

Kraków, 14.01.2026 r.

Dr hab. inż. Anna Góral, prof. instytutu
Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej
im. A. Krupkowskiego Polskiej Akademii Nauk
ul. Reymonta 25, 30-059 Kraków

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Maroszka

pod tytułem „**Opracowanie materiału na bazie spoiw o obniżonym śladzie węglowym o odpowiednich właściwościach reologicznych umożliwiających drukowanie prefabrykowanych elementów budowlanych metodą addytywną**” przygotowanej pod kierunkiem **dr hab. inż. Marka Hebdy, prof. PK** oraz **dr hab. inż. Izabeli Hager, prof. PK**

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej – pismo z dnia 07.11.2025 r. (I-0.510.6.3.2025).

Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.).

2. Charakterystyka i opis rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Maroszka pt. „*Opracowanie materiału na bazie spoiw o obniżonym śladzie węglowym o odpowiednich właściwościach reologicznych umożliwiających drukowanie prefabrykowanych elementów budowlanych metodą addytywną*” dotyczy ważnego zagadnienia, jakim jest opracowanie mieszanki betonowej przeznaczonej do wytwarzania przyrostowego (3D Concrete Printing, 3DCP) o obniżonym śladzie węglowym. Praca zawiera zagadnienia o istotnej wartości poznawczej oraz przede wszystkim aplikacyjnej, tj. projektowania i wytwarzania nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych. Zastosowanie druku 3D umożliwia poprawę efektywności operacyjnej oraz wpisuje się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym, poprzez ograniczenie odpadów procesowych oraz możliwość stosowania mieszanek o obniżonym współczynniku klinkier-cement. Dużą zaletą technologii 3DCP jest również możliwość personalizacji projektów oraz wytwarzania wyrobów o złożonej geometrii. Recenzowana rozprawa doktorska została zrealizowana w ramach programu Doktorat wdrożeniowy (DWD/5/0237/2021) we współpracy pomiędzy Politechniką Krakowską oraz partnerem przemysłowym – firmą ATMAT Sp. z o. o.

Formalna strona pracy

Praca doktorska napisana jest w języku polskim. Niemniej jednak artykuły naukowe P1-P5 opisujące wyniki badań zostały napisane w j. angielskim i opublikowane w czasopiśmie: Applied Sciences (P1) oraz Materials (P2-P5). Artykuły P1-P5 zostały załączone do rozprawy doktorskiej w formie załączników wraz z oświadczeniami autorów o ich wkładzie włożonym w ich powstanie. Rozprawa składa się z następujących rozdziałów: 1. Wprowadzenie, 2. Cel i zakres pracy, 3. Metodyka badawcza, 4. Uzasadnienie połączenia publikacji w cykl, 5. Omówienie uzyskanych wyników badań, 6. Podsumowanie i wnioski, 7. Perspektywy przyszłych badań. Na końcu Doktorant zamieścił bibliografię, dorobek naukowy oraz załączniki. Tytuł recenzowanej pracy doktorskiej odzwierciedla treści zawarte w pracy. Rozprawa jest przejrzysta, niemniej jednak Autor nie uniknął błędów literowych w tekście.

Ocena merytoryczna i metodologiczna rozprawy

Na początku recenzowanej rozprawy doktorskiej, mgr inż. Marcin Maroszek wyjaśnił motywację podjęcia tematu badawczego oraz przedstawił zalety i możliwości druku 3D betonu, wskazując jednocześnie trudności związane z jej szerokim zastosowaniem w praktyce budowlanej. Motywacją do podjęcia badań było zapotrzebowanie ze strony przemysłu na opracowanie materiałów o obniżonym śladzie węglowym i posiadających właściwości umożliwiające ich zastosowanie w druku 3D prefabrykowanych elementów budowlanych.

Następnie Doktorant przedstawił 3 tezy pracy doktorskiej:

Teza 1: *Odpowiednie dostosowanie parametrów technologicznych procesu druku umożliwi produkcję prefabrykowanych elementów betonowych metodą druku 3D z wykorzystaniem w mieszankach surowców odpadowych jako dodatków mineralnych, które obniżają udział cementu portlandzkiego oraz ślad węglowy materiału.*

Teza 2: *Zastosowanie kruszyw lekkich jako częściowego zamiennika piasku kwarcowego pozwala na obniżenie współczynnika przewodności cieplnej materiału, a tym samym poprawę właściwości termoizolacyjnych prefabrykatów wytwarzanych metodą druku 3D.*

