

Recenzja rozprawy doktorskiej 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”

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawą formalną recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej, Pana dr hab. inż. Janusza Mikuły, prof. PK, z dnia 7 listopada 2025 roku, informujące o powołaniu mnie przez Radę Naukową Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej uchwałą z dnia 22 października 2025 r. na recenzenta w postępowaniu doktorskim mgr inż. Marcina Maroszka.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pod tytułem „Opracowanie materiału na bazie spoiw o obniżonym śladzie węglowym o odpowiednich właściwościach reologicznych umożliwiających drukowanie prefabrykowanych elementów budowlanych metodą addytywną”, przygotowana w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie: inżynieria materiałowa, dyscyplina dodatkowa: Inżynieria lądowa, geodezja i transport przez Pana mgra inż. Marcina Maroszka. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Marek Hebda, prof. PK natomiast promotorem pomocniczym jest dr hab. inż. Izabela Hager, prof. PK. Opracowanie dokumentacyjne pracy doktorskiej liczy 226 stron, w tym 71 stron na których przedstawiono problem badawczy, następnie 8 stron ze 120 cytowanymi pozycjami literatury, następnie 4 strony z dorobkiem naukowym. Część zawierająca przedstawiony problem badawczy zawiera 12 rysunków i 4 tablice. Na pozostałych stronach przedstawiono cykl publikacyjny w liczbie 5 publikacji wraz z oświadczeniami wszystkich autorów o ich wkładzie merytorycznym w prezentowane artykuły.

Ocena trafności podjęcia tematu, sformułowanie celu oraz układu pracy

Problem badawczy podjęty i przedstawiony w pracy oceniam pozytywnie. Celem niniejszej pracy było opracowanie oraz ocena bazowej mieszanki betonowej przeznaczonej do technologii 3DCP (ang. 3D Concrete Printing, 3DCP), opartej na cemencie portlandzkim, a następnie weryfikacja możliwości jej modyfikacji poprzez zastosowanie surowców wtórnych, w kontekście poprawy zarówno charakterystyk środowiskowych, jak i właściwości użytkowych. Badania przeprowadzono w trzech etapach: (I) opracowanie i walidację składu bazowej mieszanki oraz charakterystyk jej stanu świeżego, dobór parametrów procesowych (wydajność ekstruzji, prędkość druku, średnica dyszy) oraz zaprojektowanie głowicy roboczej wraz ze stanowiskiem badawczym; (II) porównanie właściwości mechanicznych i fizycznych elementów wytworzonych metodą druku 3D z próbkami formowanymi konwencjonalnie, z uwzględnieniem analizy anizotropii oraz wpływu strategii druku na parametry mechaniczne uzyskanych elementów; (III) weryfikację możliwości modyfikacji składu poprzez dodatek surowców odpadowych oraz lekkich kruszyw, wraz z oceną potencjalnych korzyści środowiskowych wynikających z takich rozwiązań. Cele pracy zostały sformułowane i autor konsekwentnie je realizuje. Zadania szczegółowe również przedstawiono i zrealizowano w pracy. Tak ujęte cele pracy i podjęty w niej problem badawczy jest odpowiedni w odniesieniu do rozprawy doktorskiej. Jednocześnie potwierdzam, że Autor zadawalająco uzasadnił potrzebę prowadzenia prac badawczych w tym obszarze. Przedstawiono trzy tezy naukowe w pracy. Uważam, że Teza 3 (*Zastosowanie technologii druku 3D umożliwia wytwarzanie prefabrykatów o złożonej geometrii, pozwalającej na poprawę parametrów termoizolacyjnych przegród budowlanych*) jest nieco dyskusyjna – konieczne jest jej wyjaśnienie, do czego odniosę się w uwagach krytycznych.

Rozprawa składa się z czterech części (siedmiu rozdziałów), wg wykazu:

1. Wprowadzenie, cel i zakres pracy, metodyka badawcza (rozdziały 1- 3),
2. Uzasadnienie połączenia publikacji w cykl (rozdział 4),
3. Omówienie uzyskanych wyników badań (rozdział 5),
4. Podsumowanie, wnioski końcowe i perspektywy przyszłych badań (rozdziały 6 - 7), podzielone na jedenaście wniosków szczegółowych; będące w swojej treści streszczeniem pracy oraz próbą (pozytywną) udowodnienia że cała praca ma swoją naukowo-badawczą spójność.

