

Łódź, 26.11.2024 r.

dr hab. inż. Mariola Błaszczyk
Politechnika Łódzka
Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska
Katedra Inżynierii Chemicznej

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Podgórskiego
pt. „Opracowanie procesu produkcji prototypowych wielofunkcyjnych materiałów
kompozytowych do regeneracji tkanki kostnej przy użyciu technik druku 3D”
wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Tomasza Ciach

Podstawa wykonania recenzji

Podstawą niniejszego opracowania jest pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Chemiczna Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Sosnowskiego z dnia 23.09.2024 r., informujące o powołaniu mnie jako recenzenta rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Podgórskiego.

Znaczenie tematyki badawczej

Rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Podgórskiego pt. „Opracowanie procesu produkcji prototypowych wielofunkcyjnych materiałów kompozytowych do regeneracji tkanki kostnej przy użyciu technik druku 3D” podejmuje tematykę o istotnym znaczeniu naukowym i praktycznym, wpisując się w dynamicznie rozwijający się obszar inżynierii biomateriałów. Regeneracja tkanki kostnej stanowi jedno z największych wyzwań współczesnej medycyny regeneracyjnej, szczególnie w przypadku leczenia poważnych ubytków kostnych powstałych w wyniku nowotworów, urazów czy chorób zwyrodnieniowych. W pracy podjęto próbę rozwiązania kluczowego problemu technologicznego, jakim jest opracowanie ekonomicznych i prostych metod wytwarzania filamentów do druku 3D, które mogą być stosowane do produkcji spersonalizowanych implantów kostnych. Tematyka badawcza jest wyjątkowo istotna z uwagi na rosnące zapotrzebowanie na bioaktywne, biodegradowalne materiały, które wspierają proces regeneracji tkanki, jednocześnie integrując się z organizmem pacjenta. Rozprawa skupia się na połączeniu biodegradowalnych polimerów z różnymi mineralnymi dodatkami, które mają kluczowe znaczenie dla wspomagania procesu osteogenezy i odbudowy struktury kostnej. Praca magistra inżyniera Rafała Podgórskiego wpisuje się w globalne trendy badawcze dążące do tworzenia spersonalizowanych, bioaktywnych implantów kostnych, które w przyszłości mogą znaleźć zastosowanie w praktyce klinicznej.

Ocena struktury i stylu rozprawy doktorskiej

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Podgórskiego, pt. „Opracowanie procesu produkcji prototypowych wielofunkcyjnych materiałów kompozytowych do regeneracji tkanki kostnej przy użyciu technik druku 3D”, liczy 242 strony i składa się z jednotematycznego cyklu publikacji. Rozprawa rozpoczyna się od streszczenia w języku polskim i angielskim, które syntetycznie przedstawia cel i zakres badań, a następnie zawiera wykaz projektów badawczych, podkreślający interdyscyplinarny

charakter pracy. Przejrzysty spis treści umożliwia łatwą nawigację, a wykaz publikacji i dorobku naukowego Doktoranta, wraz ze wskaźnikami bibliometrycznymi, świadczy o staranności w dokumentowaniu osiągnięć i pozwala na obiektywną ocenę wpływu dorobku Doktoranta na rozwój dziedziny.

Merytoryczna część rozprawy została podzielona na trzy rozdziały. Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie do tematyki badawczej, nakreśla stan wiedzy w zakresie druku 3D implantów kostnych oraz biomateriałów, i kończy się jasno sformułowanymi тезami oraz celami pracy. Drugi rozdział opisuje opracowanie systemu do produkcji filamentów polimerowo-ceramicznych w technologii FFF, szczegółowo przedstawiając konstrukcję urządzenia oraz wyniki badań nad właściwościami uzyskanych materiałów. W trzecim rozdziale zaprezentowano wyniki i dyskusję dotyczącą wytwarzania rusztowań na bazie PLA z dodatkami, takimi jak β -fosforan triwapnia, hydroksyapatyt czy polietylenoglikol (PEG), oraz ocenę ich właściwości mechanicznych, morfologicznych i bioaktywnych. Rozprawa kończy się podsumowaniem wyników badań, zawiera także wykaz skrótów, spis rysunków i tabel oraz bibliografię. Od strony 144 zamieszczono pełne teksty pięciu publikacji naukowych. Ze względu na mały format czcionki wersji drukowanej, analiza była utrudniona, jednak udostępnione wersje elektroniczne pozwoliły na pełną ocenę artykułów.