Teza 3: *Zastosowanie technologii druku 3D umożliwia wytwarzanie prefabrykatów o złożonej geometrii, pozwalającej na poprawę parametrów termoizolacyjnych przegród budowlanych.*

Celem pracy było opracowanie betonu drobnoziarnistego na bazie cementu portlandzkiego, którego udział częściowo zastąpiono składnikami mineralnymi będącymi odpadami procesów wysokotemperaturowych lub kruszywami lekkimi, przeznaczonego do druku 3D elementów. Celem wdrożeniowym było „opracowanie rozwiązań technologicznych oraz składu mieszanki cementowej z udziałem surowców odpadowych i/lub materiałów pochodzących z recyklingu, umożliwiających ich praktyczne zastosowanie w działalności przemysłowej firmy ATMAT sp. z o.o”. Zakres pracy obejmował stworzenie infrastruktury do druku 3D i przygotowania mieszanek oraz zbadanie wpływu wybranych parametrów procesu na stabilność i powtarzalność wydajności ekstruzji oraz jakość i właściwości mechaniczne wytwarzanych elementów, a także zbadanie ich właściwości termoizolacyjnych.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawił program badań, który podzielił na trzy etapy: „I/ Opracowanie składu mieszanki na bazie cementu portlandzkiego”, „II/ Analiza właściwości materiału stwardniałego oraz wpływu procesu druku 3DCP na te właściwości” oraz „III/ Weryfikacja możliwości modyfikacji składu mieszanki na bazie cementu portlandzkiego przez wprowadzenie surowców odpadowych jako zamienników spoiwa lub kruszywa lub jako dodatków wypełniających zmniejszających gęstość materiału”. Opisał sposoby przygotowania materiałów i mieszanek, zastosowane metody i infrastrukturę badawczą. Realizacja badań obejmowała m. in. (i) obrazowanie i modelowanie 3D (CAD/MES), (ii) analizę rozkładu granulometrycznego proszków, (iii) przygotowanie i analizę mieszanek, tj. badania reologiczne i konsystencji, (iv) badania próbek, tj. gęstość pozorną, wytrzymałość na zginanie oraz ściskanie, badania jakości połączenia międzywarstwowego w próbie rozciągania w różnych kierunkach, obserwacje powierzchni i przekrojów próbek za pomocą mikroskopii cyfrowej, nasiąkliwość metodą grawimetryczną, rozkład wilgoci oraz przebieg jej wnikania oraz przewodność cieplną. Przeprowadzono również analizę cyklu życia mieszanek oraz opracowano i wytworzono prefabrykaty ściennie.

W dalszej części pracy Doktorant przedstawił uzasadnienie połączenia pięciu publikacji w spójny cykl opisujący wyniki badań przeprowadzonych w trzech etapach: 1) Charakterystyka mieszanki bazowej i czynniki procesu druku, 2) Weryfikacja właściwości elementów drukowanych oraz 3) Weryfikacja możliwości modyfikacji materiałowej surowcami odpadowymi. Przedstawił swój znaczący udział w powstanie poszczególnych artykułów, szczegółowo opisując swoje zaangażowanie w ich powstanie. Według deklaracji mgr inż. Marcina Maroszka, jego wkład w opublikowanych pracach dotyczył tak ważnych zagadnień jak: sformułowanie problemu badawczego oraz opracowanie koncepcji i planu badań, przygotowanie mieszanek i badanie ich konsystencji, modelowanie, drukowanie 3DCP, przygotowanie narzędzi programistycznych do akwizycji i przetwarzania danych, wykonanie próbek, wykonanie badań mechanicznych, opracowanie i wizualizacja uzyskanych wyników, przygotowanie manuskryptów, korekta manuskryptów po recenzjach i przygotowanie ich ostatecznej wersji. Co więcej, w czterech pracach Doktorant jest pierwszym autorem a w jednym drugim, co potwierdza jego znaczny wkład w powstanie niniejszych publikacji, świadcząc jednocześnie o umiejętności pracy w zespole badawczym.

W rozdziale piątym mgr inż. Marcin Maroszek omówił w sposób syntetyczny wyniki otrzymanych badań i opublikowanych w wyżej wymienionych artykułach naukowych.

W pierwszym etapie opracowano mieszankę bazową na bazie cementu portlandzkiego CEM I 52.5R, którą przetestowano pod kątem właściwości reologicznych, możliwości druku i przydatności do budowy wielowarstwowych wyrobów badając odporność materiału na deformacje spowodowane ciężarem kolejnych warstw nakładanych w procesie druku na specjalnie zaprojektowanym stanowisku.

