



Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Szczecin, dnia 31 sierpnia 2023 r.

D Z I E K A N
WYDZIAŁU BUDOWNICTWA I INŻYNIERII ŚRODOWISKA
ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIWERSYTETU TECHNOLOGICZNEGO
W SZCZECINIE

Zaprasza na

PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. KAROLA KRZYSZTOFA FEDEROWICZA

która odbędzie się w dniu **15 września 2023 r. (piątek) o godz. 10:00**
w sali 302 gmachu Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska
przy al. Piastów 50 a w Szczecinie

Tytuł rozprawy doktorskiej:

**„Wpływ pielęgnacji na odkształcenia skurczowe kompozytów cementowych
wykorzystywanych w technologii druku 3D”**

Promotor: **prof. dr hab. inż. Maria Kaszyńska**

*Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie*

Promotor
pomocniczy: **dr inż. Adam Zieliński**

*Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie*

Recenzenci: **prof. dr hab. inż. Piotr Woyciechowski**
dr hab. inż. Tomasz Tracz, prof. PK

*Politechnika Warszawska
Politechnika Krakowska*

Z rozprawą doktorską i opiniami recenzentów można zapoznać się w Bibliotece Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, mieszczącej się w Budynku Wydziału przy al. Piastów 50a.

Streszczenie rozprawy doktorskiej w języku polskim i w języku angielskim oraz recenzje dostępne są na stronie: <https://bip.zut.edu.pl/organizacja-uczelni/wydzialy-zut/wydzial-budownictwa-i-inzynierii-srodowiska/awanse-naukowe-wydzial-budownictwa-i-inzynierii-srodowiska/inzynieria-ladowa-geodezja-i-transport.html>



D Z I E K A N
Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Anna Głowacka
dr hab. inż. Anna Głowacka, prof. ZUT

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
al. Piastów 50a, 70-311 Szczecin, tel.: 91 434 42 21
e-mail: wbiis@zut.edu.pl

WPLYW PIELĘGNACJI NA ODKSZTAŁCENIA SKURCZOWE KOMPOZYTÓW CEMENTOWYCH WYKORZYSTYWANYCH W TECHNOLOGII DRUKU 3D - STRESZCZENIE

Druk 3D z wykorzystaniem kompozytów cementowych to jedna z aktualnie najszybciej rozwijających się gałęzi przemysłu budowlanego na świecie. Jej głównymi zaletami jest możliwość skrócenia czasu wznoszenia budowli, ograniczenie zużycia materiału oraz wykorzystania zasobów ludzkich. Idea druku 3D, nazywanego technologią przyrostową, polega na układaniu na sobie kolejnych warstw materiału z wykorzystaniem robotów sterowanych komputerowo. Dzięki temu możliwe jest wytwarzanie skomplikowanych struktur przestrzennych. Zastosowanie mieszanek cementowych jako materiału wykorzystywanego do druku stwarza możliwości wykorzystania tej technologii również w sektorze budowlanym. W ciągu ostatnich 10 lat liczba zespołów badawczych oraz komercyjnych firm zainteresowanych drukiem 3D z wykorzystaniem mieszanek cementowych zaczęła wzrastać w tempie wykładniczymi. Wzrost zainteresowania stanowił katalizator do intensyfikacji prac naukowych, które skupiły się na aspektach trwałościowych elementów wykonanych w sposób przyrostowy.

Jednym z wciąż nierozwiązanych problemów jest kwestia odpowiedniej pielęgnacji elementów drukowanych z materiałów cementowych. Większość dostępnej literatury porusza ten problem w sposób bardzo ogólnikowy lub jedynie zaleca dalsze badania w tym zakresie. Kwestia pielęgnacji jest kluczowa ze względu na brak tradycyjnego szalunku wykorzystywanego w tradycyjnych konstrukcjach betonowych, który zabezpiecza świeży materiał przed gwałtowną utratą wilgoci. Brak tej bariery prowadzić może do zarysowania i obniżenia wytrzymałości wykonywanych elementów, co przełoży się może na niższą trwałość i konieczność wykonywania kosztownych napraw.

W niniejszej dysertacji podjęto próbę krytycznej oceny metod pielęgnacji zewnętrznej i wewnętrznej możliwych do zastosowania w kontekście technologii druku 3D. Część studialną rozprawy można podzielić na 3 główne działy. W pierwszej części (rozdział 3 i 4) omówione zostały kluczowe aspekty technologii druku 3D z wykorzystaniem mieszanek cementowych. Przytoczono najistotniejsze publikacje naukowe, przeanalizowano stosowane metody badawcze oraz opisano różne techniki druku 3D z wyróżnieniem ich możliwości i ograniczeń. Część druga (rozdział 5) dotyczy skurczu betonu. Przeanalizowano najnowszą literaturę przedmiotu, usystematyzowano nazewnictwo oraz oceniono metody pomiarowe stosowane obecnie przez zespoły badawcze. Część trzecią (rozdział 6) poświęcono omówieniu mechanizmów pielęgnacji i sposobów przeciwdziałania odkształceniom skurczowym. Odniesiono się do wytycznych normowych krajowych oraz zagranicznych dotyczących pielęgnowania typowych konstrukcji betonowych i oceniono ich przydatność w kontekście technologii druku 3D.

Przeprowadzone badania własne wraz z analizą uzyskanych rezultatów przedstawiono w rozdziałach 7-13. Pierwszy etap badań polegał na doborze odpowiedniej mieszanki do druku 3D oraz określeniu wpływu modyfikacji jej składu na kluczowe parametry reologiczne świeżego materiału. Dla każdej z mieszanek przeprowadzono specjalnie zaprojektowane testy

pozwalające określić jej przydatność do druku. Oceniano wstępną wytrzymałość na ściskanie świeżej mieszanki odpowiadającą za możliwość przenoszenia obciążenia ciężarem kolejnych drukowanych warstw w stanie plastycznym. Analizowano również pompowalność i spoistość mieszanki oraz oceniano jakość wydruku, stałość wymiaru drukowanych próbek i podatność na zaburzenie ciągłości materiału. Wszystkie mieszanki poddano normowym badaniom wytrzymałościowym oraz określono skurcz całkowity. Dodatkowo zaproponowano bezkontaktową metodę pomiaru skurczu całkowitego elementów drukowanych z wykorzystaniem technologii laserowej. Metoda ta pozwalała na ciągły pomiar odkształceń materiału zarówno w stanie plastycznym jak i po zakończeniu wiązania. Po przeprowadzonych analizach wytypowano mieszankę do kolejnego etapu badań, czyli ocenę wpływu metod pielęgnacji na właściwości kompozytu cementowego.

W ramach badań zasadniczych oceniono wpływ geometrii przyjętych próbek na wartości mierzonego odkształcenia w metodzie laserowej, porównano wpływ ograniczenia zewnętrznego na rozwój skurczu oraz przeanalizowano jego przebieg w czasie. Następnie poddano krytycznej analizie metody pielęgnacji wewnętrznej, zewnętrznej oraz możliwość modyfikacji składu. Oceniono ich wpływ zarówno na skurcz materiału jak również parametry reologiczne i mechaniczne kompozytu. Uzyskane rezultaty porównano z modelami analitycznymi prognozowania skurczu.