Powyższy układ pracy jest poprawny i odpowiada logicznemu ciągowi działań, zmierzając do rozwiązania podjętego problemu badawczego.

3. Ogólna ocena pracy, metodyki badawczej i poprawności wnioskowania

Autor pracy dokonał przedstawienia (nie analizy) aktualnego stanu wiedzy we wprowadzeniu w zakresie: (1) przemysł cementowy w ujęciu globalnej emisji CO₂, (2) ślad węglowy w całym cyklu życia w tym wskaźnika globalnego potencjału ocieplenia GWP100 dla mieszanki betonowej, (3) rozwój technologii cementów niskoemisyjnych oraz wzrost wykorzystania surowców alternatywnych, oraz (4) rozwój technologii wytwarzania przyrostowego z zastosowaniem betonu (ang. 3D Concrete Printing, 3DCP).

Pozwoliło to na sformułowanie zagadnienia badawczego o poznawczych walorach naukowych i inżynierskich. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz oceny aktualnego stanu wiedzy sformułowano trzy tezy naukowe rozprawy. Następnie Autor przeprowadził bardzo obszerny program badawczy, etapowo i logicznie rozwiązując postawiony problem badawczy. Zastosowana metodyka badań pozwoliła na uzyskanie satysfakcjonujących i aplikacyjnych rezultatów.

Wg Autora celem pracy było 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. Przyjęte podejście pozwala na obniżenie śladu węglowego materiału poprzez zmniejszenie udziału najbardziej energochłonnego składnika betonu, jakim jest cement, oraz jego częściowe zastąpienie surowcami pochodzenia odpadowego.

Na podkreślenie zasługuje kilka elementów. Za cenne uważam: (1) przedstawienie schematu przebiegu prac badawczych w zakresie opracowania materiału do druku 3DCP (rysunek 3, str. 30), (2) dość bogaty dorobek publikacyjny doktoranta z innymi autorami (14 publikacji) jednakże ograniczony do publikacji w MDPI (ang. Multidisciplinary Digital Publishing Institute – Multidyscyplinarny Instytut Wydawnictw Cyfrowych); natomiast w 4

publikacjach doktorant jest pierwszym autorem i tylko w jednej publikacji autorem korespondencyjnym. Jednakże zwraca uwagę słabe przedstawienie wykorzystanych w pracy metod statystycznych przy bardzo dużym zakresie przeprowadzonych badań laboratoryjnych. Brakuje odrębnego rozdziału prezentującego aktualny stan wiedzy w przedmiotowej tematyce pracy. Podkreślam, że moim zdaniem informacje prezentowane we wprowadzeniu nie wyczerpują problematyki analizy stanu wiedzy.

Przedstawione w rozprawie wnioskowanie uważam za poprawne i logiczne. Wnioski zawarte w końcowym rozdziale rozprawy zostały wyrażone w sposób przekonujący, dobrze porządkując zbiór wyników. Z wiadomych powodów wnioski te są istotne nie tylko z poznawczego, ale także praktycznego - inżynierskiego punktu widzenia. W podsumowaniu tej części recenzji, stwierdzam że Autor wykazał się, wymaganą od kandydata do stopnia doktora nauk technicznych, umiejętnością formułowania problemu naukowego, samodzielnego planowania i prowadzenia prac badawczych, analizy wyników prowadzącej do sformułowania logicznych wniosków, oraz właściwej prezentacji zarówno rezultatów jak i prowadzącej do ich uzyskania drogi.

Ogólnie rozprawę doktorską Pana mgr inż. Marcina Maroszka oceniam pozytywnie. Uwagi krytyczne, które nasunęły się podczas lektury pracy, przedstawiam w następnym punkcie opinii.

4. Uwagi krytyczne

Recenzowana praca zawiera również pewne niedoskonałości lub w treści zabrakło szerszego odniesienia do niektórych zagadnień.

