

Gliwice, 12.01.2026r.

RECENZJA

pracy doktorskiej
Pana mgra 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”*

Promotor: dr hab. inż. Marek Hebda, Prof. PK,
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Izabela Hager, prof. PK
opracowana na zlecenie Rady Naukowej
Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej
z dnia 7 listopada 2025 roku

Recenzja opracowana została na podstawie Uchwały Rady Naukowej dyscypliny Inżynieria Materiałowa z dnia 22 października 2025 roku oraz pisma nr I-0.510.6.2.2025 z dnia 07.11.2025 roku Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej Pana dra hab. inż. Janusza Mikuły Prof. PK. Pracę zrealizowano w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy, umowa DWD/5/0237/2021z, a partnerem przemysłowym doktoratu jest firma ATMAT Sp. z o.o.

Charakterystyka ogólna pracy

Podstawę oceny rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Maroszka stanowi powiązany tematycznie cykl pięciu artykułów naukowych opublikowanych w recenzowanych czasopismach, takich jak *Materials* (4 publikacje; 140 pkt; IF 3,2) i *Applied Sciences* (1 publikacja; 100 pkt; IF 2,5), indeksowanych w bazie Journal Citation Reports i ujętych w wykazie czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych Ministra Nauki z dnia 05 stycznia 2024 r.

Wybór czasopism, a przede wszystkim logiczny i spójny ciąg artykułów przedstawiający cele i wyniki badań uważam za jak najbardziej prawidłowy. Należy podkreślić, że przedstawione do oceny artykuły naukowe mają charakter współautorski, przy czym doktorant jest pierwszym autorem w 4 spośród nich. Deklarowane zaangażowanie doktoranta, potwierdzone zostało w oświadczeniach współautorów, zawierające dodatkowo ich wkład merytoryczny w powstaniu publikacji. Udział Doktoranta we wszystkich zrealizowanych pracach naukowo-badawczych jest dominujący.

Na dorobek naukowy Doktoranta składa się 14 współautorskich artykułów opublikowanych w renomowanych recenzowanych czasopismach z listy Journal Citation Reports, a wskaźniki bibliometryczne wynoszą: wskaźnik Hirsch 6 wg bazy Scopus, całkowita liczba cytowań 74 wg bazy Scopus, a sumaryczny Impact Factor 38,9. Ponadto doktorant uczestniczył w 3-międzynarodowych konferencjach naukowych i w 4 konferencjach w kraju, był wykonawcą w 4 projektach badawczo-rozwojowych, w tym 2 ściśle powiązanych z tematyką recenzowanej pracy doktorskiej, dotyczących np. z konstruowania urządzeń do druku 3D czy spienionych materiałów geopolimerowych stosowanych w technikach przyrostowych dla budownictwa.

W mojej ocenie dorobek i aktywność naukową mgr inż. Marcina Maroszka należy uznać za wyróżniającą się, co potwierdza Jego zaangażowanie w działalność badawczą i rozwój nauki w obszarze inżynierii materiałowej.

Ocena pracy doktorskiej

Opiniowana praca doktorska Pana mgr inż. Marcina Maroszka zatytułowana: *„Opracowanie materiału na bazie spoiw o obniżonym śladzie węglowym o odpowiednich właściwościach reologicznych umożliwiających drukowanie prefabrykowanych elementów budowlanych metodą addytywną”* składa się z dwóch części. Pierwsza licząca 83 strony obejmuje rozszerzone omówienie w języku polskim przedstawionych publikacji i zawiera przegląd literatury, cel i zakres pracy wraz z metodyką badawczą, uzasadnienie połączenia publikacji w jednotematyczny cykl, omówienie wyników badań, podsumowanie i wnioski końcowe, spis skrótów, dorobek naukowy doktoranta, a także streszczenia w języku polskim i w języku angielskim oraz bibliografię. Literatura wykorzystana w publikacjach jest aktualna w przeważającej części anglojęzyczna, z wyjątkiem dwóch pozycji publikowanych w Informatorach Stowarzyszenia Producentów Cementu (SPC). Autor w tej części przedstawia przemysł cementowy i wpływ technologii cementowych na ślad węglowy, materiały i technologie stosowane w sektorze budownictwa oraz charakterystykę technologii przyrostowych wykorzystujących beton – 3D Concrete Printing (3DCP). W drugiej części zatytułowanej *Załączniki* Autor przedstawia na 143 stronach cykl 5 artykułów naukowych wraz z oświadczeniami współautorów.