Przeprowadzone badania oraz analizy wykazały, że istnieje możliwość redukcji skurczu elementów drukowanych z wykorzystaniem tradycyjnych metod pielęgnacji choć większość z nich nie wykazuje wystarczającej skuteczności. Potwierdzono przydatność zaproponowanej metody pomiaru skurczu elementów drukowanych oraz wykazano niedoszacowanie wartości skurczu w obowiązujących metodach analitycznych jego prognozowania. Szczegółowe wnioski wraz z proponowanymi dalszymi kierunkami badań przedstawiono w rozdziałach 14-17.

21.04.2023

Karol Federowicz

**THE EFFECT OF CURING ON SHRINKAGE DEFORMATION OF
CEMENTITIOUS COMPOSITES USED IN 3D PRINTING TECHNOLOGY -
ABSTRACT**

The 3D printing with cementitious materials is one of the fastest growing industry branches in the world. Its main advantages are the possibility of shortening the time of construction, reducing material consumption and use of human resources. The idea of 3D printing, called additive manufacturing, is based on successive stacking layers of material using computer-controlled robots. It enables to produce complex 3-dimension structures. The use of cement based mixtures as the material for printing creates opportunities to use such technology also in the construction sector. Over the last 10 years, the number of research teams and commercial companies interested in 3D printing with use of cementitious mixtures has begun to grow exponentially. The increased interest has been a catalyst for many research works that have focused on the durability aspects of additively manufactured elements.

One of the many still unsolved problems is the issue of proper curing of cement-based composites printed structures. Most of the available literature addresses this issue in a superficial way or only recommends further research in this area. The issue of curing is crucial due to the lack of traditional formwork used in traditional concrete construction to protect the fresh material from rapid moisture loss. The lack of this barrier can lead to cracking and reduced strength of the completed elements, which can result in lower durability and the need for expensive repairs.

This dissertation attempts to critically evaluate external and internal curing methods possible to apply in the context of 3D printing technology. The literature review can be divided into 3 main sections. The first section (Chapters 3 and 4) discusses the key aspects of 3D printing technology using cementitious materials. The most relevant scientific publications were cited, the commonly used research methods were analyzed, and various 3D printing techniques were described, distinguishing their capabilities and limitations. The second part (Chapter 5) deals with concrete shrinkage. It analyzes the latest literature on the subject, systematizes the nomenclature and evaluated the measurement methods currently being used by research teams. The third part (Chapter 6) is devoted to the discussion of curing mechanisms and ways of preventing shrinkage deformations. The dissertation refers to national and foreign standard guidelines for typical concrete structures and their applicability in the context of 3D printing technology.

The conducted research, along with the analysis of the obtained results, is presented in Chapters 7-13. The first stage of the research refers to the selection of a suitable mixture for 3D printing, as well as determining the influence of modifications of the composition on the main rheological parameters of fresh material. Specially designed tests were conducted for each mix to determine its suitability for printing. The initial compressive strength of the fresh mixture, which is responsible for the ability to carry the weight of subsequent printed layers in the plastic state, was evaluated. The pumpability and cohesiveness of the mix were also analyzed. The print quality, dimensional stability of printed samples or susceptibility to material discontinuity were evaluated. All the mixtures were subjected to standard strength tests and

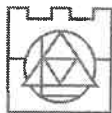
total shrinkage was determined. In addition, an original method for measuring the total shrinkage of printed parts using non-contact laser technology was proposed. This method allowed continuous measurement of the material deformation both in the plastic state and after setting. The analysis resulted in selection of the best mix for the next stage of testing taking into account influence of various curing methods on composite.

As part of the basic research, the effect of the geometry of the adopted specimens on the values of measured strain in the author's laser method was evaluated. The effect of external constraint on the development of shrinkage was compared and its time-development was analyzed. Afterwards, the methods of internal curing, external curing and the possibility of modifying the composition were critically analyzed. Their effects on both material shrinkage and rheological and mechanical parameters of the composite were evaluated. The obtained results were compared with analytical models of shrinkage prediction.

The conducted research and analysis have shown that it is possible to reduce the shrinkage of printed parts using traditional methods of curing, however most of them do not show sufficient effectiveness. The usefulness of the proposed method for measuring the shrinkage of printed components has been confirmed and the underestimation of shrinkage in existing analytical methods for its prediction has been demonstrated. Detailed conclusions, along with proposed further research directions, are presented in Chapters 14-17.

21.04.2023

Karol Federowicz



dr hab. inż. Tomasz Tracz, prof. PK
Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechniki Krakowskiej
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków
e-mail: tomasz.tracz@pk.edu.pl

Kraków, 25 lipiec 2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej

mgr inż. Karola Krzysztofa Federowicza

"Wpływ pielęgnacji na odkształcenia skurczowe kompozytów cementowych
wykorzystywanych w technologii druku 3D"

zrealizowanej pod opieką promotorską Pani prof. dr hab. inż. Marii Kaszyńskiej oraz
Pana dr inż. Adama Zielińskiego jako promotora pomocniczego

1. Podstawy opracowania opinii

Podstawę formalną opracowania niniejszej opinii stanowi pismo z dnia 17 maja 2023 r. Prorektora ds. nauki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, Pana Profesora dr hab. inż. Jacka Przepiórskiego, zawierające zlecenie wykonania niniejszej recenzji.

Podstawę merytoryczną opracowania opinii stanowił załączony do zlecenia kompletny tekst rozprawy doktorskiej mgr inż. Karola Krzysztofa Federowicza pod tytułem jak wyżej.

Podstawę prawną recenzji stanowią:

- Ustawa 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 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.),
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. poz.261).



2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska autorstwa Pana mgr inż. Karola Krzysztofa Federowicza pt. Wpływ pielęgnacji na odkształcenia skurczowe kompozytów cementowych wykorzystywanych w technologii druku 3D. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Maria Kaszyńska, zaś promotorem pomocniczym – dr inż. Adam Zieliński. Rozprawa została przygotowana w Katedrze Konstrukcji Żelbetowych i Technologii Betonu Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

3. Charakterystyka rozprawy oraz uwagi ogólne

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy wpływu pielęgnacji na odkształcenia skurczowe kompozytów cementowych wykorzystywanych w technologii druku 3D. Rozprawa ma typowy charakter opracowania studialno-doświadczalnego. Praca napisana jest w języku polskim i liczy 254 stron formatu A4. Składa się z 18 rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim, objaśnieniem stosowanych symboli i zakończona jest spisem literatury oraz spisem tabel i rysunków.

