

Prof. dr hab. inż. Jerzy Hoła
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
e-mail: jerzy.hola@pwr.edu.pl

Wrocław, 26 października 2023 r.



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana mgra inż. Mateusza Techmana

**pt.: „Wpływ zbrojenia rozproszonego na właściwości kompozytów
cementowych do druku 3D”**

1. PODSTAWY OPRACOWANIA RECENZJI

Formalną podstawę opracowania recenzji stanowi pismo z dnia 25 września 2023 roku o znaku WBiIŚ-PRD/A/1/2023 Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, w którym Przewodnicząca Rady Dyscypliny Pani dr hab. inż. Teresa Rucińska, prof. ZUT prosi o opracowanie recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Mateusza Techmana w związku z podjętą przez Radę Dyscypliny w dniu 6 września 2023 roku uchwałą nr 4 o powołaniu mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim Pana mgra inż. Mateusza Techmana.

Merytoryczną podstawę opracowania recenzji stanowi załączona do ww. pisma rozprawa doktorska Pana mgra inż. Mateusza Techmana.

Recenzję opracowałem zgodnie z Ustawą z dnia 3 lipca 2018 r. *Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. poz. 1669), art. 14 ust. 1 pkt 1, ust. 2 pkt 2 ustawy z dnia 14.03.2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) oraz Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. *w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora* (Dz. U. poz. 261).

17 HŁ.

2. PRZEDMIOT I ZAWARTOŚĆ ROZPRAWY

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgra inż. Mateusza Techmana pt.: „Wpływ zbrojenia rozproszonego na właściwości kompozytów cementowych do druku 3D”. Promotorem rozprawy jest Pani prof. dr hab. inż. Maria Kaszyńska. Recenzowana rozprawa ma charakter badawczy i ujęta została w 14 rozdziałach, liczy 191 stron wydruku komputerowego zilustrowanych 150 rysunkami i 30 tabelami. W rozprawie przywołana została obszerna bibliografia licząca 196 pozycji (4 pozycje norm), w tym 4 pozycje których Autor rozprawy jest współautorem.

Rozprawę rozpoczyna spis treści, po którym umieszczono streszczenie w językach polskim i angielskim

Rozdziałem 1 jest dwustronicowe wprowadzenie.

W rozdziale 2 sformułowano cel i tezę rozprawy.

Rozdziały od 3 do 6 włącznie stanowią studium literatury.

I tak, rozdział 3 (6 stron) nazwany technologia druku 3D materiałami cementowymi wprowadza do tej technologii i podaje jej podstawowe zalety i wady.

W rozdziale 4 (9 stron) scharakteryzowane zostały właściwości kompozytów do druku 3D. Rozdział podzielono na 7 podrozdziałów, nazwanych w kolejności: wprowadzenie (4.1), buildability (4.2), pumpability(4.3), extrudability (4.4), open time (4.5), anizotropia wytrzymałości (4.6), mikrostruktura (4.7). W podrozdziale pierwszym, ze względu na brak odpowiedniego nazewnictwa w języku polskim, Autor rozprawy zaproponował zamienniki zwrotów angielskich użytych m. in. w nazwach podrozdziałów 4.2 - 4.5.

Rozdział 5 (12 stron) poświęcono zbrojeniu rozproszonemu w technologii betonu i wyróżniono w nim 4 podrozdziały, nazwane w kolejności: idea mikrozbrojenia, mechanizm działania włókien, badania fibrobetonów, rodzaje włókien i ich właściwości. W ostatnim podrozdziale omówione zostały włókna: stalowe, bazaltowe, szklane, węglowe i polimerowe.

W rozdziale 6 (10 stron) dokonano syntetycznego przeglądu literatury odnośnie do zbrojenia betonu w technologii druku 3D włóknami stalowymi, PVA,

polimerowymi, polietylenowymi, szklanymi, bazaltowymi i węglowymi. Rozdział ten zakończono krótkim podsumowaniem.

Natomiast rozdziały od 7 do 13 włącznie dotyczą badań własnych.

I tak w rozdziale 7 (3 strony) omówiony został zakres badań, który zilustrowano schematem blokowym.

W rozdziale 8 (7 stron) scharakteryzowano materiały użyte do badań, mianowicie: cement, dodatki mineralne, piasek, superplastyfikator, włókna bazaltowe i szklane oraz węglowe i polimerowe.