Koncepcja wytwarzania innowacyjnych materiałów inżynierskich, w tym takich jak cement, spoiwa czy beton, a także rozwiązań technologicznych charakteryzujących się zmniejszonym śladem węglowym jest niezwykle interesująca i doskonale wpisuje się w światowy trend naukowo-badawczy związany z badaniami prowadzącymi do efektywniejszych sposobów ograniczenia emisji dwutlenku węgla w budownictwie. Europejskie Stowarzyszenie Przemysłu Cementowego CEMBUREAU opracowało w 2020 roku tzw. mapę drogową na rzecz neutralności klimatycznej, określając wieloetapowe działania do 2050 roku dla tego sektora, zmierzające do osiągnięcia zerowej emisji CO₂. Strategia oparta na tzw. 5×C (ang. *Clinker, Cement, Concrete, Construction, Carbonation*) zakłada m.in. poprawę efektywności energetycznej procesu produkcji, wykorzystanie alternatywnych paliw lub biopaliw jako nośników energii np. do wypalania klinkieru, zwiększonego wykorzystania cementów o obniżonej emisyjności (np. z obniżoną zawartością klinkieru), opracowywaniu innowacyjnych cementów, wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu, wykorzystanie odnawialnej energii, projektowaniu mieszanek betonowych do konkretnych zastosowań, a także poszukiwania nowoczesnych technologii w przemyśle cementowym, np. technik przyrostowych oraz działań dotyczących wychwytywania, zagospodarowanie i magazynowania CO₂. Z kolei techniki przyrostowe, a w szczególności 3DCP, czyli trójwymiarowe drukowanie betonem, należy do szybko rozwijających się technologii w budownictwie, budzące duże zainteresowanie środowisk naukowych oraz o wysokim potencjale aplikacyjnym. Główne kierunki badań związane z 3DCP to m. in. opracowywanie nowych mieszanek i zapraw charakteryzujących się równowagą między pompowalnością, zdolnością do ekstruzji (wyciskania) oraz przyrostem wytrzymałości po nałożeniu kolejnych warstw, optymalizacją parametrów procesowych, badań własności użytkowych, czy przede wszystkim dotyczące zrównoważonego rozwoju poprzez projektowanie mieszanek z dodatkami pochodzącymi z recyklingu lub materiałami odpadowymi.

Praca doktorska Pana mgr inż. Marcina Maroszka doskonale wpisuje się w tę aktualną strategię i badania nad opracowywaniem nowych materiałów i technologii, zmierzających do znacznego obniżenia śladu węglowego. Stwierdzam, że tematyka przedstawionego do oceny jednotematycznego cyklu publikacji jest oryginalnym i wartościowym osiągnięciem Doktoranta, który dobrze rozpoznał ważne problemy naukowo-badawcze i podjął się ich rozwiązania. Praca zawiera obszerną część technologiczną oraz naukowo-badawczą i w mojej opinii jest nowatorska, atrakcyjna, o wysokim potencjale aplikacyjnym i bez wątpienia mieści się w zakresie dyscypliny naukowej Inżynieria Materiałowa.

Na podstawie przeglądu literatury oraz analizy stanu wiedzy, Autor sformułował 3 tezy:

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 opiniowanej pracy doktorskiej, podając za Autorem, jest „*opracowanie betonu drobnoziarnistego na bazie cementu portlandzkiego przeznaczonego do zastosowania w procesie druku 3D, a także modyfikacja jego składu w celu redukcji udziału cementu portlandzkiego poprzez częściowe zastąpienie go składnikami mineralnymi będącymi odpadami procesów wysokotemperaturowych: popiół lotny i żużel wielkopiecowy, oraz odpadami rozbiórkowymi (Construction Demolition Wastes, CDW), w postaci kruszonych elementów betonowych, cegły odpadowej, stłuczki szklanej i mieszanego gruzu*”. Autor sformułował również cel użytkowy w brzmieniu: „*Cel użytkowy rozprawy obejmował opracowanie oraz wdrożenie rozwiązań technologicznych umożliwiających wytwarzanie prefabrykatów z mieszanek cementowych modyfikowanych poprzez zastosowanie surowców odpadowych i materiałów wtórnych*”.

Należy zauważyć, że tak postawione tezy i cele wynikają bezpośrednio z wdrożeniowego charakteru realizowanej pracy, który wpisuje się w założenia dotyczące doktoratów wdrożeniowych, tj. stworzenia warunków do łączenia świata nauki z otoczeniem społeczno-gospodarczym, a przede wszystkim wdrażania w przemyśle wyników prowadzonej przez doktorantów działalności nauko-badawczej. Chciałbym podkreślić, że wymiernym efektem pracy jest wykorzystanie w bieżącej działalności firmy ATMAT sp. z o.o. wyników badań przedstawionych w pracy, a w szczególności do opracowywania nowych głowic o regulowanej geometrii, optymalizacji parametrów procesowych wpływających na stabilność druku, stosowanie nowych mieszanek o niższym śladzie węglowym, a ponadto mogą stanowić podstawę do dalszych prac badawczo-rozwojowych firmy.