W części studialnej w pierwszej kolejności w rozdziale 1 Doktorant we wprowadzeniu wyjaśnia technologie i podstawowe pojęcia dotyczące druku kompozytów cementowych oraz porusza ważność pielęgnacji w kontekście występowania odkształceń skurczowych w trakcie dojrzewania kompozytu. Cel i teza pracy została zaprezentowana w rozdziale 2. Autor na podstawie rozpoznanej literatury oraz rezultatów badań wstępnych zaproponował tezę badawczą mówiącą o tym, że stosowanie odpowiedniej formy pielęgnacji ma istotny wpływ na redukcję odkształceń skurczowych w kompozytach cementowych wykorzystywanych w technologii druku 3D. Teza wprowadza raczej oczywista to sformułowana prawidłowo. Głównym celem rozprawy jest „... zaproponowanie, przebadanie i ocena przydatności różnych form pielęgnacji wewnętrznej i zewnętrznej kompozytów cementowych wykorzystywanych w technologii druku 3D.” Cel choć przedstawiony jasno wydaje się trudny technicznie do realizacji i zapewne bardzo pracochłonny. W rozdziale 3 omówione zostały najistotniejsze aspekty technologii druku 3D mieszanek cementowych. Przywołano wiele aktualnych i interesujących publikacji naukowych, opisujących stosowane metody badawcze oraz różne techniki druku 3D. Autor nie pominął informacji o możliwościach i ewentualnych ograniczeniach jakie związane są z technikami druku 3D. Rozdział 4 składający się z kilku podrozdziałów to obszerny opis zagadnień związanych z właściwościami mieszanek cementowych stosowanych w druku 3D. Podobnie jak w poprzednio ten rozdział jest bardzo bogaty w prezentację rezultatów wielu badaczy. Wydaje się, że poruszane problemy związane z właściwościami mieszanek są kluczowe w tej technologii formowania (kształtowania) elementów w trakcie druku 3D. Rozdział 5 poświęcono skurczowi betonu. W kilku podrozdziałach Autor omówił rodzaje skurczu, plastyczny, autogeniczny, od wysychania, termiczny a nawet skurcz spowodowany karbonatyzacją. W



podrozdziale 5.2 zaprezentowano wiele metod badawczych pomiaru skurczu, zarówno normowych jak i nowatorskich stosowanych przez różne zespoły badawcze. Pielęgnacji betonu poświęcono rozdział 6. Omówiono w nim po krótce metody pielęgnacji zewnętrznej i wewnętrznej skupiając się z oczywistych powodów na technikach, które mogą znaleźć zastosowanie w technologii druku 3D.

Część badawczą otwiera rozdział 7 w którym Doktorant prezentuje zrealizowany zakres badań, został on podzielony na trzy etapy: badania wstępne, zasadnicze oraz weryfikacyjne. Obszerne badania wstępne miały na celu ocenę wielu właściwości pięciu wytypowanych mieszanek a niejako efektem końcowym tego etapu był wybór jednej mieszanki do badań zasadniczych. W badaniach zasadniczych skład wybranej mieszanki jeszcze nieco zmodyfikowano tak aby osiągnąć jak najlepsze parametry wydruku. Dla zmodyfikowanej mieszanki oceniano wpływ różnych metod pielęgnacji na odkształcenia skurczowe. W rozdziale tym Doktorant przedstawił również zakres badań weryfikacyjnych. Rozdział 8 to prezentacja dwóch nowatorskich stanowisk badawczych. Pierwsze z nich to stanowisko służące do druku 3D mieszanek cementowych będące osiągnięciem dwóch zespołu pracowników pochodzących z Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska oraz Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Drugie opisane stanowisko, dedykowane było pomiarom odkształceń skurczowych elementów drukowanych w 3D. Projekt tego innowacyjnego stanowiska, jest dziełem promotora pomocniczego niniejszej pracy Pana dr inż. Adama Zielińskiego. Rozdział 9 Doktorant poświęcił na prezentację metod badawczych. W kilkunastu podrozdziałach opisał stosowane procedury badawcze z poziomem szczegółowości adekwatnym dla poszczególnych metod. Niemniej jednak czasami opis zawierał odwołania do norm lub publikacji naukowych, co utrudniało czytelnikowi szybkie dotarcie do informacji. Rezultaty badań wstępnych zostały zaprezentowane w rozdziale 10. W pierwszej kolejności Autor przypomniał wcześniej prezentowany zakres badań a następnie przedstawił charakterystykę składników mieszanek i szczegółowe składy wybranych mieszanek. Następnie sukcesywnie Doktorant prezentował wyniki badań w licznych tabelach i wykresach. Po prezentacji poszczególnych rezultatów zamieszczał krótki opis zaobserwowanych zmienności. Natomiast analizę wyników oraz wnioski zawarł w dwóch ostatnich podrozdziałach, rozdziału 10. Rozdział 11 i 12 poświęcono badaniom zasadniczym. W rozdziale 11 zaprezentowano podstawowy skład mieszanki, szczegółowo omówiono zakres zrealizowanych badań oraz charakterystykę wielu wariantów metod pielęgnacji. Ponadto w rozdziale tym znalazły się jeszcze informacje o stosowanych metodach w ocenie właściwości stwardniałego kompozytu i kluczowych metodach oceny skurczu. Rozdział 12 to w zasadzie główny rozdział prezentujący wyniki badań doświadczalnych zrealizowanych w ramach niniejszej pracy doktorskiej. Prezentację Autor rozpoczyna od wyników badań świeżej mieszanki takich jak: gęstość, czas wiązania, wytrzymałość na ścinanie, konsystencja i wstępna wytrzymałość na ściskanie. Natomiast w drugiej części znajduje się prezentacja wyników badań dotyczących kompozytów stwardniałych. Ocenę wytrzymałości na ściskanie i zginanie rozszerzono o badania wpływu efektu skali próbek na ocenianą wytrzymałość. Rozdział 12 kończy prezentacja wyników badań



łączonego wpływu pielęgnacji wewnętrznej i zewnętrznej na skurcz całkowity przeprowadzonych dla jednego wybranego wariantu. W rozdziale 13 Doktorant podjął się analizy czterech najpowszechniej stosowanych modeli empirycznych pozwalających na prognozowanie skurczu kompozytów cementowych. Rozdział 14 to bardzo obszerna analiza wyników badań wpływu pielęgnacji na cały zakres ocenianych właściwości kompozytów. Na potrzeby tej analizy przygotowano ponad dwadzieścia rysunków, graficznie zestawiających wyniki badań dotyczące konkretnie porównywanych rezultatów. Rozdział ten kończy analiza łącznego wpływu wybranego wariantu pielęgnacji wewnętrznej i zewnętrznej na skurcz całkowity. Krótki rozdział 15 poświęcono na omówienie doświadczalnej weryfikacji rezultatów badań zasadniczych w skali rzeczywistego wydruku elementu ściennego o niewielkich rozmiarach. Podjęto również próbę porównania skuteczności prognozowania skurczu na podstawie dostępnych modeli.

Wnioski końcowe zostały przedstawione w rozdziale 16. W rozdziale tym w pierwszej kolejności Doktorant sformułował 4 wnioski ogólne a następnie 15 wniosków szczegółowych. Zaprezentowane wnioski obejmują całość zrealizowanego zakresu badań i przeprowadzonych analiz. Ostatni rozdział 17 jest zapowiedzią planów dalszych badań zapewne prowadzonych w macierzystym ośrodku Doktoranta.

