkład temperatury ścian gniazd formujących. W tym kontekście, również informacja zawarta w wierszu 7↑ na tej samej stronie wymaga modyfikacji.
- 2) W rozdziale 4 Autor przyjął założenie, że intensywnemu chłodzeniu poddaje się wypraski wykonywane z tworzyw bezpostaciowych o małym skurczu przetwórczym (str. 50, w. 12↑). Jednak analizę wpływu intensywnego chłodzenia na strukturę wykonano z zastosowaniem izotaktycznego polipropylenu (*iPP*) z dodatkiem środka nukleującego. Ponadto, w analizie opłacalności stosowania nowego układu chłodzenia użyto polipropylenu i poliamidu. Czym podyktowany był wybór tworzyw częściowo krystalicznych do analiz w rozdziale 4 i w załączniku 1?
- 3) Zaletą pracy jest czytelne przedstawienie genezy, celu i zakresu pracy. Czy przy tej okazji nie można było sformułować hipotezy badawczej?
- 4) Wybór stali 1.2343 uważam za słuszny w przypadku wytwarzania form wtryskowych z wkładkami hartowanymi. Jednak z uwagi na cel rozprawy, zabrakło mi informacji na temat stali o podwyższonej przewodności cieplnej. Tego typu materiały są również

stosowane w produkcji form wtryskowych. Stale HTCS<sup>®</sup> (High temperature conductivity steel, Rowalma S.A., Hiszpania) są przeznaczone do pracy na gorąco i charakteryzują się bardzo wysoką wytrzymałością oraz wyższą od stali 1.2343 przewodnością cieplną (około 60 W/m·K). Wartość tego parametru dla stali o nazwie handlowej MD<sup>®</sup>Xtra (Huta Fink Steel, Swiss Steel Group) wynosi 44-47 W/m·K. Materiał ten jest wręcz rekomendowany do wytwarzania elementów formujących form wtryskowych. Jego odmiana MD<sup>®</sup>Xtra Super Hard w stanie surowym ma twardość około 40 HRC.

- 5) W punkcie 5.3.1 (str. 80), w ramach ustalenia warunków brzegowych eksperymentu symulacyjnego Autor przyjął wartość temperatury cieczy chłodzącej na wejściu  $T_{in}$  na poziomie 30°C. Jakie przesłanki zdecydowały o przyjęciu tej wartości temperatury medium chłodzącego?
- 6) Z jakiego materiału wykonano płytę termoizolacyjną?
- 7) W pomiarach rozkładu temperatury na powierzchni wkładek zastosowano szesnaście czujników rezystancyjnych Pt100 (brak producenta i charakterystyki czujników) oraz kamerę termowizyjną FLIR E5. Ile wynosi przyjęty w badaniach współczynnik emisyjności dla tego urządzenia i w jaki sposób ustalono jego wartość? Jak wyglądała różnica w wartościach temperatury odczytywanej we wskazanych na rys. 7.10 punktach pomiarowych (T01, T02...) za pomocą obu metod?
- 8) Zaletą stosowania nowego układu chłodzenia jest możliwość intensywniejszego odbioru ciepła z formy wtryskowej. Autor założył, że medium chłodzącym będzie woda. Producenci metalowych wkładek formujących wytwarzanych metodami przyrostowymi, nie zalecają stosowania kształtów uźebrowanych w kanałach konformalnych. Wynika to z faktu intensywnego osadzania się na ich powierzchniach wewnętrznych produktów korozji oraz kamienia kotłowego. Osad nie tylko wstrzymuje przepływ wody, lecz także powoduje powstawanie pod jego warstwą kolejnych uszkodzeń, co w efekcie prowadzi do perforacji ścianek. Aby do takiej sytuacji nie dopuścić kanały podlegają okresowemu czyszczeniu. Czy Autor rozprawy mógłby odnieść się do tej kwestii w kontekście przyjętego w pracy optymalnego kształtu przekroju kanału chłodzącego M8H08?
- 9) W badaniach doświadczalnych jednym z czynników zmiennych było natężenie przepływu wody, które przyjęto na 4 poziomach wartości w przedziale od 5 do 10 litrów na minutę. Dla maksymalnej wartości tego parametru zanotowano największą intensywność chłodzenia. Proszę o ustosunkowanie się Autora do kwestii, czy



pomimo wzrostu oporów przepływu i zanotowanego największego spadku ciśnienia na drodze przepływu czynnika chłodzącego nie byłoby ciekawym, z naukowego punktu widzenia, podniesienie wartości Q powyżej 10 litrów na minutę?