Przeanalizowano wpływ różnych czynników na wydajność wytłaczania i standaryzację procesu, która jest niezbędna do zapewnienia bezpiecznego i efektywnego wykorzystania 3DCP w budownictwie, wysokiej powtarzalności i jakości produkowanych elementów. W pracy

P1 badano wpływ następujących parametrów: prędkości obrotowej ekstrudera, konsystencji mieszanki, średnicy dyszy oraz dodatku włókien polipropylenowych. Wykazano, że oprócz wymienionych czynników, wydajność procesu zależy również od zawartości materiału w zbiorniku. Wydajność malała wraz z jego ubytkiem. Stwierdzono, że ok. 4 kg materiału jest niezbędne do wypełnienia i zapewnienia odpowiedniego ciśnienia w układzie. W celu zapewnienia druku wysokiej jakości powtarzalnych elementów o zróżnicowanej geometrii, zdefiniowano odpowiednie współczynniki korekcyjne ekstruzji.

W drugim etapie prac przeanalizowano właściwości mechaniczne (wytrzymałość na zginanie, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie) w kierunku prostopadłym i równoległym do kierunku formowania warstw w próbkach wytworzonych z mieszanki bazowej metodą 3DCP oraz porównaniu otrzymanych wyników z próbkami wytworzonymi metodą odlewania. Wyniki opublikowano w pracy P2. Wykazano wyraźną anizotropię właściwości w próbkach drukowanych 3D, najwyższą w przypadku wytrzymałości na zginanie. Co więcej stwierdzono, że zwiększanie przerwy czasowej między nakładaniem kolejnych warstw wpływa niekorzystnie na właściwości mechaniczne wyrobów drukowanych, szczególnie w kierunku prostopadłym do warstw, co jest związane obecnością porów i mikropęknięć obserwowanych w mikrostrukturze. W oparciu o uzyskane informacje, w artykule P3 zbadano wpływ geometrii wewnętrznej elementów (układ przegród, wzór wypełnienia, obecność pustek powietrznych) na współczynnik przenikania ciepła. Przeprowadzono modelowanie metodą elementów skończonych i zaprojektowano w oparciu o regułę dotyczącą wydłużania ścieżek przewodzenia ciepła w materiale nośnym optymalny wzór przegród możliwy do wydruku 3D i zapewniający niski współczynnik przenikania ciepła na poziomie $0,20 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

W trzecim etapie skoncentrowano się na wytworzeniu mieszanek bardzo ważnych z punktu widzenia realizacji rozprawy doktorskiej, bowiem powstałych z materiału bazowego, do którego dodano surowce wtórne, jako substytuty części spoiwa i/lub kruszywa drobnego. W artykule P4 wykazano, że materiały z recyklingu (odpady z druku 3D, stłuczka szklana, mieszany gruz budowlany, gruz ceglany, popiół lotny i żużel wielkopiecowy) i lekkie dodatki izolacyjne (perlit ekspandowany, keramzyt i spieniony polistyren) mogą być z powodzeniem stosowane w druku 3D. Co więcej, zawartość tych materiałów odpadowych miała istotny wpływ na parametry procesowe, właściwości mechaniczne i termoizolacyjne drukowanych elementów. Próbkę drukowaną z mieszanek zawierających mieszany gruz budowlany i gruz ceglany charakteryzowały się dobrymi właściwościami mechanicznymi i stosunkowo niską nasiąkliwością. Z kolei keramzyt wykazał najkorzystniejszy kompromis pomiędzy właściwościami izolacyjnymi i mechanicznymi. Na podstawie danych literaturowych określono również oddziaływanie na środowisko analizując cykl życia wybranych mieszanek możliwych do zastosowania w druku 3D. Analiza pokazała możliwą znaczną redukcję emisji CO_2 w zależności od rodzaju i zawartości składników pochodzących z recyklingu. Niemniej jednak, jak wykazano w rozprawie doktorskiej, wyroby drukowane z opracowanych mieszanek zawierających materiały z recyklingu i dodatki izolacyjne wykazują znacznie mniejsze

właściwości mechaniczne w stosunku do materiałów drukowanych z mieszanki bazowej i odlewanych z tej mieszanki, co należy uwzględnić przy projektowaniu elementów budowlanych. W dalszej części rozdziału Doktorant przedstawił prefabrykaty ścienne i przykładowe wyroby wytworzone metodą addytywną 3DCP na aparaturze specjalnie dostosowanej do tego typu materiałów w ramach realizacji doktoratu.