Załączony do rozprawy, ponad przeciętny, obszerny spis literatury w tym norm zawiera 298 pozycji. Ponad połowa tj. 52% cytowanych prac pochodzi z ostatnich 5 lat a 86% z ostatnich 10 lat, co dobrze ilustruje zainteresowania badaczy tą tematyką w ostatnim okresie oraz dowodzi aktualności problemu badawczego jaki jest przedmiotem niniejszej dysertacji. Praca zawiera 33 tabele oraz 184 rysunki, które wymagały od Doktoranta poświęcenia ogromu pracy na ich przygotowanie.

Podsumowując stwierdzam, że układ rozprawy, kolejność prezentowanych wyników, sposób ich prezentacji oraz poprawność językowa nie budzi moich zastrzeżeń. Dobór pozycji literaturowych jest wystarczający i dobrze dopasowany do tematyki rozprawy.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Tytuł rozprawy odpowiada jej zawartości. Cel pracy oraz spodziewane rezultaty zostały wystarczająco jasno przedstawione, a zrealizowane badania doświadczalne wraz z analizą uzyskanych wyników to potwierdzają.

Część studialna prezentowana na 71 stronach jest opracowana bardzo starannie, porusza wiele aspektów związanych ogólnie z technologią druku 3D kompozytów cementowych. Zakres omówionych zagadnień w sposób wystarczający wprowadza czytelnika do prezentacji w dalszej części pracy badań, wyników i ich analiz. Dobrany zakres cytowanych osiągnięć innych badaczy jest trafny i w pełni wystarczający.

Część doświadczalna pracy, zawarta została w aż 10 rozdziałach. Zrealizowany program badań własnych był bardzo rozbudowany, składał się z obszernych badań wstępnych, badań podstawowych oraz weryfikacyjnych. W celu zapewnienia przejrzystości prezentacji tak obszernego zakresu badań Autor zdecydował się na utworzenie ponad 20 podrozdziałów, w tej doświadczalnej części pracy. Uzyskane liczne wyniki nie budzą



wątpliwości co do ich wiarygodności, co świadczy o dobrze dobranych metodach badawczych. Jedyną wątpliwości natury ogólnej budzi w opinii recenzenta założenie, iż modyfikacja składu analizowanych mieszanek poprzez zastosowanie domieszek lub kruszywa o wielkości ziarna do 4 mm jest rodzajem pielęgnacji wewnętrznej. Oczywiście nie podważam zasadności zrealizowanych badań dla takich mieszanek, bardzo wysoko oceniam mnogość wariantów, jednak w mojej ocenie taka modyfikacja składu nie jest rodzajem pielęgnacji.

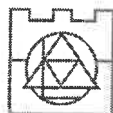
Podsumowując program oraz zakres przeprowadzonych badań własnych został opracowany poprawnie i wystarczająco obszernie, stosownie do postawionego celu.

Teza pracy została sformułowana jasno i czytelnie. Weryfikacja tezy wymagała wykonania obszernego programu badawczego dostarczającego licznych wyników, które zostały przez Doktoranta poddane szczegółowej analizie. Wysokiej jakości analiza wyników badań stoi na wysokim poziomie i była podstawą sformułowania wielu wniosków, które między innymi potwierdziły prawdziwość postawionej tezy badawczej.

5. Uwagi, spostrzeżenia i wątpliwości recenzenta

Poniżej zamieszczam uwagi, spostrzeżenia lub wątpliwości o różnym poziomie istotności, które powstały w trakcie lektury rozprawy. Wiele z nich to uwagi pozytywne, podkreślające walory recenzowanej pracy.

- 1) Strona 43 - Doktorant prezentując przykładu zniszczenia elementów w trakcie druku podkreśla, że bardzo często „... trudno określić dominujące źródło niepowodzenia ...”, to bardzo trafne stwierdzenie świadczące o dużym rozpoznaniu problemu.
- 2) W części studialnej Doktorant opracował wiele zestawień pochodzących z danych literaturowych, między innymi takich jak: Tabela 1 - zestawienia składów mieszanek do druku 3D, Tabele 2 i 3 - statycznej i dynamicznej granicy płynięcia oraz lepkości plastycznej wielu mieszanek, Tabela 5 - najbardziej powszechne normy dedykowane badaniom skurczu liniowego. Zdaniem recenzenta takie zestawienia świadczą o dużym zaangażowaniu Doktoranta w opracowanie studialnej części recenzowanej pracy.
- 3) Strona 50 – Doktorant odnosząc się do braku standaryzacji metod badawczych oceniających właściwości reologiczne mieszanek podkreśla, że na rynku obecnych jest wiele zestawów do druku 3D z których każda może posiadać inną charakterystykę pracy, zatem inne wymagania wobec mieszanek. To często umniejsza uniwersalności prezentowanych w literaturze rezultatów badań. Uważam, że poruszane przez Doktoranta w części studialnej recenzowanej pracy tego rodzaju problemy są bardzo cenne.
- 4) Na pochwałę zasługuje opracowanie graficzne wszystkich zamieszczonych w części studialnej rysunków. Są one przejrzyste i zawsze z opisami w języku polskim. Choć w przypadku rysunków 46 i 47 powielanie opisów osi w jednostkach psi lub °F jest raczej zbędne.



- 5) Rozdział 9.4 – wykorzystywanie metod badawczych opracowanych pierwotnie do badania innych materiałów jest jak najbardziej zasadne, zwłaszcza kiedy uzyskujemy zadawalające rezultaty. Wydaje się jednak, że Autor opisowy metody oceny wytrzymałości na ścinanie świeżej mieszanki mógł poświęcić nieco więcej uwagi i szczegółowo opisać zasadę pomiaru a nie odwoływać się do opisu zamieszczonego w literaturze.
- 6) Strona 105, Tabela 8 – zastosowano różny styl separatora. Wszędzie powinny być przecinki.
- 7) Strona 110 i 111, Rozdział 10.4.2 – nie do końca wyczerpująco Autor wyjaśnia, dlaczego stosuje metodę oceny czasu wiązania cementu na mieszankach w składzie których znajduje się piasek, a nie na zaczynach. Ponadto przyjęta metoda umożliwia przesychanie materiału w trakcie badania, co również jest znaczącym odstępstwem od wymagań normowych. Wobec powyższego, pewnym nadużyciem jest utożsamianie otrzymanych wyników z realnym czasem wiązania cementu.
- 8) Szczególnie w trakcie prezentacji wyników badań wstępnych, Doktorant w wielu miejscach nie zawarł w opisie informacji, jaka była liczebność serii próbek w poszczególnych badaniach, jak była jednorodność wyników i czy prezentowane wyniki w tabelach to np. wartości średnie.
- 9) Strona 132 – analiza wyników krzywych płynięcia mieszanek M1-M5. Autor dostrzega, że naprężenia ścinające w mieszance M2 są niższe od naprężeń charakteryzujących mieszankę M1. Wyjaśnia następnie, iż powodem zróżnicowania jest większa ilość piasku w składzie mieszanki M2, a kilka zdań wcześniej w opisie informuje, że z uwagi na ograniczenia sprzętowe badania realizowano na zaczynach.
- 10) Strona 153, Tabela 25 – brak wyników gęstości teoretycznej, choć w tekście jest informacja, że takie wyniki w tabeli się znajdują.
- 11) Strona 160, Rozdział 12.2.2. – wysoko oceniam zrealizowane badania wpływu efektu skali próbek w badaniach właściwości mechanicznych. Rezultaty tych badań mają dużą wartość praktyczną i mogą być podstawą do opracowania standardów oceny wytrzymałości mieszanek stosowanych do druku 3D.
- 12) Strony 164 i 165 – Autor zaobserwował spadek wytrzymałości próbek drukowanych w stosunku do próbek formowanych normowo. Wyjaśnia, iż jednym z powodów jest wzrost porowatości materiału drukowanego. Sugeruję w przyszłości wykonanie badań oceny charakterystyki porowatości tych dwóch materiałów, wówczas wnioskowanie byłby bardziej rozbudowane i poparte wyniki bezpośrednio oceniającymi tą porowatość. Cieszę się, że Doktorant podziela w tym zakresie moje spostrzeżenia i w rozdziale 17 pisze o planach badawczych dotyczących oceny mikrostruktury porów w kompozytach cementowych drukowanych w 3D.
- 13) Strona 176, Rozdział 12.3.3. – „Na rysunkach od 142 do przedstawiono ...” powinno być „Na rysunkach od 142 do 145 przedstawiono ...”
- 14) Strona 147, Tabela 24 – powinna zawierać jeszcze jeden wariant poddany badaniom, opisany w Rozdziale 12.3.5. Wprowadź ocenę skurczu całkowitego dla kombinację wpływu pielęgnacji