Pod względem strukturalnym praca jest dobrze zaplanowana, a jej układ logiczny i przejrzysty. Styl pracy jest naukowy, precyzyjny i zgodny z wymaganiami formalnymi. Język jest zrozumiały, a terminologia właściwa dla dziedziny biomateriałów i inżynierii chemicznej. Pomimo drobnych niedociągnięć związanych z formatem drukowanej wersji, całość rozprawy spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim i umożliwia kompleksową ocenę zarówno badań, jak i dorobku naukowego Doktoranta.

Ocena przeglądu literatury

Przegląd literatury w rozprawie doktorskiej mgr inż. Rafała Podgórskiego jest rzetelny i kompleksowy, obejmując około 200 pozycji literaturowych. Autor uwzględnił zarówno klasyczne prace z zakresu biomateriałów i druku 3D, jak i najnowsze badania do 2023 roku, co podkreśla aktualność analizy. Przegląd obejmuje zagadnienia chemiczne, biologiczne i technologiczne, umożliwiając pełne zrozumienie kontekstu badawczego. Autor poruszył kluczowe wyzwania i możliwości w obszarze biomateriałów, inżynierii tkankowej oraz technologii druku 3D, identyfikując lukę badawczą w zakresie ekonomicznych metod produkcji filamentów do druku 3D. Jednakże analiza porównawcza technik druku 3D i produkcji implantów kostnych została przedstawiona dość ogólnie. Bardziej szczegółowe omówienie parametrów wytwarzania filamentów oraz stosowanych materiałów mogłoby wzbogacić kontekst dla przyszłych badań. Mimo tych uwag, przegląd literatury jest rzetelny i stanowi solidną podstawę teoretyczną dla przeprowadzonych badań.

Ocena trafności postawionych тез badawczych i celów pracy

Tezy i cele badawcze sformułowane w rozprawie doktorskiej mgr inż. Rafała Podgórskiego są trafnie ukierunkowane i odpowiadają na istotne wyzwania w zakresie wytwarzania materiałów do druku 3D w kontekście regeneracji tkanki kostnej. Pierwsza teza, dotycząca wykorzystania wytłaczania pneumatycznego do produkcji polimerowo-ceramicznych filamentów, ma istotny potencjał aplikacyjny, choć szersze uzasadnienie potrzeby jej weryfikacji mogłoby lepiej podkreślić innowacyjność pracy. Druga teza, zakładająca, że pneumatyczne wytłaczanie filamentów umożliwia szerokie badanie zróżnicowanych składów rusztowań, jest znacząca, jednak większa część badań skupia się na optymalizacji składu mieszanek, a mniej na procesie wytłaczania. Cele pracy są ambitne i praktyczne, jednak szczegółowa analiza wpływu parametrów technologicznych na jakość filamentów mogłaby zwiększyć wartość aplikacyjną rozprawy. Pomimo tych uwag, postawione tezy i cele są zasadniczo trafne i stanowią solidną podstawę do dalszych badań

w tej dziedzinie, przy czym uwzględnienie głębszej analizy warunków technologicznych mogłoby znacząco wzmocnić praktyczny wymiar pracy.