Rozdział 9 (10 stron) poświęcono metodyce badań i w 5 jego podrozdziałach podane zostały w kolejności informacje odnośnie do sposobu przygotowania mieszanek cementowych i badania ich właściwości reologicznych, opisane i zaprezentowane zostało stanowisko do druku 3D, opisano metodykę badań wytrzymałościowych oraz metodykę badań struktury próbek.

Rozdział 10 (32 strony) dotyczy badań wstępnych i ujęty został w 5 podrozdziałach. W podrozdziale pierwszym sprecyzowano zakres badań, a w drugim scharakteryzowano przyjętą do badań mieszankę cementową bazową do druku 3D, oznaczoną jako M1. W trzecim podrozdziale zaprezentowano wyniki badań właściwości reologicznych mieszanki bazowej zbrojonej czterema rodzajami włókien, bazaltowymi, szklanymi, węglowymi, polimerowymi oraz wyniki badań wytrzymałościowych kompozytów uzyskanych z zbrojonej ww. rodzajami włókien mieszanki po 1, 3 i 7 dniach ich twardnienia. W przypadku każdego rodzaju włókien różnicowano długość i % zawartość w mieszance, co dało w sumie 50 różnych modyfikacji zbrojenia rozproszonego. W podrozdziale czwartym dokonano analizy wyników badań wstępnych, a w podrozdziale piątym sformułowano wnioski wynikające z przeprowadzonych badań.

Z kolei rozdział 11 (38 stron) dotyczy badań zasadniczych. Został on ujęty w trzech podrozdziałach. W pierwszym sprecyzowano zakres badań. W drugim scharakteryzowano nową mieszankę cementową bazową do druku 3D, oznaczoną jako M2, zaprojektowaną przez Autora rozprawy. Mieszanka M2 zawiera w swoim składzie o 300 kg/m^3 mniej spoiwa (cementu) w stosunku do mieszanki M1 i wprowadzoną w to miejsce mączkę wapienną stanowiącą wypełniacz mineralny.

Natomiast w trzecim podrozdziale zaprezentowano wyniki badań porównawczych metod przygotowania próbek do badań, wyniki badań reologicznych mieszanki bazowej M2 zbrojonej analogicznie jak mieszanka bazowa M1 czterema rodzajami włókien o identycznych długościach i % zawartości (w sumie też 50 modyfikacji zbrojenia rozproszonego), wyniki badań wytrzymałościowych. W końcowej części tego podrozdziału podano kryteria wyboru, które posłużyły do wyboru trzech z pięćdziesięciu mieszanek zbrojonych włóknami i które dalej użyto do druku 3D określając dla nich właściwości reologiczne oraz parametry wytrzymałościowe uzyskanych z nich kompozytów po 1,3, 7 i 28 dniach twardnienia.

W rozdziale 12 (26 stron) w trzech podrozdziałach dokonana została analiza wyników badań. W podrozdziale pierwszym przeanalizowano wpływ włókien na właściwości reologiczne mieszanek cementowych do druku 3D, w drugim wpływ włókien na wytrzymałość stwardniałych kompozytów cementowych, a w trzecim wpływ druku 3D na mikrostrukturę stwardniałych kompozytów.

Rozdział 13 (3 strony) stanowią podsumowanie i wnioski, po których umieszczono program dalszych badań (rozdział 14).

Rozprawę kończą spisy rysunków i tabel, po których umieszczono bibliografię wykorzystaną do napisania rozprawy.

Po zapoznaniu się z recenzowaną rozprawą stwierdzam, że jej treść jest w zgodzie z tytułem, a przyjęty układ jest prawidłowy i typowy dla rozpraw o charakterze badawczym. Rozprawę napisano poprawną polszczyzną, zilustrowano w bardzo dobrym stopniu czytelnymi rysunkami i tablicami. Dobór pozycji bibliograficznych jest trafny, około 94% stanowią pozycje obcojęzyczne głównie anglojęzyczne, w około 12% pozycji autorami są polscy badacze, około 75% pozycji opublikowanych zostało w ostatnich 10 latach.

3. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

3.1 Ocena doboru tematu i postawionego celu

Przystępując do oceny doboru tematu rozprawy należy zwrócić uwagę na końcowe lat 90 ubiegłego wieku, w których zapoczątkowana została technologia druku 3D w budownictwie. Od tamtego czasu ta innowacyjna technologia poczyniła

znaczący postęp i nadal się szybko rozwija, dzięki wzbudzeniu zainteresowania u wielu badaczy i dostrzeżeniu możliwości aplikacyjnych i korzyści jakie może przynieść dla przemysłu budowlanego i dla środowiska naturalnego. W kilku ośrodkach naukowych na świecie powstały interdyscyplinarne zespoły badawcze które wykorzystując m.in. postęp dokonujący się w technologii betonu, w chemii budowlanej, w mechanizacji, w automatyzacji i robotyce procesów budowlanych, znacząco udoskonaliły i pracują nadal nad dalszym udoskonalaniem technologii betonu drukowanego 3D. Zespół taki powstał również na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska ZUT w Szczecinie z inicjatywy Pani prof. dr hab. inż. Marii Kaszyńskiej, promotorki recenzowanej rozprawy, do którego zalicza się również Autor rozprawy. W ramach prac tego zespołu opracowana została m.in. receptura mieszanki cementowej do druku 3D, powstała pierwsza w Polsce drukarka do betonu, wydrukowane zostały prototypowe elementy, sformułowane zostały tematy kilku rozpraw doktorskich i zrealizowanych zostało wiele badań których wyniki prezentowano i na konferencjach i na łamach czasopism o zasięgu światowym.

Jest w tej sytuacji oczywiste, że w technologii betonu drukowanego 3D wiele zagadnień i problemów już zostało rozwiązanych na drodze badawczej, ale też wiele nadal pozostaje do rozwiązania. Jednym z nie rozwiązanych jest problem zbrojenia elementów wykonywanych z mieszanek cementowych do druku 3D, w sytuacji bardzo mocno ograniczonych możliwości użycia w tej innowacyjnej technologii betonowania tradycyjnych prętów zbrojeniowych stalowych lub kompozytowych. Podjęte przez różnych badaczy udane próby wykorzystania do tego celu zbrojenia rozproszonego nie doprowadziły do pełnego rozwiązania tego problemu, co wykazał Autor recenzowanej rozprawy na podstawie analizy dostępnych publikacji. W literaturze brak jest m.in. pełnej zgodności co do tego jaki jest najkorzystniejszy rodzaj oraz ilość i długość włókien do tego typu zbrojenia, brak jest badań przeprowadzonych z użyciem włókien dłuższych niż 12 mm i zbyt mała jest wiedza w kwestii składu mieszanek cementowych które po dodaniu tak długich włókien będą przydatne do druku 3D, brak jest szerszych badań porównawczych wpływu różnego rodzaju oraz ilości i długości włókien zbrojenia rozproszonego zarówno na parametry reologiczne tej samej mieszanki przy zachowaniu tego samego sposobu dozowania do niej włókien jak i na parametry wytrzymałościowe stwardniałych kompozytów cementowych. Brakuje również w literaturze badań porównawczych celem określenia

wpływu sposobu przygotowania próbek badawczych i ich rozmiarów na właściwości mechaniczne stwardniałych kompozytów, co utrudnia bezpośrednio porównywanie wyników badań uzyskanych przez różnych badaczy. Dlatego za jak najbardziej zasadne uznaję postawienie sobie przez Autora rozprawy ambitnego zadania ograniczenia tych licznych luk badawczych na drodze eksperymentalnej.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że temat recenzowanej rozprawy idealnie wpisuje się w zasygnalizowaną wyżej tematykę i zasługuje na pozytywną ocenę bo jest bardzo na czasie, jest interesujący i ma duże znaczenie i poznawcze i aplikacyjne.

3.2. Tytuł rozprawy

Nie wnoszę uwag do zaproponowanego przez Autora tytułu rozprawy, który moim zdaniem bardzo dobrze odzwierciedla jej zawartość.

3.3 Cel rozprawy

Cel rozprawy sformułowany w rozdziale 2 na stronie 9 zasługuje na pozytywną ocenę bo jest zasadny, oryginalny, ambitny. Od strony merytorycznej został sformułowany poprawnie. W ramach dyskusji zgłaszam Autorowi nieco zgrabniejszy moim zdaniem jego zapis, mianowicie: „Celem rozprawy doktorskiej jest opracowanie receptury mieszanek cementowych z dodatkiem zbrojenia rozproszonego, spełniających kryteria przydatności w technologii druku 3D, w tym określenie wpływu zarówno rodzaju, długości jak i ilości włókien tego zbrojenia na właściwości reologiczne i wytrzymałościowe mieszanek cementowych oraz na właściwości wytrzymałościowe stwardniałych kompozytów uzyskanych z tych mieszanek. Celem jest ponadto określenie ułożenia włókien oraz wpływu sposobu przygotowania próbek na wyniki badań wytrzymałościowych”.