- 10) Dyskusyjne jest stwierdzenie Autora, że znaczące efekty zastosowania nowego układu chłodzenia są zauważalne dla wyprasek o grubości od 3 mm (str. 121). To kwestia odniesienia oceny efektywności chłodzenia do indywidualnego przypadku produkcji metodą wtryskiwania. W przypadku elementów o mniejszej grubości zdarza się bowiem, że już zmniejszenie czasu chłodzenia o sekundę albo o jej ułamek, powoduje bardzo konkretne oszczędności kosztów wytwarzania dla firmy w skali roku. Nie można zapominać także, że większa równomierność chłodzenia i lepsza kontrola temperatury formy wtryskowej to zmniejszenie liczby wadliwych wyprasek w standardowo realizowanym procesie wtryskiwania.

Praca jest napisana bardzo starannie pod względem edytorskim, wiele rysunków zamieszczonych w rozdziale 2 zostało przez Autora wykonanych samodzielnie z uwzględnieniem cytowanego źródła literaturowego.

Zauważono nieliczne nieścisłości redakcyjne oraz drobne błędy o charakterze merytorycznym:

- 1) rys. 2.3, str. 16. – przyjmuje się, że faza chłodzenia zaczyna się od rozpoczęcia realizacji fazy docisku, lepiej byłoby podpisać ten schemat, że jest to graficzny podział czasu trwania poszczególnych faz procesu podczas realizacji jednego cyklu procesowego,
- 2) str. 17 w7↑ – proces wtryskiwania tworzywa do gniazd formującym nie jest izotermiczny,
- 3) zamiast pojęcia *struga tworzywa* zalecałbym stosowanie określenia *strumień tworzywa* (w tekście znaleziono kilka razy tego typu określenia np. str. 17, 19, 23 itp.),
- 4) str. w5↑ – błędnie użyto określenia *wtrysk* dla opisanego procesu wtryskiwania, *wtrysk* to jedna z faz tego procesu,
- 5) str. 21 w5↓ – *równomierność chłodzenia* raczej nie maksymalna ale optymalna, pożądana, największa,
- 6) str. 23 w2↑ - zamiast *kolor* korzystniejszym określeniem jest *barwa*,
- 7) str. 31.w3↓ - zamiast *piana metalowa* sugerowałbym *porowaty metal lub metal o strukturze porowatej*,
- 8) przywołanie rysunku w tekście powinno poprzedzać jego prezentację. W przypadku rysunku 2.20 jest odwrotnie,
- 9) str. 38.w8↑ - temperatura jest czynnikiem fizyczny w liczbie pojedynczej, mamy tylko różne jej wartości,
- 10) str. 38. w11↓ - stosowanie słowa *ogromny* (zauważonych również na str. 39) jest nieprecyzyjne, niejasno określa treści, które chcemy przekazać,