W mojej opinii tezy i cele pracy zostały prawidłowo sformułowane, a badania zmierzające do zmniejszenia udziału cementu w wyniku częściowego jego zastąpienia materiałami pochodzącymi z odpadów czy recyklingu, pozwoliły na weryfikację głównego założenia pracy – obniżenia śladu węglowego opracowanych materiałów.

Dla osiągnięcia celów pracy i weryfikacji postawionych tez, Autor podjął się realizacji licznych zadań, zgrupowanych w trzech etapach i przedstawił chronologicznie swoje wyniki badań w logicznym ciągu pięciu publikacji, obejmujących m.in. badania: reologiczne i porównawcze np. konsystencji; rozkładu

wielkości cząstek, składu chemicznego metodą rentgenowskiej analizy fluoroscencyjnej XRF; gęstości; własności mechanicznych, np. wytrzymałości na zginanie i ściskanie; ocenę jakości połączenia międzywarstwowego na podstawie próby rozciągania i próby rozciągania przez rozłupywanie; analizy strukturalnej z wykorzystaniem mikroskopii cyfrowej; nasiąkliwości metodą grawimetryczną; transportu wilgoci z wykorzystaniem termowizji; przewodności cieplnej; obrazowanie i modelowanie 3D. Chciałbym podkreślić, że Autor wykorzystując komplementarne i prawidłowo dobrane techniki badawcze, zaplanował obszerny program eksperymentalny, w którym połączył kilka zagadnień, w tym optymalizację parametrów technologicznych procesu drukowania, prowadzącą do zaprojektowania i wykonania stanowiska drukującego wyposażonego w głowicę drukującą i ekstruder oraz stanowiska do przygotowywania mieszanek, dobór składu mieszanki cementowej z udziałem materiałów odpadowych lub pochodzących z recyklingu, modelowanie MES, a także ocenę właściwości mechanicznych oraz termoizolacyjnych opracowanych materiałów. Zaproponowany cykl publikacji jest spójny i wynika z prawidłowo zaplanowanego harmonogramu prac badawczych, co niewątpliwie świadczy o szerokiej wiedzy Doktoranta. Wszystkie prace badawcze podzielono na zadania zgrupowane w trzech etapach i opublikowano chronologicznie w artykułach naukowych, zgodnie z przyjętym planem badań. W pierwszej publikacji zatytułowanej „*Evaluation of 3D Concrete Printing Extrusion Efficiency*”, obejmującej pierwszy etap prac, Autor opracował mieszankę bazową przeznaczoną do druku 3D i wykorzystaną w kolejnych badaniach, a przede wszystkim zidentyfikował najistotniejsze parametry wytwarzania przyrostowego, do których zaliczyć można badania rozplywu i odkształcenia pod obciążeniem warstw, prędkość druku, stabilność drukowanej ścieżki, wydajność ekstruzji, prędkość obrotowa ekstrudera, a także cechy geometryczne wykorzystywanej aparatury, np. wpływ średnicy dysz na efektywność procesu. Efektem wymiernym realizacji tego etapu było zaprojektowanie i autorskie opracowanie głowicy drukującej i stanowiska badawczego do techniki wytwarzania przyrostowego betonu 3D Concrete Printing.

W kolejnych dwóch publikacjach „*Anisotropy of Mechanical Properties of 3D-Printed Materials—Influence of Application Time of Subsequent Layers*” oraz „*Influence of the In-Fill Pattern of the 3D Printed Building Wall on Its Thermal Insulation*” obejmujących drugi etap prac, Doktorant analizował m.in. parametry procesu drukowania, determinujące jakość połączeń międzywarstwowych, a tym samym wpływające na nośność elementów wytwarzanych metodą druku 3D, a także wpływ odstępów czasowych między nakładaniem kolejnych warstw na właściwości mechaniczne i anizotropię drukowanych elementów. Na podstawie otrzymanych wyników badań własności wytrzymałościowych, Autor stwierdza, że np. wydłużenie odstępu czasowego między kolejnymi nakładanymi warstwami powoduje obniżenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie w obu kierunkach – prostopadłym i równoległym do druku, spadek wytrzymałości na zginanie w kierunku prostopadłym do warstw, a wydrukowane próbki techniką 3DCP osiągnęły ok. 25-30% wytrzymałości w porównaniu do formowanych konwencjonalnie, poprzez odlewanie.