Ocena merytoryczna pracy

Jako pierwsze swoje osiągnięcie, Doktorant prezentuje opracowanie systemu do laboratoryjnej produkcji filamentów polimerowo-ceramicznych do druku 3D typu FFF. Szczegóły dotyczące tego rozwiązania zostały zaprezentowane w publikacji nr 1 pt. "Pushing Boundaries in 3D Printing: Economic Pressure Filament Extruder for Producing Polymeric and Polymer-Ceramic Filaments for 3D Printers". Przedstawiono tu projekt, budowę oraz zastosowanie ciśnieniowego ekstrudera, który umożliwia produkcję krótkich filamentów polimerowych i polimerowo-ceramicznych przeznaczonych do druku 3D metodą FFF. Zaprojektowane urządzenie, oparte na łatwo dostępnych komponentach, pozwala na wytwarzanie filamentów z minimalnym zużyciem materiału (około 30 g), co znacząco obniża koszty eksperymentów, szczególnie w przypadku drogich materiałów medycznych. Przeprowadzone prace badawcze wykazały możliwość produkcji filamentów z polilaktydu (PLA), polikaprolaktonu (PCL) oraz ich kompozytów z β -TCP, które następnie zostały wykorzystane do wydruku rusztowań kostnych. Urządzenie działa w zakresie temperatur 60–250°C oraz ciśnień 1–8 barów, co zapewnia elastyczność w dostosowywaniu parametrów do różnych materiałów. Tego rodzaju urządzenie jest szczególnie cenne dla środowiska naukowego, ponieważ umożliwia szybkie testowanie i ocenę różnych mieszanek polimerowych i polimerowo-ceramicznych. To rozwiązanie wspiera interdyscyplinarne badania w dziedzinie inżynierii biomateriałów, przyspieszając rozwój technologii produkcji implantów kostnych. Jednym z największych atutów pracy jest fakt, że Autor oferuje swoisty „przepis” na budowę urządzenia, które może być odtworzone przez inne zespoły badawcze. Dzięki temu potencjał aplikacyjny tej pracy znacząco wykracza poza ramy pojedynczego projektu, dając innym naukowcom możliwość prowadzenia eksperymentów w sposób bardziej elastyczny i dostępny. Podkreślenie tych aspektów sprawia, że artykuł ma dużą wartość nie tylko naukową, ale również praktyczną, przyczyniając się do rozwoju technologii biomedycznych na różnych poziomach, od badań laboratoryjnych po potencjalne wdrożenia.

W kolejnej części rozprawy doktorskiej zaprezentowane urządzenie zostało wykorzystane do wytwarzania filamentów do druku 3D z mieszanek biodegradowalnych polimerów i dodatków mających na celu poprawę właściwości mechanicznych, biologicznych oraz osteoindukcyjnych drukowanych rusztowań kostnych. Badania początkowo koncentrowały się na mieszaninach polimerowo-ceramicznych, a szczegółowe wyniki zostały przedstawione w publikacji nr 2 pt. „A Simple and Fast Method for Screening Production of Polymer-Ceramic Filaments for Bone Implant Printing Using Commercial Fused Deposition Modelling 3D Printers”. Opracowano metodę wytłaczania filamentów z polilaktydu (PLLA) i poli(ϵ -kaprolaktonu) (PCL) z dodatkiem różnych stężeń β -fosforanu trójwapniowego (β -TCP) jako składnika ceramicznego. Przeprowadzono testy wytrzymałości na ściskanie, oceniając stabilność strukturalną rusztowań, oraz analizę mikrostruktury przy użyciu mikroskopii skaningowej (SEM) w celu oceny jednorodności rozkładu cząstek ceramicznych w matrycy polimerowej. Badania biologiczne, w tym testy cytotoksyczności *in vitro*, pozwoliły ocenić biokompatybilność materiałów w kontakcie z komórkami kostnymi. Wyniki potwierdziły, że opracowane kompozycje są odpowiednie do zastosowań w inżynierii tkankowej, a metoda wytwarzania filamentów jest efektywna pod względem kosztów i jakości uzyskiwanych rusztowań. Osiągnięcie to stanowi istotny wkład w rozwój technologii materiałowych, oferując efektywną metodę wytwarzania biomateriałów o zoptymalizowanych właściwościach mechanicznych