- 11) str. 47. w2↑ - Wittmann Group jest firmą austriacką, a nie brytyjską,
- 12) str. 50. W12↓ - tworzywa krystaliczne w swojej strukturze zawierają fazę bezpostaciową, dlatego stosuje się określenie tworzywa częściowo krystaliczne lub semikrystaliczne,
- 13) str. 87 - podpisy pod rysunkami nie do końca oddają istotę informacji zawartych na rysunkach, sugerowana zmiana: *Zmiana temperatury na powierzchni wkładki w zależności od materiału zastosowanego do jej wykonania*,
- 14) str. 88 w5↓ - wydaje się, że zwrot o *zwielokrotnieniu efektywności odbioru ciepła* jest niefortunny, powinien być zastąpiony bardziej adekwatnym do zaprezentowanych w tab. 5.17 wyników,
- 15) str. 103 - numeracja rysunku 7.8 powtórzona na stronie 104,
- 16) str. 104 – sugerowałbym zmianę tytułu podrozdziału 7.3 na *Wyniki badań i ich analiza*,
- 17) str. 111 w10↓ - zalecałbym stosowanie określenia krzywe cechują się podobnym kształtem lub charakterem przebiegu (zmienności), czy *pomiar temperatury był niestabilny* czy raczej *odnotowano niestabilność temperatury na powierzchni wkładki*,
- 18) str. 119 – według mojej oceny podpis tabeli 7.10 powinien być bardziej szczegółowy, natomiast w wierszach 2 i 3 tej tabeli brakuje określenia temperatura dla kanału Ø8 [°C], wartości liczbowe podane w kolumnach 2-5 dotyczą temperatury,
- 19) str. 130 poz. [72] spisu literatury – zabrakło roku wydania – 2018,
- 20) str. 137 w7↑ - nie stosuje się w języku polskim określenia *circa*, pewnie chodziło o określenie około,
- 21) str. 139 w6-w1↓ - wielokrotne powtórzenie słowo *wypraska* w sąsiadujących fragmentach tekstu i podpisie pod rysunkiem,
- 22) str. 145 – w6↓ - użyte w kontekście wyjęcia wypraski z formy określenia *uwolnienie* albo *odformowanie* są zwrotami potocznymi stosowanymi w przemyśle przetwórstwa tworzyw, nie powinny być stosowane w pracy naukowej,
- 23) lekturę pracy utrudnia brak wyjaśnień oznaczeń i symboli stosowanych we wzorach i na rysunkach (np. wzór 2.7; 2.12; 5.1; 5.2; 5.3; 5.7; rys. 2.5; 2.6; 2.12; 2.13 i innych). Dobrze sporządzony przez Autora wykaz oznaczeń zawarty na stronach 7-9 jest pomocny, ale powszechną i dobrą praktyką jest stosowanie opisu oznaczeń pod wzorami lub w podpisach pod rysunkiem. Jest to znaczne ułatwienie dla czytelnika.

## 5. Podsumowanie

Przestawioną do recenzji rozprawę doktorską pt.: „*Układ chłodzenia form wtryskowych stosowany w warunkach dynamicznych zmian temperatury (RHCM)*”, niezależnie od przedstawionych uwag merytorycznych i edytorskich, oceniam bardzo pozytywnie. Analiza chłodzenia form wtryskowych jest istotnym zagadnieniem w zakresie badań stosowanych i podstawowych.

Praca ma charakter eksperymentalny, ale swoim spektrum obejmuje także zagadnienia modelowania, konstrukcji oraz wytwarzania technikami ubytkowymi. Do zrealizowania

postawionego celu Autor musiał wykazać się znajomością wybranych zagadnień termodynamiki, fizykochemii polimerów, pomiarów metodami stykowymi i bezstykowymi oraz podstaw przetwórstwa tworzyw polimerowych. Poziom merytoryczny eksperymentu numerycznego z użyciem MES, oryginalność zaprojektowanego modułowego stanowiska badawczego oraz zakres i sposób zrealizowanych badań doświadczalnych, świadczą o **umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej**. Wyróżniająca jest także strona edytorska rozprawy. Wysoka ocena dotyczy zarówno warsztatu pisarskiego jak i zaprezentowanych w pracy elementów graficznych. Stwierdzam, że Autor osiągnął cel postawiony w rozprawie, a **przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**. Zaprezentowane wyniki mają znaczenie nie tylko poznawcze, ale także są istotne z punktu widzenia praktyki przemysłowej w zakresie wytwarzania form wtryskowych i przetwórstwa tworzyw polimerowych.

Biorąc pod uwagę wszystkie wymienione wyżej uwagi stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Muszyńskiego pt.: „*Układ chłodzenia form wtryskowych stosowany w warunkach dynamicznych zmian temperatury (RHCM)*”, spełnia wymagania określone w obowiązującej Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Na tej podstawie stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie mgr. inż. Pawła Muszyńskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Jednocześnie stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.



Bydgoszcz, 29.06.2021 r.