1. Na stronie 19 doktorant wprowadza pojęcie „smarowność” mieszanki. Proszę podać opis technologiczny lub definicję tego pojęcia. Czy to pojęcie ma jakiś związek z właściwościami reologicznymi mieszanek na spoiwach cementowych?
2. Na stronie 26 w Tezie 3 pracy czytamy: *Zastosowanie technologii druku 3D umożliwia wytwarzanie prefabrykatów o złożonej geometrii, pozwalającej na poprawę parametrów termoizolacyjnych przegród budowlanych*. Na czym polega poprawa parametrów termoizolacyjnych przegród budowlanych – na złożonej geometrii prefabrykatów czy też zastosowaniu materiału izolacyjnego? Dlaczego prefabrykat o złożonej geometrii pozwala na poprawę parametrów termoizolacyjnych przegród budowlanych? Czy to nie

wypełnienie prefabrykatu materiałem izolacyjnym poprawia parametry termoizolacyjne?
Im bardziej złożona geometria prefabrykatu tym lepsze jego parametry izolacyjne?

3. Na stronie 30 w schemacie przebiegu prac badawczych w zakresie opracowania materiału do druku 3DCP w etapie I podano m.in. Określenie parametrów reologicznych. W technologii mieszanek na spoiwach cementowych jest przyjęte określenie parametrów reologicznych poprzez wyznaczenie granicy płynięcia i lepkości plastycznej modelem Bingham'a lub Herschela- Bulkley'a. Jak się mają wyznaczane w pracy „Rozpływ mieszanki” oraz „Zdolność przenoszenia obciążeń” do wyznaczanych innymi metodami parametrów reologicznych?
4. Na stronie 31, podano skład do przygotowania mieszanki bazowej, w tym zastosowane cementy. Dlaczego w badaniach zastosowano cement CEM I 52,5R (łącznie w pracy jest cytowany 8 razy), jeżeli ślad węglowy cementu CEM I wynosi ok. 700 ($\text{kgCO}_{2e}/\text{Mg}_{\text{cementu}}$), czyli najwięcej spośród dostępnych cementów w ofercie handlowej. Wszystkie inne cementy w ofercie handlowej cementowni charakteryzują się niższym śladem węglowym a dla porównania ślad węglowy cementów CEM III wynosi od 122 (CEM III/C) do 335 ($\text{kgCO}_{2e}/\text{Mg}_{\text{cementu}}$).
5. Kolejny zastosowany cement (CEM II/A-LL 42,5R-NA), podany na stronie 31 nie jest cytowany w dalszej części pracy. Kolejny zastosowany cement CEM I 42,5R również nie jest w pracy więcej cytowany. Dlaczego? Brak informacji na temat badań z ich wykorzystaniem.
6. Na stronie 31 podano jako surowiec odpadowy m.in. popiół lotny z elektrociepłowni w Wietnamie. Dlaczego nie zastosowano popiołów lotnych z polskich elektrociepłowni?
7. Na stronie 42 przedstawiono charakterystykę materiału bazowego. Zakres udziału poszczególnych składników np. cementu CEM I 52,5 R podano 20-40%. Co to oznacza technologicznie? Przedział udziału cementu np. 20-25-30-35-40% ? Podobne pytania zasuwać się przy kolejnych składnikach: piasek kwarcowy (60-75%), mączka wapienna (0-5%), itd.
8. Ile przeprowadzono testów pilotażowych, podanych na stronie 42, o jakiej zmienności dozowanych składników, aby uzyskać skład mieszanki bazowej podany na stronie 43?
9. W jaki sposób dla składu mieszanki betonowej w tabeli 1 na stronie 43 uzyskano rozpływy w przedziale 130 – 190 mm na rysunku 8 na stronie 47 ?

