



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 efektywnie 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 mieszanki”. 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 superabsorbencyjnych. 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 przeskokowania. 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.**