W kolejnych rozdziałach pracy Doktorant podsumował wyniki badań zamieszczając najważniejsze wnioski oraz przedstawił plan dalszych badań w tej tematyce.

Podsumowując część metodologiczną i merytoryczną rozprawy doktorskiej, uważam, że cele pracy zostały przez mgr inż. Marcina Maroszkę osiągnięte. Uzyskane wyniki przyczyniają się do rozwoju inżynierii materiałowej, szczególnie w zakresie opracowania mieszanki materiałów możliwej do wykorzystania w druku 3D betonu i wytworzenia półfabrykatów o obniżonym śladzie węglowym. Doktorant w sposób przejrzysty i logicznie zaplanowany przedstawił zagadnienia analizowane w pracy, których zrealizowanie wymagało wiedzy i umiejętności w zakresie przeprowadzenia zaplanowanych eksperymentów. Na podkreślenie zasługuje przedstawienie analizowanych zagadnień od strony technologicznej, co z pewnością jest związane z wdrożeniowym charakterem rozprawy. Świadczy to o tym, że Pan mgr inż. Marcin Maroszek potrafi zaplanować i przeprowadzić eksperyment oraz wyciągać wnioski z wyników wykonanych badań. Należy zaznaczyć duże zaangażowanie Doktoranta w opracowanie drukarki laboratoryjnej zaprojektowanej na potrzeby testowania mieszanek do technologii 3DCP. Szczególne znaczenie ma określenie zależności pomiędzy właściwościami reologicznymi mieszanki a parametrami pracy urządzenia drukującego, co z kolei wpływa na jakość i powtarzalność druku 3D betonu. W mojej ocenie Pan mgr inż. Marcin Maroszek jednak za mało uwagi poświęcił w pracy charakterystyce mikrostrukturalnej zaprojektowanych mieszanek oraz drukowanych wyrobów.

Pan mgr inż. Marcin Maroszek posiada dobre kompetencje w podjętej tematyce badawczej, o czym świadczy analiza literatury przedmiotu zamieszczona w rozprawie i opublikowanych artykułach. Doktorant opisując aktualny stan zagadnienia, wskazał obszary wiedzy wymagające dalszego uzupełnienia i rozwinięcia, w które wpisuje się oceniana rozprawa doktorska. Zaproponował zastosowanie nowych rozwiązań materiałowych w budownictwie z wykorzystaniem technologii przyrostowej oraz zbadał właściwości metodami dedykowanymi dla wyrobów betonowych. Recenzowana rozprawa doktorska ma wyraźny charakter aplikacyjny. Opracowane innowacje przyczyniły się do rozszerzenia oferty handlowej firmy ATMAT Sp. z o. o. poprzez wprowadzenie do produkcji głowic drukujących dedykowanych do druku 3D, rozwoju systemów sterowania i dozowania materiałów półsuchych oraz rozwoju technologii druku 3D elementów konstrukcyjnych i architektonicznych z zastosowaniem mieszanek o obniżonym śladzie węglowym. Znaczenie wdrożeniowe zostało potwierdzone przez Prezesa Zarządu firmy w stosownym liście zamieszczonym w pracy.

3. Uwagi merytoryczne i dyskusyjne

Po lekturze pracy, w moim odczuciu, kilka zagadnień wymaga przedyskutowania i wyjaśnienia. Nie umniejszają one jednak wartości pracy.

1) Pierwsza teza pracy doktorskiej sugeruje, że dotyczy ona przede wszystkim opracowania parametrów wytwarzania prefabrykowanych elementów betonowych. Tymczasem temat jasno wskazuje, że głównym celem pracy jest opracowanie materiału do konkretnego zastosowania. Stąd też, biorąc pod uwagę tematykę doktoratu, zamiast „odpowiedniego dostosowania parametrów technologicznych procesu druku”, moim zdaniem bardziej adekwatne byłoby zaakcentowanie, że *zastosowanie opracowanej mieszanki zawierającej surowce odpadowe, jako dodatki mineralne obniżające udział cementu portlandzkiego oraz ślad węglowy, umożliwi produkcję prefabrykowanych elementów betonowych metodą druku 3D przy odpowiednim dostosowaniu parametrów technologicznych procesu.*

Z kolei drugą i trzecią tezę można z powodzeniem połączyć w jedną.