wewnętrznej i zewnętrznej wykonano niejako dodatkowo, to jednak takie rozwiązanie technologiczne może być w praktyce stosowane.

- 15) Strony 183-196, Rozdział 13 – na szczególną pochwałę zasługuje podjęcie przez Doktoranta trudu związanego z empirycznym prognozowaniem skurczu mieszanek drukowanych w 3D na podstawie najpowszechniej stosowanych modeli. Dobór modeli był jak najbardziej zasadny, jednak otrzymane rezultaty wykazały znaczące zaniżenie wartości szacowanego skurczu całkowitego w porównaniu do badań doświadczalnych. Na końcu tego rozdziału brakowało pewnego podsumowania i analizy uzyskanych rozbieżności.
- 16) Strona 202 – analizę dotyczącą efektu skali w badaniach wytrzymałościowych kończą rozważania o wpływie pielęgnacji mokrej na zaobserwowane zróżnicowanie wytrzymałości. Oceniam pozytywnie, że w tej części Doktorant nie zapomniał o przewodnim temacie niniejszej dysertacji.
- 17) Zakres badań zasadniczych obejmował bardzo ważne dla realizacji zamierzonych celów badawczych, badania skurczu w warunkach ograniczonej swobody odkształceń. Te badania prowadzone dla trzech warstw w sposób rzeczywisty oddają charakterystykę odkształceń skurczowych kompozytu stosowanego w druku 3D. Oceniam zastosowaną metody bardzo wysoko a rezultaty tych badań za niezwykle cenne.
- 18) Strony 224 i 225 – akapit pomiędzy rysunkami 180 a 181 jest powtórzeniem akapitu zamieszczonego na przed rysunkiem 180.
- 19) Strona 230 – Doktorant we wniosku 13 twierdzi na podstawie analizy wyników badań zasadniczych, że „izolowanie próbek folią lub wilgotną geowłókniną jest mniej skuteczne niż zraszanie próbek wodą” co oczywiście nie podlega dyskusji. Jednak w kolejnym zdaniu, w mojej opinii zbyt krytycznie, dyskwalifikuje te metody pielęgnacji zewnętrznej jak nieadekwatne dla technologii druku 3D. Jeśli tak w rzeczywistości było, to zakres zrealizowanych badań nie powinien obejmować takiego wariantu pielęgnacji.
- 20) Czytelnik po zapoznaniu się z całością zrealizowanych badań, obszerną i detaliczną analizą a szczególnie po przeczytaniu wniosków, dochodzi do konkluzji, że duży skurcz całkowity kompozytów cementowych drukowanych w technologii 3D jest kluczowym problemem technologicznym. A jedynym na tą chwilę rozwiązaniem znacząco ograniczającym skurcz, jest pielęgnacja zewnętrzna w postaci prostego zraszania wodą dojrzewającego materiału. Inne jakże zaawansowane i nowoczesne techniki zweryfikowane w badaniach nie przyniosły oczekiwanych rezultatów.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podjęta w rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Karola Federowicza tematyka, jest bardzo aktualna i w ostatnich latach stała się obiektem zainteresowań wielu badaczy. Autor rozprawy wniósł duży wkład nowej



wiedzy dotyczącej technologii druku 3D w odniesieniu do aktualnego stanu techniki. Doktorant dobrze przeprowadził przegląd literatury, sformułował problemy i zaproponował stosowny program badań własnych. Zrealizował bardzo obszerny zakres doświadczalnych badań własnych, stosując nie budzącą zastrzeżeń metodykę oceny licznych właściwości kompozytów, czasami dedykowaną bezpośrednio dla kompozytów drukowanych w 3D, a przedstawione w pracy liczne wyniki wraz z ich analizą są na wysokim poziomie.

W moim przekonaniu Autor wykazał się obszerną znajomością stanu wiedzy dotyczącej tematyki rozprawy oraz potwierdził, iż posiada dobrą umiejętność planowania badań doświadczalnych, ich realizacji, ale przede wszystkim opracowania szczegółowej analizy uzyskanych rezultatów. Ponadto potrafi formułować trafne wnioski, wynikające z analizy wyników. Dowodzi to o dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia w przyszłości rozbudowanych prac badawczych.

Biorąc pod uwagę wszystko co wyżej, przedłożoną rozprawę oceniam **pozytywnie w całości spełniającą wymagania** Ustawy 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 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.), w związku z czym z pełnym przekonaniem **wnioskuję o dopuszczenie** jej do publicznej obrony.

Z wagi na aktualność podjętej tematyki pracy, ponad przeciętny zakres zrealizowanych badań własnych, sposób prezentacji rezultatów oraz wysoką jakość analiz i trafność formułowanych wniosków, wnoszę o wyróżnienie pracy doktorskiej Pana mgr inż. Karola Federowicza.

dr hab. inż. Tomasz Tracz
prof. Politechniki Krakowskiej

Warszawa, 15 czerwca 2023 r.

Prof. dr hab. inż. Piotr Wojciechowski

Wydział Inżynierii Lądowej

Politechnika Warszawska

Al. Armii Ludowej 16

00-637 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Karola Federowicza

**pt. „Wpływ pielęgnacji na odkształcenia skurczowe kompozytów cementowych
wykorzystywanych w technologii druku 3D”**

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi pismo Prorektora ds. Nauki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego prof. dra hab. inż. Jacka Przepiórskiego, z dn. 18.05.2023 r., wynikające z uchwały Senatu ZUT z dn. 15.05.2023 r., powołującej mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej p. mgr inż. Karola Federowicza, w postępowaniu prowadzonym wg przepisów Ustawy z dn. 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Rozprawa doktorska p. mgr Federowicza została przygotowana w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym. Jej promotorem jest prof. dr hab. inż. Maria Kaszyńska a promotorem pomocniczym dr inż. Adam Zieliński.