W dalszej części pracy Doktorant przedstawił nowatorską metodę modyfikacji powierzchni wydruków 3D z polilaktydu (PLA) za pomocą hydrożelowych powłok, szczegółowo omówioną w publikacji nr 3 pt. „Production of 3D Printed Polylactide Scaffolds

with Surface Grafted Hydrogel Coatings”. Technika oparta na reakcji typu Fentona pozwala na prostą, niskokosztową modyfikację materiałów, które mogą znaleźć zastosowanie w inżynierii tkankowej. Badania potwierdzają praktyczne możliwości tej metody w produkcji implantów medycznych, poprawiających hydrofilowość oraz zdolność zatrzymywania wody, a także w roli nośników czynników osteogennych i przeciwzapalnych. Przeprowadzono kompleksową analizę powłok, obejmującą ich grubość, zawartość wody i cytotoksyczność, co podkreśla wysoki standard badawczy. Szczególnie istotne są obserwacje dotyczące cytotoksyczności powłok PVP o wysokiej masie cząsteczkowej (360 kDa), które mogą zatrzymywać odczynniki w matrycy i indukować toksyczność w strukturach 3D. Wyniki te wskazują na potrzebę dalszej optymalizacji procesu, stanowiąc cenny wkład w rozwój inżynierii biomateriałowej.

Kolejne badania obejmowały tworzenie filamentów oraz rusztowań polimerowych z dodatkiem nanocząsteczek hydroksyapatytu. Szczegóły tych badań przedstawione zostały w publikacji nr 4 pt. „Mechanically Suitable and Osteoinductive 3D-Printed Composite Scaffolds with Hydroxyapatite Nanoparticles Having Diverse Morphologies for Bone Tissue Engineering”. Zastosowanie hydroksyapatytu (nHAp) o trzech różnych morfologiach (kulistej, płytkowej i prętowej) oraz modyfikacja powierzchni tych cząsteczek stearynianem wapnia stanowi innowacyjne podejście, które poprawia dyspersję cząsteczek w matrycy polimerowej oraz ich zdolność do interakcji z komórkami, co jest kluczowe dla uzyskania funkcjonalnych biomateriałów. Badania obejmowały ocenę właściwości mechanicznych filamentów i rusztowań, w tym analizy modułu ściskania, sprężystości oraz wytrzymałości, oraz szerokie testy bioaktywności, w tym cytotoksyczności i ekspresji genów osteogenicznych, co podnosi ich wartość w kontekście aplikacji biomedycznych. Zaletami pracy są udowodnione korzyści płynące z zastosowania modyfikowanych cząsteczek nHAp o prętowej morfologii, które poprawiają moduł ściskania rusztowań, czyniąc je bardziej wytrzymałymi. Badania wykazały również, że ekspozycja cząsteczek kulistych na wysokie temperatury prowadzi do ich aglomeracji, co jest istotną obserwacją przy projektowaniu przyszłych kompozytów.

W dalszej części rozprawy przedstawiono metodę wytwarzania rusztowań polikaprolakton/poli(glikol etylenowy) PCL-PEG o kontrolowanej porowatości przy użyciu dodatków porogennych, szczegółowo opisaną w publikacji nr 5 pt. „Fabrication of 3D-Printed Scaffolds with Multiscale Porosity”. Przeprowadzono wszechstronne testy mechaniczne oraz analizę morfologiczną, wykazując wpływ dodatku PEG na porowatość i moduł ściskania. Uzyskano istotne informacje na temat bilansu między wytrzymałością mechaniczną a funkcjonalnością regeneracyjną rusztowań. Badania potwierdziły, że multiskalowa porowatość umożliwia dostosowanie struktury rusztowań do wymagań związanych z regeneracją tkanki kostnej, otwierając możliwości projektowania implantów o zindywidualizowanych właściwościach. Szczególnie cenną obserwacją jest odkrycie, że porowatość powierzchniowa rusztowań może wpływać na orientację i wzrost komórek, co ma kluczowe znaczenie w procesach regeneracyjnych.

Uwagi szczególne, w tym niedociągnięcia stwierdzone w pracy:

- W pracy wskazano, że niektóre materiały wykazują zbyt wysoką lepkość, aby mogły zostać wykorzystane do wytwarzania filamentów przy użyciu zaprojektowanego systemu (art. 1, str. 8). Brakuje jednak jakiegokolwiek analizy uwzględniającej teoretyczne lub empiryczne zależności opisujące opory przepływu w urządzeniu, szczególnie w kontekście nienewtonowskiego zachowania polimerów w stanie stopionym. Przeprowadzenie takich obliczeń pozwoliłoby określić graniczne wartości lepkości dla stosowanych materiałów, co znacząco zwiększyłoby funkcjonalność i przewidywalność działania systemu.
- Zauważony w pracy problem przebijania powietrza przez masę polimeru (art. 1, str. 10) wymaga dokładniejszego oszacowania maksymalnych wartości ciśnienia operacyjnego.