2) Charakterystyka proszków wykorzystanych do zaprojektowania mieszanki ma kluczowe znaczenie w zapewnieniu powtarzalności wyników badań. Wiadomo, że właściwości materiałów wyjściowych, obok zastosowanych parametrów procesu wytwarzania, mają decydujący wpływ na powodzenie procesu wytłaczania, jakość połączeń międzywarstwowych, mikrostrukturę i właściwości otrzymanych wyrobów. Szkoda, że Doktorant nie przeanalizował wpływu badanych mieszanek (jakościowy i ilościowy skład fazowy, morfologia materiałów proszkowych, rozkład wielkości ziaren) na właściwości wytworzonych próbek i nie przedstawił dyskusji naukowej odnośnie otrzymanych wyników. Wprawdzie Doktorant napisał, że przeprowadzał badania składu chemicznego metodą rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej, ale nie przedstawił żadnych rezultatów. Bardzo pożądana byłaby również analiza mikrostruktury z identyfikacją faz i składu fazowego wytworzonych próbek.

3) Sformułowanie „Jednocześnie monitorowano siłę działającą na próbkę za pomocą wagi Radwag WLC/C2, na której była ustawiona próbka.” (str. 47) jest nieprofesjonalne.

4) Czy wyroby z dodatkiem materiałów odpadowych zostały wytworzone przy zastosowaniu optymalnych parametrów procesu 3DCP określonych dla mieszanki bazowej?

5) Zastosowanie druku 3D jest coraz szerzej stosowane, niemniej jednak materiały na bazie betonu wytworzone tą technologią wykazały czterokrotnie niższą wytrzymałość na ściskanie niż próbki odlewane. Dodanie drobno pokruszonych materiałów z recyklingu czy lekkich materiałów izolacyjnych jeszcze pogorszyło właściwości mechaniczne próbek drukowanych. Czy Doktorant ma pomysł, w jaki sposób skutecznie poprawić właściwości mechaniczne wydrukowanych próbek na bazie betonu?

6) Przy opracowywaniu materiałów, w tym przypadku budowlanych, pożądane jest zdefiniowanie minimalnej i optymalnej wytrzymałości oraz porównania z nimi wyników otrzymanych dla wyrobów drukowanych 3D.

- 7) Próbki wydrukowane w 3D są porowate. Dlatego też istotne byłoby ilościowe określenie porowatości otrzymanych wyrobów, np. na podstawie analizy przekrojów mikrostruktur wykonanych w SEM BSE lub innymi dostępnymi metodami. Pozwoliłoby to na porównanie porowatości poszczególnych próbek.
- 8) Jakie parametry należy wziąć pod uwagę przy opracowywaniu standaryzacji rozwiązań materiałowych w technologii 3DCP?
- 9) W zastosowaniach praktycznych istotne jest, aby wytworzone wyroby były skalowalne. Jakie parametry powinny zostać spełnione, żeby było to możliwe przy zastosowaniu procesu 3DCP?

4. Wniosek końcowy

W opinii końcowej stwierdzam, że recenzowana praca doktorska Pana mgr inż. Marcina Maroszka zawiera szereg wartościowych wyników badań o charakterze poznawczym, które stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim było opracowanie mieszanki na bazie cementu portlandzkiego z dodatkiem surowców z recyklingu o obniżonym śladzie węglowym, która umożliwi wytwarzanie prefabrykowanych elementów betonowych metodą druku 3D. Wyniki zadań zrealizowanych w ramach doktoratu zostały opublikowane w recenzowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Świadczy to o ich znaczącej wartości poznawczej w zakresie podjętego tematu badawczego. Powyższe dokonania posiadają również istotne znaczenie aplikacyjne. Wyniki te mogą stanowić podstawę do dalszych prac nad drukiem 3D wyrobów z betonu wykazujących obniżony ślad węglowy, dobre właściwości mechaniczne oraz niski współczynnik przewodzenia ciepła.

Sposób przedstawienia i opracowania wyników badań wskazuje, że Autor rozprawy bardzo dobrze opanował warsztat badawczy niezbędny do realizacji pracy i wykazał niezbędną wiedzę z zakresu inżynierii materiałowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa mgr inż. Marcina Maroszka pt. „Opracowanie materiału na bazie spoiw o obniżonym śladzie węglowym o odpowiednich właściwościach reologicznych umożliwiających drukowanie prefabrykowanych elementów budowlanych metodą addytywną” spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Anne Górnal