1. Charakterystyka ogólna pracy

Rozprawa ma charakter badawczy, liczy 254 strony i została podzielona aż na 18 rozdziałów, w tym wykaz literatury obejmujący 298(!) pozycji, a także streszczenia w językach polskim i angielskim. Praca zawiera także obszerny wykaz oznaczeń i symboli.

W rozdziale pierwszym pracy Autor zarysowuje tematykę rozprawy, by następnie w rozdziale 2 sformułować cel i tezę pracy, która dotyczy roli pielęgnacji betonu drukowanego w technologii 3D w ograniczaniu odkształceń skurczowych. Rozdziały 4-6 stanowią część studialną pracy i obejmują analizę stosowanych na świecie technologii druku 3D betonu, podstawy teoretyczne i metody badań skurczu betonu oraz podstawową charakterystykę metod pielęgnacji zewnętrznej i

wewnętrznej betonu. W rozdziale 7 przedstawiono syntetycznie zakres badań przeprowadzonych w ramach realizacji rozprawy. Kolejne dwa rozdziały (8 i 9) poświęcone są opisowi warsztatu badawczego, w tym skonstruowanej w ZUT (z udziałem autora rozprawy) i użytej w badaniach drukarki 3D oraz standardowych i niestandardowych, autorskich metod badawczych. W rozdziale 10 przedstawiono badania wstępne, które służyły dopracowaniu doboru składników i ich proporcji w mieszance do druku 3D z wykorzystaniem posiadanej drukarki. Rozdziały 11-15 zawierają relację z badań zasadniczych wraz z analizą ich wyników oraz badań weryfikacyjnych dotyczących fragmentu wydrukowanej ściany z otworem. Badania te dotyczą przebiegu skurczu elementów wykonanych metodą druku 3D oraz możliwości ograniczania odkształceń skurczowych przy pomocy różnych technik pielęgnacji i modyfikacji składu. Przedstawiono także interesujące porównanie skurczu wyznaczonego doświadczalnie i obliczonego teoretycznie z wykorzystaniem czterech różnych formuł wg źródeł normowych i innych literaturowych. Pracę kończą wnioski i plany dalszych badań (rozd. 16 i 17) oraz obszerny wykaz bibliograficzny, wykaz rysunków i tabel. Warto podkreślić, że rozprawa zawiera blisko 200 rysunków i ponad 30 tabel, w znakomitej większości na bardzo wysokim poziomie merytorycznym i edytorskim, co bardzo wzbogaca rozprawę i ułatwia jej odbiór.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

2.1. Dobór tematu i cel rozprawy

Druk 3D w technologii betonu jest tematem stosunkowo nowym ale już bardzo popularnym i stanowiącym przedmiot zainteresowania zarówno budowlanców-praktyków czy inwestorów, jak i naukowców z obszaru inżynierii materiałów budowlanych. Ośrodek naukowo-badawczy w szczecińskim ZUT prowadzi prace w tym zakresie pod kierunkiem promotora rozprawy prof. Marii Kaszyńskiej już od dłuższego czasu i jest w tej tematyce wiodącym ośrodkiem w Polsce. Praca doktorska p. mgra Federowicza jest kolejnym krokiem w rozwoju dokonań tego zespołu.

Problem znacznego skurczu betonu drukowanego w technologii 3D jest sygnalizowany w literaturze i – jak dotąd - nie znalazł kompleksowego rozwiązania, o czym świadczą także przytoczone przez Autora publikacje, omówione w rozdziale 3 rozprawy.

Autor podjął ambitne zadanie nie tylko doświadczalnego określenia przebiegu skurczu elementów drukowanych (wraz z porównaniem z teoretycznym skurczem obliczeniowym) ale także zaproponowania skutecznych metod zmniejszania skutków tego zjawiska z wykorzystaniem różnych technik pielęgnacji oraz modyfikacji składu.

Tematykę i cele rozprawy oceniam bardzo pozytywnie w świetle wymagań stawianych rozprawom doktorskim.

2.2. Ocena rozwiązania problemu naukowego zawartego w rozprawie

Rozprawa zawiera tezę, trafnie określoną mianem tezy badawczej, która brzmi: *„Zastosowanie odpowiedniej formy pielęgnacji zewnętrznej lub wewnętrznej ma istotny wpływ na redukcję odkształceń skurczowych w kompozytach cementowych wykorzystywanych w technologii druku 3D”*. Nie jest to teza, którą można w pełni utożsamić z oryginalnym problemem naukowym stanowiącym podstawę rozprawy. W zaproponowanym ujęciu teza wydaje się oczywista, wręcz wynikająca z definicji pojęcia pielęgnacja, i prawdziwa dla praktycznie wszystkich rodzajów betonu cementowego. Ponadto analiza tabeli 24 wskazuje, że przedmiotem badań Doktoranta były nie tylko metody pielęgnacji, ale także inne metody ograniczania skurczu, takie jak stosowanie domieszek przeciwskurczowych SRA (czasem uznawane za sposób pielęgnacji wewnętrznej) czy też zmiana wielkości maksymalnego ziarna kruszywa.

Te wątpliwości nie obniżają jednak ogólnej wysokiej oceny podjętego problemu naukowego, jak również przedstawionego rozwiązania tego problemu.

Istotą oryginalnego problemu naukowego, który Doktorant podjął w rozprawie jest, w moim przekonaniu, określenie i porównanie skuteczności różnych metod ograniczania skurczu elementów wykonywanych w technologii 3D. Autor zastosował w badaniach aż 11 metod ograniczenia skurczu takich elementów oraz dostosował metodę pomiaru tego skurczu do warunków swojego eksperymentu, a następnie ocenił doświadczalnie skuteczność wszystkich metod, wskazując najefektywniejsze z nich. Istotnymi walorami pracy są także opracowanie i praktyczna weryfikacja procedur badania specyficznych cech mieszanek i betonów drukowanych techniką 3D. Wartościową merytorycznie częścią pracy jest ponadto próba skonfrontowania skurczu elementów drukowanych techniką 3D pomierzonego i prognozowanego z wykorzystaniem modeli z norm i dokumentów RILEM, fib oraz ACI.

2.3 Ocena warsztatu naukowego Kandydata, Jego wiedzy teoretycznej w zakresie dyscypliny i umiejętności samodzielnego prowadzenia badań

Warsztat naukowy Doktoranta zasługuje na bardzo wysoką ocenę. Przeprowadzony przegląd literatury jest niezwykle obszerny, a sięgająca prawie 300 pozycji bibliografia – jest imponująca, i co więcej bardzo trafnie wykorzystana i przywoływana, głównie w części studialnej rozprawy. Autor swobodnie i w dojrzały sposób analizuje dotychczasowy stan wiedzy, formułując trafnie wnioski z tego przeglądu, które stanowią podstawę jego własnych badań. Warsztat badawczy Doktoranta jest bogaty. Efektywne wykorzystanie drukarki 3D, opisy metod badawczych i ich dostosowania do specyfiki wynikającej z przebiegu i efektów drukowania, a w końcu własne refleksje służące udoskonaleniu procesu badawczego w toku prowadzenia eksperymentów – wskazują na wysoki poziom umiejętności i kompetencji badawczych Autora. Sposób analizy wyników, w tym staranne opracowania statystyczne, matematyczne modelowanie zależności i sposób prezentacji wyników analiz wskazują na dojrzałość naukową Doktoranta i wysoki poziom jego wiedzy w zakresie inżynierii materiałów budowlanych, w tym w szczególności – w technologii betonu.