10. Na stronie 45 brak danych bazowych do macierzy korelacji parametrów na rysunku 6b. Proszę o przedstawienie danych podstawowych na bazie których obliczono macierz korelacji parametrów. W macierzy korelacji parametrów wystarczy podawać 3 liczby po przecinku.
11. Na stronie 48 podano informacje o dozowaniu włókien PP o długościach 6 mm i 12 mm a na stronie 11 publikacji P1 jest informacja o dozowaniu tych włókien w ilości 0.04% wagowo. Skąd taki stopień dozowania i czy dla obu długości włókien stopień dozowania jest identyczny?
12. Na stronie 49 podano informację że przy zastosowaniu włókien długości 12 mm występowały problemy technologiczne (ograniczenie wydajności druku, potencjalne ryzyko zapychania układu przy tej konfiguracji, zjawisko akumulacji włókien w obrębie ekstrudera). Czy jest sens stosowania włókien PP o długości 12 mm i czy ewentualnie optymalizowano dozowanie wagowe tych włókien w mieszance.
13. Na stronie 60 podano że *w praktyce najsilniejszym narzędziem ograniczania śladu węglowego jest redukcja zawartości klinkieru poprzez zastosowanie dodatków mineralnych (SCM: FA, GGBFS, RCP) oraz skrócenie dystansu transportu cementu*. Ponawiam pytanie, dlaczego nie zastosowano w badaniach cementów o mniejszym śladzie węglowym?
14. W podsumowaniu i wnioskach na stronie 67 podano informację iż *„zdefiniowano krytyczne parametry procesu, takie jak stabilność ścieżki, wydajność ekstruzji, prędkość druku, wysokość warstwy oraz średnica dyszy”*. Proszę podać wartości dla badanych i krytycznych parametrów procesu.
15. Na stronie 68 podano jeden z wniosków: *Druk 3DCP prowadzi do obniżenia parametrów mechanicznych próbek o 70-75% w porównaniu z próbkami formowanymi konwencjonalnie, (...). Zjawisko to należy uwzględniać przy projektowaniu elementów konstrukcyjnych wykonywanych tą technologią*. Czy obniżenie parametrów mechanicznych próbek o 70-75% nie eliminuje ich z użytkowania? Proszę podać parametry wytrzymałościowe prefabrykatów ściennych typu A i B przedstawionych na rysunku 11 i porównać z parametrami wytrzymałościowymi innych analogicznych lub podobnych prefabrykatów (materiałów) ściennych.

16. Brak informacji w pracy (analizy literaturowej) na temat norm (wytycznych) dotyczących technologii druku 3D. Czy doktorant analizował takie wytyczne z uwzględnieniem rynku chińskiego?
17. Brakuje informacji na temat liczby wykonanych próbek (badań) w poszczególnych etapach pracy.

Przedstawione powyżej uwagi nie zmieniają mojej pozytywnej opinii o rozprawie doktorskiej P. mgra inż. Marcina Maroszka. Jestem świadomy, że część wytkniętych niedoskonałości, zwłaszcza tych polegających na braku lub zbyt ograniczonej zawartości komentarzy i wyjaśnień, wynika w decydującej mierze z konieczności zachowania rozsądnej objętości pracy. Lecz w pracy doktorskiej bazującej na publikacjach wymaga to szczególnego wyważenia proporcji i sposobu prezentowania wyników badań.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska P. mgra inż. Marcina Maroszka pt „Opracowanie materiału na bazie spoiw o obniżonym śladzie węglowym o odpowiednich właściwościach reologicznych umożliwiających drukowanie prefabrykowanych elementów budowlanych metodą addytywną” stanowi, moim zdaniem, wartościowe osiągnięcie naukowo-badawcze w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie: Inżynieria materiałowa oraz dyscyplinie dodatkowej: Inżynieria lądowa, geodezja i transport, o istotnym znaczeniu aplikacyjnym.

Autor sformułował oryginalny problem naukowy i przedstawił jego rozwiązanie. Postawione cele w pracy zostały zrealizowane. Autor wykazał się odpowiednią wiedzą teoretyczną z zakresu technologii modyfikowanych mieszanek na spoiwach cementowych a także umiejętnością samodzielnego planowania i prowadzenia badań naukowych. Przeprowadzona przez Autora analiza wyników badań jest generalnie prawidłowa i przekonująca a wyciągnięte na jej podstawie wnioski zostały sformułowane poprawnie i potwierdzają osiągnięcie sformułowanych na wstępie pracy celów.

Zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2018 r. poz. 1668, z późn. zmianami) recenzowana rozprawa doktorska **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, oraz **wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną** kandydata w danej dyscyplinie naukowej, a także **umiejętność samodzielnego prowadzenia**

pracy naukowej. Stwierdzam, że w rozpatrywanym przypadku wymagania Ustawy zostały spełnione i wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Marcina Maroszka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Tomasz Ponikiewski