Przydatne byłoby określenie zależności między natężeniem przepływu a ciśnieniem, uwzględniając właściwości cieczy i geometrię urządzenia, co pozwoliłoby na lepszą kontrolę procesu wytłaczania.

- W pracy zwrócono uwagę na problem przedmuchu powietrza przy zbyt małej ilości polimeru w komorze (art. 2, str. 5), co może zakłócać prawidłowe funkcjonowanie urządzenia. Jednak nie przedstawiono żadnych wytycznych dotyczących minimalnej objętości materiału, która zapewniałaby stabilną pracę systemu. Określenie takiej wartości byłoby istotne dla użytkowników planujących eksperymenty, umożliwiając optymalizację procesu wytłaczania.
- Wzmianka w artykule, że czas topienia zależy od temperatury topnienia i przewodności cieplnej materiału (art. 1, str. 10), wymaga także rozwinięcia. Należałoby przedstawić zależności teoretyczne (lub empiryczne) uwzględniające geometrię urządzenia, temperaturę oraz właściwości cieplne polimerów, co ułatwiłoby planowanie eksperymentów przez użytkowników.
- Zjawisko pęcznienia ekstruzji (tzw. efekt Barusa), które wpływa na średnicę filamentów (art. 2, str. 5), wymaga dokładniejszej analizy. Brakuje omówienia metod kontroli tego efektu, takich jak optymalizacja geometrii dyszy czy modyfikacja parametrów procesu wytłaczania (jak temperatura i ciśnienie) lub parametrów druku 3D.
- W proponowanym rozwiązaniu brakuje także informacji dotyczących doboru izolacji termicznej. Przeprowadzenie obliczeń cieplnych, uwzględniających straty ciepła i bezpieczeństwo użytkownika, mogłoby poprawić efektywność procesu i bezpieczeństwo pracy.
- W Tabeli 2 (art. 2, str. 8), przedstawione są wymiary wydrukowanych rusztowań, które różnią się między sobą oraz różnią się od wymiarów projektowych. Rodzi się zatem wątpliwość czy wyniki uzyskane z testów wytrzymałościowych nie są obciążone błędem? Czy porównywanie takich wyników uzyskanych na podstawie analiz dla obiektów o różnych wymiarach nie wpływa na wyciągnięte wnioski? Należy podkreślić, że w Tabeli 2 podane są jedynie wymiary próbek testowanych biologicznie, natomiast brak jest danych dla próbek testowanych wytrzymałościowo.
- W art. 2, (str. 8) zauważono, że dodatek ceramiki do PLLA zwiększa kruchość rusztowań, prowadząc do ich pęknięcia przy maksymalnym naprężeniu ściskającym. Wskazana byłaby tutaj głębsza analiza tego zjawiska, uwzględniając wpływ geometrii porów, stopnia wymieszania cząstek ceramicznych. Pozwoliłoby to na identyfikację punktu granicznego, po którym ceramika obniża wytrzymałość mechaniczną.
- W pracy zauważono, że próba zwiększenia zawartości ceramiki w filamentach powyżej 50% wag. zakończyła się problemami z łamliwością filamentów (art. 2 str. 8). Autor nie podaje informacji czy podjęto próby oszacowania górnej granicy stężenia ceramiki oraz zbadania, jakie zmienne (np. zastosowanie innych typów polimerów) mogłyby zwiększyć tę granicę.
- W pracy dotyczącej zastosowania powłok hydrożelowych, obliczenia porowatości (art.3, rozdział 3.2, str. 140) nie uwzględniają wpływu hydrożelowych powłok na objętość porów, co może wpłynąć na dokładność wyników, zwłaszcza gdy warstwa hydrożelu wypełnia pory lub zmienia ich kształt. Pomimo trudności związanych z tym zagadnieniem, warto było rozważyć włączenie wpływu hydrożelu w obliczenia porowatości, co pozwoliłoby uzyskać dokładniejsze dane.
- W pracy stwierdzono, że hydrożele 10 kDa zatrzymują więcej wody na rusztowaniach niż na dyskach, a dla hydrożeli 360 kDa jest odwrotnie (art. 3, str. 140). Te różnice wymagałyby głębszej analizy, zwłaszcza w kontekście struktury powierzchni i porowatości materiałów. Należałoby szczegółowo omówić tę kwestię i porównać z literaturą.
- Podczas badań nad tworzeniem powłok hydrożelowych stwierdzono, że polimery o dużej masie cząsteczkowej zatrzymują nadmiar odczynników w matrycy hydrożelowej i wywołują