Reasumując tę część recenzji, wiedzę teoretyczną, warsztat naukowo-badawczy Autora i umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Niego badań oceniam wysoce pozytywnie.

3. Uwagi krytyczne

3.1 Konstrukcja rozprawy

Rozprawa liczy aż 18 rozdziałów, co jest zupełnie nietypowe, a co więcej – paradoksalnie – utrudnia lekturę i w mojej subiektywnej ocenie czyni rozprawę mniej komunikatywną.

Niedosyt pozostawia rozdział 7 (Zakres badań), który bardzo syntetycznie przedstawia plan zamierzenia badawczego. Nadmierna syntetyczność tego rozdziału sprawia, że czytelnik nie dowiaduje się z niego jakie metody pielęgnacji są przedmiotem badań. Jest to zaskakujące w kontekście tytułu rozprawy, według którego pielęgnacja (i jej metody) jest główną zmienną w autorskich badaniach Doktoranta. Szkoda, że Autor nie podjął próby opracowania programu badań w formie schematu blokowego, który wymaga jednoznacznego łączenia etapów i bloków badań związkami przyczynowo-skutkowymi. Być może konsekwencją braku

takiego ujęcia zakresu i programu badań jest przemieszanie w toku eksperymentów metod pielęgnacji i innych metod ograniczania skurczu. W świetle powyższego nie jestem w pełni przekonany co do trafności tytułu rozprawy – w moim odczuciu w tytule mogły by się pojawić raczej metody lub możliwości ograniczania skurczu niż pielęgnacja. Proszę o komentarz w tym zakresie w ramach dyskusji na obronie rozprawy.

3.2 Uwagi szczegółowe

Na wstępie tej części recenzji chciałbym zaznaczyć, że rozprawa jest napisana starannie, dobrą polszczyzną i efektownie wyedytowana, nie jest jednak wolna od sporej liczby literówek, których nie będę przytaczał ale poddaję pod rozwagę staranną korektę pracy, w przypadku korzystania z niej w przyszłych publikacjach.

W trakcie lektury nasunęły mi się następujące uwagi, przemyślenia i pytania:

1. W kilku przypadkach mam wątpliwości w zakresie terminologii:

- interesującą i wartościową częścią rozprawy jest dyskusja nad specyficznymi charakterystykami służącymi do opisu mieszanek 3D, w tym także propozycje ich polskiego nazewnictwa. Pomysły doktoranta w tym zakresie są dobrze uzasadnione i trafne, z jedną wątpliwością: termin „*buildability*”, po długiej i ciekawej dyskusji, Autor tłumaczy ostatecznie jako „*wytrzymałość wstępna*”. Sam zresztą niejako za chwilę dyskredytuje ten termin, wskazując, że zwykle nie wyraża się tej cechy w jednostkach wytrzymałości. Dalej jednak wiąże *buildability* z „*green strength*”, powracając do koncepcji cechy wyrażanej w kPa. W moim przekonaniu angielski termin *buildability* (dosł. zabudowywalność?, zdolność do wbudowania?) bardziej kojarzy się z szybkością pionową druku (liczba warstw w jednostce czasu). Starając się jednak zachować logikę związaną z nośnością wydrukowanej warstwy sugerowałbym rozważenie terminu używanego w badaniach innych materiałów podatnych, np. styropianu, w przypadku którego właściwością normową jest „naprężenie ściskające przy 10%-owym odkształceniu względnym”. Analogicznie w przypadku mieszanek 3D mogło by to być „naprężenie ściskające przy 20% (50%)-owym odkształceniu względnym mieszanek”. Takie podejście pozwala także uniknąć problemu zdefiniowania kryterium zniszczenia, nieodzownego w przypadku pojęcia wytrzymałości;

- na str. 14 w wyniku dyskusji czy używać terminu beton 3D czy zaprawa 3D, Autor decyduje się na termin „*kompozyt cementowy*”, twierdząc, że jest to

„rozwiązanie pośrednie” – nie sposób się zgodzić z tą „pośredniością”, ponieważ termin kompozyt cementowy jest nadrzędny, obejmując zarówno betony, zaprawy jak i nawet zaczyny cementowe;

- na stronie 22 mowa jest o „*dedykowanych mieszankach*” – jest to nieładny anglicyzm, nie dopuszczalny w języku polskim;

- wielokrotnie w tekście pojawia się pojęcie „*świeżej mieszanki*” – jest ono redundantne gdyż mieszanka zawsze jest świeża;

- na str. 39 jest mowa o „*prostoliniowych ścieżkach testowych*” – chodzi zapewne o ścieżki prostoliniowe?

2. Rysunek 3 – skądinąd interesujący, jest mało zrozumiały. Co właściwie oznaczają trójkąty i kropki na wykresie: przykładowo w przedziale 2016-2017 umieszczono 6 trójkątów, wszystkie w zakresie między 50 a 60 publikacji... Jak to zinterpretować? Czy to oznacza, że zliczano publikacje co 2 miesiące? Ponadto nie podano źródła danych (nie chodzi o artykuł źródłowy tylko bazę danych) ani skali oszacowania (światowe? lokalne?). Na osi pionowej wykresu powinna być liczba publikacji (nie ilość);

3. Na rysunku 10, w składzie kompozytu M6 pojawiają się tajemnicze „dodatki”, natomiast zaskakuje brak napomknienia o superplastyfikatorze w pozostałych kładach;

4. Wywód na stronie 37 wskazuje, że wysokie ciśnienie pompowania mieszanek do druku 3D powoduje znaczny wzrost temperatury mieszanki w trakcie pompowania. Co jest źródłem tego problemu: wysokie ciśnienie pompowania czy tarcie lepkiej mieszanki o ścianki?

5. W kilku miejscach pracy (np. na str. 77) Autor stwierdza, że w Polsce „obowiązuje norma”. Normy według polskiego prawodawstwa nie są dokumentami obligatoryjnymi lecz dobrowolnego stosowania;

6. Na str. 81 Autor nietrafnie odnosi się do zasad stosowania pielęgnacji wewnętrznej z wykorzystaniem SAP – sugerowane zwiększanie ilości wody zarobowej z założeniem, że SAP wchłonie ten nadmiar, jest niewłaściwe i stanowi powód wielu negatywnych skutków ubocznych pielęgnacji wewnętrznej z użyciem SAP, co prowadzi do często publikowanych krytycznych opinii o tej formie pielęgnacji;

7. W opisach niekonwencjonalnych metod badań w rozdz. 9.7, 9.8, 9.9 zabrakło jednoznacznego sformułowania oczekiwanej postaci wyniku badania – takie informacje pojawiają się częściowo w rozdziałach z wynikami i ich analizą, ale w

moim przekonaniu powinny stanowić część opisu procedury badania w rozdziale 9. W szczególności jest to rażące w odniesieniu do testu drukowalności: czy wynikiem badania są także parametry b i h czy tylko parametr A , który jest omawiany w rozdz. 10.4.8? Jakie parametry b i h odpowiadają „oczekiwanej jakości ścieżki testowej”?