Badania obejmowały także opracowanie geometrii komponentów ściennych i ocenę ich własności termoizolacyjnych. Autor dokonał oceny poziomu izolacji termicznej komponentów, wytwarzanych za pomocą technologii addytywnej, w zależności od zastosowanej geometrii przestrzennej przegrody pionowej oraz ilości i rodzaju zastosowanych materiałów. Zaprojektował osiem oryginalnych rozwiązań wzoru wypełnienia, dla których wykonał zarówno symulacje komputerowe przewodności cieplnej metodą elementów skończonych (MES), jak i eksperymentalne badania przewodności cieplnej. Na podstawie badań stwierdzono, że jeden z proponowanych wariantów charakteryzuje się najlepszą izolacyjnością termiczną, a parametr U wyniósł $0,183 \text{ W/m}^2\text{K}$, co spełnia wymagania polskiego prawa budowlanego.

W ostatnim trzecim etapie opisanym w publikacji pt.: „Recycled Materials and Lightweight Insulating Additions to Mixtures for 3D Concrete Printing” oraz „Recycled Components in 3D Concrete Printing Mixes: A Review” zbadano możliwość zastąpienia kruszyw naturalnych materiałami pochodzącymi z recyklingu, odpadami z 3DCP, stłuczką szklaną, gruzem ceglanym, popiołem lotnym lub żużlem, a także w celu poprawy izolacyjności gotowych produktów i zmniejszenia ich gęstości, oceniono wykorzystanie lekkich wypełniaczy takich jak np. perlit spieniony, kruszywo keramzytowe (LECA) czy styropian EPS. Zbadano jednocześnie najistotniejsze własności np. rozkład wielkości cząstek, drukowalność, właściwości mechaniczne, przewodność cieplną i absorpcję wody. W ramach tego etapu Autor dokonał również oceny środowiskowej na podstawie analizy cyklu życia (LCA), zwracając szczególną uwagę na strategię redukcji śladu węglowego w wyniku zastosowania materiałów pochodzących z recyklingu i skład mieszanek o niskiej zawartości klinkieru. Uzyskane wyniki badań własnych Doktoranta dowodzą, że dodatki pochodzące materiałów odpadowych lub z recyklingu mogą obniżyć udział cementu portlandzkiego w mieszankach, w wyniku czego skutecznie zmniejszyć ich ślad węglowy. Możliwość wdrożenia do przemysłu zoptymalizowanej technologii 3DCP opartej na mieszankach o obniżonym udziale cementu z dodatkami pochodzącymi z odpadów lub recyklingu jest pożądanym kierunkiem działań opartym na zrównoważonym rozwoju i gospodarce obiegu zamkniętego, jest zgodne globalnymi strategiami neutralności klimatycznej i niskoemisyjnego budownictwa.

Uważam, że Doktorant prawidłowo zaplanował i wykorzystał odpowiednie metody badawcze, które umożliwiły Mu osiągnięcie celu pracy, a przede wszystkim zweryfikowanie postawionych tez, potwierdzając tym samym prawidłowy dobór artykułów naukowych w prezentowanym jednotematycznym cyklu publikacji, które stanowią podstawę ubiegania się o nadanie stopnia doktora nauk technicznych.

Po zapoznaniu się z opiniowaną pracą chciałbym zwrócić uwagę na kilka kwestii, wymagających komentarza:

1. Na jakiej podstawie Autor, analizując przekroje poprzeczne wydrukowanych elementów, stwierdza, że wydłużenie odstępu czasowego między warstwami powoduje wzrost liczby porów i powstawanie

nieciągłości na granicach międzywarstwowych. W jaki sposób zbadano zmiany porowatości i brak spójności między warstwami?

2. Czy podjęto próbę oceny wpływu zaproponowanych geometrii przegród na lokalizację naprężeń, a tym samym na końcowe własności wytrzymałościowe drukowanych komponentów?
3. Czy porównywano właściwości termoizolacyjne drukowanych elementów w wyniku stosowania lekkich dodatków izolacyjnych dla różnych przekrojów z wynikami symulacji MES?

Chciałbym zaznaczyć, że podane uwagi nie wpływają na ogólną wysoką ocenę opiniowanej pracy doktorskiej Pana mgra inż. Marcina Maroszka. Praca cechuje się odpowiednim poziomem merytorycznym, wymagany w tego typu pracach, a Autor wykazał się biegłością w praktycznym stosowaniu złożonej metodyki badawczej. Uzyskane wyniki badań własnych są oryginalne, wartościowe poznawczo o bardzo wysokim potencjale aplikacyjnym. W mojej opinii przedstawiona praca doktorska Pana mgra inż. Marcina Maroszka zasługuje na pozytywną ocenę merytoryczną i formalną.

Wniosek końcowy

Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że opiniowana praca doktorska Pana mgra inż. Marcina Maroszka pt. *„Opracowanie materiału na bazie spoiw o obniżonym śladzie węglowym o odpowiednich właściwościach reologicznych umożliwiającym drukowanie prefabrykowanych elementów budowlanych metodą addytywną”* spełnia wszelkie wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z zasadami przyjętymi 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.