cytotoksyczność, która nie występuje na płaskich powierzchniach (art.3, str. 141). Jest to bardzo cenna informacja, jednak brakuje dyskusji na temat kontroli tego zjawiska, co byłoby istotne z punktu widzenia optymalizacji procesów produkcji materiałów biokompatybilnych oraz zwiększenia ich bezpieczeństwa w zastosowaniach medycznych.

- W pracy dotyczącej zastosowania nanocząsteczek hydroksyapatytu przedstawiono parametry druku 3D (art. 4, str. 5, Tabela 2), jednak brakuje informacji na temat kryteriów ich wyboru oraz optymalizacji dla różnych kompozycji. Podanie tych informacji byłoby cenne dla potencjalnych użytkowników, ponieważ dałoby wskazówki dotyczące doboru odpowiednich parametrów druku w zależności od specyfiki materiału.
- W pracy wykazano, że kompozyty z prętową morfologią cząsteczek nHAp osiągają ponad dwukrotnie wyższy moduł ściskania (art.4, str. 14) jednak brak jest wyjaśnienia przyczyn tej przewagi. Dlaczego ta morfologia wykazuje korzystniejsze właściwości, szczególnie w kontekście interakcji z matrycą polimerową? Czy istnieje możliwość kontrolowania tej morfologii w celu uzyskania optymalnych właściwości mechanicznych kompozytów?
- W pracy dotyczącej badań nad wytworzeniem rusztowań o kontrolowanej porowatości (art. 5) brakuje ilościowej analizy rozkładu wielkości porów, co ma istotne znaczenie w kontekście innych badań, wskazujących na krytyczne znaczenie rozmiaru porów dla przenikania komórek, dyfuzji składników odżywczych oraz regeneracji tkanki. Choć uwzględnienie tej analizy może być trudne, mogłoby to znacząco wzbogacić wartość naukową pracy i umożliwić dokładniejszą ocenę wpływu rozmiaru porów na funkcjonalność rusztowań.
- W kontekście badań nad wytworzeniem rusztowań o kontrolowanej porowatości (art. 5) zauważono wyraźny wpływ porowatej powierzchni na orientację i wzrost komórek. Brakuje jednak szczegółowych informacji na temat metod sterowania tym procesem oraz wskazania zastosowań, w których kontrolowanie tych właściwości miałyby kluczowe znaczenie.

Pomimo przedstawionych uwag krytycznych, pracę doktorską należy uznać za wartościową i istotną w kontekście badań nad zastosowaniem nowoczesnych technologii wytwarzania rusztowań biomateriałowych. Zawiera ona liczne cenne wnioski, które mogą stanowić fundament do dalszych badań i rozwoju w tej dziedzinie. Problemy, które zostały poruszone, nie umniejszają znaczenia wyników, lecz stanowią punkt wyjścia do ich dalszej analizy i udoskonalenia.

Pytania i zagadnienia do dalszej dyskusji z Doktorantem

Uwzględniając przedstawione uwagi, pojawiły się pewne kwestie, które mogą stanowić punkt wyjścia do dalszej dyskusji:

- W pracy prezentowane są konkretne rozwiązania dotyczące składu i metod otrzymywania filamentów z różnorodnymi dodatkami, jednak brakuje szczegółowej analizy kluczowych parametrów, takich jak ciśnienie powietrza, temperatura wytłaczania czy lepkość przetwarzanych materiałów, które mają istotny wpływ na właściwości mechaniczne i strukturalne finalnych rusztowań. Biorąc pod uwagę, że praca ma się koncentrować na pneumatycznym wytłaczaniu filamentów, tego rodzaju analiza byłaby istotna i spójna z tezami pracy. Czy Doktorant mógłby odnieść się do tej kwestii?
- Podczas badań nad wytwarzaniem filamentów metodą pneumatycznego wytłaczania zidentyfikowano szereg czynników wpływających na stabilność procesu, takich jak zbyt wysoka lepkość materiałów, przebijanie powietrza przez masę polimeru, pojawianie się pęcherzyków powietrza w filamencie oraz pęcznienie ekstruzji (efekt Barusa), które prowadzi do zmienności średnicy filamentów. Czy Doktorant mógłby przedstawić propozycje rozwiązań tych problemów oraz wskazać, które parametry procesu uważa Pan za kluczowe w optymalizacji wytłaczania filamentów z materiałów o różnych właściwościach

reologicznych? Jakie zależności należałoby uwzględnić, aby zwiększyć stabilność i przewidywalność działania zaprojektowanego systemu?

- Jakie kryteria były brane pod uwagę przy ustalaniu parametrów druku w przeprowadzonych eksperymentach? W jaki sposób dobór tych parametrów był optymalizowany dla poszczególnych materiałów, a także jakie czynniki miały decydujące znaczenie przy tym doborze? W jaki sposób parametry druku wpływają na właściwości uzyskanych rusztowań, zarówno pod kątem ich struktury, jak i funkcjonalności?

Podsumowanie

Rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Podgórskiego pt. „Opracowanie procesu produkcji prototypowych wielofunkcyjnych materiałów kompozytowych do regeneracji tkanki kostnej przy użyciu technik druku 3D” stanowi oryginalny i nowatorski wkład w rozwój inżynierii chemicznej oraz technologii biomateriałów. Nowością pracy jest opracowanie pneumatycznego ekstrudera do wytwarzania filamentów z minimalnym zużyciem surowców, co umożliwia efektywne testowanie kosztownych materiałów biomedycznych, takich jak polimery biodegradowalne w połączeniu z różnymi dodatkami. Rozwiązanie to istotnie upraszcza proces produkcji filamentów dedykowanych drukowi 3D implantów kostnych, co stanowi znaczący postęp w dziedzinie medycyny regeneracyjnej.

Wartość naukową rozprawy potwierdza znaczący dorobek publikacyjny Doktoranta, obejmujący pięć artykułów opublikowanych w renomowanych czasopismach, których łączny Impact Factor wynosi 19,8. Po uwzględnieniu publikacji naukowych niezwiązanych bezpośrednio z rozprawą, całkowity wskaźnik Impact Factor osiąga wartość 66,365, co świadczy o wysokim poziomie i szerokim zakresie prowadzonych badań. Dodatkowo, dorobek naukowy Doktoranta został doceniony w środowisku naukowym, o czym świadczy liczba 139 cytowań (bez autocytowań) w bazie Scopus oraz h-index na poziomie 8, potwierdzający istotny wkład autora w rozwój dyscypliny.

Mgr inż. Rafał Podgórski wykazał również znaczące zdolności organizacyjne, będąc kierownikiem grantu PRELUDIUM 19 oraz uczestnicząc w prestiżowych projektach badawczych finansowanych przez NCBiR i NCN. Jest współautorem dwóch zgłoszeń patentowych, co dodatkowo podkreśla aplikacyjny potencjał jego badań. Jego aktywność naukowa została ugruntowana licznymi wystąpieniami na konferencjach krajowych i międzynarodowych, co wskazuje na jego kompetencje w zakresie prezentacji wyników badań oraz współpracy w środowisku naukowym.

Opracowane urządzenie oraz badania nad materiałami kompozytowymi do druku 3D charakteryzują się istotnym potencjałem wdrożeniowym, co dodatkowo wzmacnia praktyczną wartość pracy. W oparciu o przedstawione wyniki oraz dorobek naukowy, uznaję rozprawę doktorską mgr inż. Rafała Podgórskiego za spełniającą wymogi stawiane pracom doktorskim. W związku z powyższym **wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Chemicznej Politechniki Warszawskiej o przyjęcie pracy oraz dopuszczenie Pana mgra inż. Rafała Podgórskiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego.**