3.4 Teza rozprawy

Teza rozprawy, tak jak i cel sformułowana została w rozdziale 2 na stronie 9. Ma ona następujące brzmienie, cyt.: „Rodzaj zastosowanego zbrojenia rozproszonego oraz sposób jego ułożenia wpływa na właściwości reologiczne i mechaniczne mieszanek cementowych w technologii druku 3D. Właściwy dobór zbrojenia rozproszonego pozwala na otrzymanie mieszanek cementowych o parametrach zalecanych w druku 3D”, koniec cyt. W mojej opinii teza jest oryginalna,

a jej prawdziwość wykazana została na podstawie przeprowadzonych w rozprawie badań eksperymentalnych i analiz. Odpowiedzią na tezę są wnioski sformułowane w rozdziale 13, na stronach 167 - 169. Z recenzenckiego obowiązku zgłaszam Autorowi drobną uwagę do sformułowania tezy. Ponieważ w rozprawie przeprowadzono także badania właściwości mechanicznych (na zginanie i na ściskanie) kompozytów cementowych po 1, 3, 7 i 28 dniach twardnienia, w pełni uzasadnione jest moim zdaniem poszerzenia pierwszego zdania tezy o słowa: ...oraz na właściwości mechaniczne stwardniałych kompozytów uzyskanych z tych mieszanek.

3.5. Ocena wartości naukowej rozprawy

Ocenę wartości naukowej rozprawy rozpoczynam od stwierdzenia, że zrealizowane przez Autora obszerne własne badania doświadczalne zostały właściwie zaplanowane i wykonane z punktu sformułowanego celu i postawionej tezy. Metodyka badań i uzyskane rezultaty nie budzą zastrzeżeń. Na wysoką ocenę zasługuje bardzo dobre udokumentowanie uzyskanych wyników badań. W mojej opinii przeprowadzona została właściwa interpretacja i krytyczna analiza uzyskanych rezultatów i na tej podstawie sformułowanie zostały trafne i podsumowanie i wnioski.

Po analizie rozprawy uważam, że do osiągnięć naukowych jej Autora można zaliczyć między innymi:

- a) Opracowanie oryginalnego obszernego programu badań doświadczalnych i jego konsekwentne zrealizowanie.
- b) Wykazanie na podstawie badań, że dodanie zbrojenia rozproszonego do wykorzystanej w badaniach mieszanki cementowej przydatnej do druku 3D ale zawierającej dużą ilość spoiwa (830 kg/m^3) nie jest celowe. Powoduje bowiem, bez względu na użyty w badaniach rodzaj włókien (bazaltowe, węglowe, szklane, polimerowe) oraz ich ilość i długość, pogorszenie właściwości reologicznych mieszanki i ponadto jest bez wpływu bądź w niewielkim stopniu wpływa na poprawę właściwości wytrzymałościowych stwardniałego kompozytu co stanowi ważną wskazówkę dla innych badaczy.
- c) Zaprojektowanie nowej mieszanki cementowej przydatnej do druku 3D o zdecydowanie mniejszej ilości spoiwa (530 kg/m^3) i zawierającej w składzie mączkę wapienną oraz wykazanie na drodze badawczej jej przydatności do druku 3D zarówno bez jak i z dodatkiem zbrojenia rozproszonego.

- d) Wykazanie na drodze badawczej, że zbrojenie nowo zaprojektowanej mieszanki cementowej do druku 3D długimi włóknami bazaltowymi 50 mm nie tylko że jest możliwe, ale trzykrotnie poprawia zdolność do przenoszenia przez wydrukowaną warstwę obciążenia od kolejnych warstw (parametr buildability), w stosunku do mieszanki nie zawierającej tych włókien.
- e) Stwierdzenie na podstawie uzyskanych rezultatów, że nie można jednoznacznie wykazać spośród użytych w badaniach rodzajów włókien zbrojenia rozproszonego tego który równocześnie znacząco poprawia i właściwości reologiczne mieszanki cementowej do druku 3D i właściwości mechaniczne stwardniałego kompozytu. Dlatego wybór rodzaju włókien zbrojenia rozproszonego oraz jego ilości i długości powinien być selektywny i wynikający z potrzeby uzyskania przez pożądanym w danej sytuacji parametr o wysokiej wartości albo dla mieszanki do druku 3D albo dla stwardniałego kompozytu, czemu pomocna może być swoista baza danych złożona z wyników badań uzyskanych w rozprawie.

4. UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE

Podczas czytania rozprawy nasunęły mi się w kolejności następujące nieliczne uwagi krytyczne i dyskusyjne oraz pytania do Autora.

- a) W rozdziale 8 scharakteryzowano materiały użyte do badań, cement, dodatki mineralne, piasek, superplastyfikator, włókna, zapominając o wodzie. Stąd pytanie, jaką wodę użyto do wykonania mieszanek cementowych przydatnych do druku 3D.
- b) W rozdziale 11 (badania zasadnicze) warto było wyodrębnić podrozdział z porównawczymi wynikami badań dotyczącymi metod badania próbek (jako 11.3), w kolejnym podrozdziale (11.4) przedstawić wyniki badań mieszanki cementowej do druku 3D zamieszczone na stronach 110 – 133, a następnie wyodrębnić podrozdział 11.5 poświęcony wyborowi mieszanek zbrojonych włóknami do dalszych badań charakteryzujących się najwyższymi wartościami parametru wybory K_i . Podrozdział 11.5 mógłby mieć na przykład nazwę „Wybór mieszanek zbrojonych włóknami do druku 3D”, z nienumerowanymi

ale pogrubionymi podtytułami: Kryteria wyboru; Wyniki wyboru. Moim zdaniem takie uporządkowanie rozdziału poprawiłoby jego „czytelność”.

- c) Proszę wyjaśnić stałe 0,2, 0,4, 0,5 i 0,6 występujące w zależności (4) na stronie 134, nie jest jasne na jakim podstawie je przyjęto, czy są to wagi?
- d) W nawiązaniu do akapitu pierwszego na stronie 157 w którym napisano m.in. cyt.: „wstępne przygotowanie włókien poprzez ręczne roztarcie pozwoliło na otrzymanie dobrego rozproszenia dodanych do mieszanek włókien”, koniec cyt., oraz w nawiązaniu do programu dalszych badań (rozdział 14) mam następujące pytanie. Jak wg Pana można by dokonać takiego wstępnego przygotowania włókien w sytuacji wykonywania (drukowania) elementów o rzeczywistej wielkości.
- e) Do wniosków sformułowanych w rozdziale 13 wnoszę uwagę dyskusyjną dotyczącą przede wszystkim ich kolejności. Warto było moim zdaniem pogrupować wnioski, najpierw te odnoszące się do rezultatów badań właściwości mieszanek do druku 3D ze zbrojeniem rozproszonym, a następnie te dotyczące rezultatów badań właściwości stwardniałych kompozytów. Ponadto niektóre wnioski można było ze sobą połączyć, na przykład wniosek 3 z wnioskiem 15.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mateusza Techmana pt.: „Wpływ rodzaju zbrojenia rozproszonego na właściwości kompozytów cementowych do druku 3D” rozwiązuje postawiony oryginalny problem naukowy mieszczący się w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.

Temat recenzowanej rozprawy jest aktualny i ma znaczenie naukowe i aplikacyjne. Cel rozprawy i teza są zasadne i oryginalne, cel został osiągnięty, teza została udowodniona.

Zakres rozprawy został zrealizowany, otrzymane oryginalne i wartościowe rezultaty zostały przeanalizowane i krytycznie ocenione, poprawnie sformułowane zostało podsumowanie i trafne wnioski końcowe, które wzbogacono o wskazanie kierunków dalszych prac naukowych.

Rozprawa dowodzi, że Autor posiada wystarczającą wiedzę w uprawianej przez siebie dyscyplinie, potrafi samodzielnie postawić oryginalny problem naukowy i przeprowadzić niezbędne badania i analizy potrzebne do jego rozwiązania.

Nieliczne uwagi krytyczne zawarte w punkcie 4 recenzji nie obniżają wartości merytorycznej i ogólnej bardzo pozytywnej oceny rozprawy. Mają one charakter dyskusyjny i porządkowy i powinny być pomocne Autorowi podczas przygotowywania artykułów do czasopism naukowych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mateusza Techmana spełnia wymogi ustawowe stawiane pracom doktorskim określone w aktach prawnych wymienionych w punkcie 1 niniejszej recenzji i w związku z tym wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