8. Technologia druku 3D sprawia, że powstający materiał/wyrób/element konstrukcyjny ma zapewne właściwości anizotropowe, podobnie jak to ma miejsce w przypadku drewna. Jest to szczególnie istotne w odniesieniu do cech mechanicznych, ale z pewnością ma także znaczenie w odniesieniu do skurczu, który może być różny, w zależności od kierunku pomiaru. Zagadnieniu temu praktycznie nie poświęcono uwagi w pracy – jak rzutuje to na wnioski z badań i analiz?

9. W rozprawie nie podjęto próby wykorzystania w badaniach pielęgnacji za pomocą polimerów superabsorbujących. Czy taka forma pielęgnacji ma – zdaniem Autora – szansę powodzenia w technologii betonu do druk 3D?

4. Wniosek końcowy

Technologia druku 3D z wykorzystaniem mieszanek cementowych jest zagadnieniem, które od kilku lat pobudza wyobraźnię zarówno środowisk biznesu budowlanego jak i naukowców z zakresu technologii betonu. Przejście od druku z wykorzystaniem tworzyw sztucznych do drukowania przestrzennego z użyciem kompozytów mineralnych nie jest jednak tak proste, jak mogłoby się to wydawać i jak to kreują popularne media. Jednym z kluczowych problemów, z jakimi trzeba się zmierzyć w tym zakresie jest duży skurcz drukowanych elementów i jego poważne skutki w postaci odkształceń i zarysowań. W przypadku druku 3D brak możliwości wprowadzenia do elementu ewentualnego przeciwskurczowego zbrojenia ciągłego jest – jak na razie – problemem trudnym do przeskoczenia. Poszukiwanie wszelkich innych możliwości ograniczenia skurczu i jego skutków jest w tej sytuacji jednym z fundamentalnych wyzwań naukowo-badawczych w obszarze drukowania 3D betonem cementowym.

Pan mgr inż. Karol Federowicz podjął w swojej rozprawie zagadnienie trudne koncepcyjnie, słabo opisane w literaturze i niedookreślone w sferze metod badawczych. W mojej opinii z wszystkimi tymi niedogodnościami poradził sobie doskonale. Wynikiem rozprawy jest określenie najskuteczniejszego sposobu

ograniczania skurczu (zraszanie wodą), porównanie skuteczności tej metody z innymi sposobami oraz wykazanie, że klasyczny model obliczeniowy szacowania skurczu znacząco zaniża wartość skurczu względem rzeczywistego przebiegu zjawiska. Szereg innych dokonań mgr inż. Karola Federowicza, w tym uszczegółowienie opisów i zaproponowanie polskiego nazewnictwa specyficznych właściwości mieszanek do technologii druku 3D oraz opracowanie teoretyczne i praktyczne metod badania tych właściwości, sprawiają, że w moim odczuciu mamy do czynienia z rozprawą wybitną. Opracowanie to stanie się zapewne cennym materiałem źródłowym dla wszystkich kontynuatorów tematyki druku 3D w technologii betonu. Warto zauważyć, że sformułowanie przyszłych planów badawczych – często umieszczane w rozprawach nieco na siłę – ma w tym przypadku bardzo konkretny i wynikający z rozprawy zakres, co także podnosi ogólną ocenę przedsięwzięcia. Uwagi krytyczne, które sformułowałem w recenzji mają charakter dyskusji naukowej, być może pomogą Autorowi w dalszych badaniach, ale na pewno nie obniżają bardzo wysokiej oceny merytorycznej zawartości rozprawy.

Jak wykazano w recenzji, rozprawa doktorska p. mgra inż. Karola Federowicza spełnia wymagania Ustawy w zakresie oryginalnego rozwiązania problemu naukowego, wykazania ogólnej wiedzy teoretycznej Kandydata w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport (w szczególności w subdyscyplinie inżynieria materiałów budowlanych) oraz wykazania umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata. W związku z tym, w oparciu o art. 187 Ustawy, **pozytywnie opiniuję przedłożoną rozprawę doktorską i wnoszę o dopuszczenie p. mgra inż. Karola Federowicza do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.**

Ponadto, w oparciu o argumenty podane w poprzednich akapitach rozdziału 4 recenzji **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.**

UCHWAŁA NR 7

**Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
z dnia 18 października 2023 r.**

w sprawie nadania mgr. inż. Karolowi Federowiczowi stopnia doktora

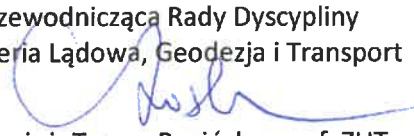
Na podstawie § 17b ust. 1 pkt 2 Statutu ZUT (uchwała nr 75 Senatu ZUT z dnia 28 czerwca 2019 r., z późn. zm.) w związku z art. 179 ust. 1 i 3 pkt 2b ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669, z późn. zm.) w związku z art. 14 ust. 2 pkt 5 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jedn. Dz. U. z 2017 r. poz. 1789, z późn. zm.) oraz § 16 ust. 3 i 19 uchwały nr 130 Senatu ZUT z dnia 29 maja 2023 r. (z późn. zm.) w sprawie określenia sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora przez Rady Dyscyplin Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie uchwala się co następuje:

§ 1.

Rada Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport nadaje mgr. inż. Karolowi Federowiczowi stopień doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie *inżynieria lądowa, geodezja i transport*.

§ 2.

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodnicząca Rady Dyscypliny
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

dr hab. inż. Teresa Rucińska, prof. ZUT

UCHWAŁA NR 8
Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
z dnia 18 października 2023 r.

w sprawie wyróżnienia rozprawy doktorskiej dr. inż. Karola Federowicza

Na podstawie § 17b ust. 1 pkt 2 Statutu ZUT (uchwała nr 75 Senatu ZUT z dnia 28 czerwca 2019 r., z późn. zm.) w związku z art. 179 ust. 1 i 3 pkt 2b ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669, z późn. zm.) i z § 3 pkt 4 i § 21 rozporządzenia Prezesa Rady Ministrów oraz wzory wniosków o ich przyznanie (Dz. U. poz. 976, z późn. zm.) oraz § 14 uchwały nr 130 Senatu ZUT z dnia 29 maja 2023 r. (z późn. zm.) w sprawie określenia sposobu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora przez Rady Dyscyplin Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie uchwala się co następuje:

§ 1.

Rada Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport wyróżnia rozprawę doktorską dr. inż. Karola Federowicza, pt. „Wpływ pielęgnacji na odkształcenia skurczowe kompozytów cementowych wykorzystywanych w technologii druku 3D”.

§ 2.

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodnicząca Rady Dyscypliny
Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

dr hab. inż. Teresa Rucińska, prof. ZUT