

Warszawa, dnia 13.11.2020 r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz  
Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
Armii Ludowej 16  
00-637 Warszawa

**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej pt.**  
**„OCENA WŁAŚCIWOŚCI KOMPOZYTU NA SPOIWIE CEMENTOWYM DO DRUKU 3D”**  
**autorstwa mgr inż. Szymona Skibickiego**

**1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawę opracowania recenzji stanowi uchwała Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego z dnia 14 września 2020 r. oraz pismo zlecające prof. dr hab. inż. Jacka Przepiórskiego Prorektora ds. nauki tegoż Uniwersytetu z dnia 22 września 2020 r.

**2. Przedmiot recenzji**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr inż. Szymona Skibickiego pt. „Ocena właściwości kompozytu na spoiwie cementowym do druku 3D” przygotowana na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego. Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Maria Kaszyńska.

Rozprawa liczy 246 stron wydruku komputerowego, zawiera 146 rysunków i 41 tablic. Spis literatury zawiera 173 pozycje; przywołano 8 norm i 20 stron internetowych.

Recenzja rozprawy została opracowana zgodnie z Ustawą z dnia 3 lipca 2018 r. *Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. poz. 1669), Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. 2003, nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami) oraz Rozporządzeniem MNiSW 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).

**3. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Oceniana rozprawa doktorska dotyczy wykorzystania kompozytów cementowych w dynamicznie rozwijającej się technologii druku 3D. Treść rozprawy zawarto w 16 rozdziałach: Wprowadzenie (R1), Teza i cel pracy (R2), Druk 3D kompozytów na spoiwie cementowym (R3), Właściwości kompozytu na spoiwie cementowym do druku 3D (R4), Metoda dojrzałości (R5), Zakres badań (R6), Stanowiska badawcze przeznaczone drukowi 3D (R7), Badania wstępne (R8), Badania zasadnicze (R9), Wyniki badań (R10), Badania weryfikacyjne (R11), Analiza wyników badań (R12), Wyznaczenie funkcji opisujących zachowanie betonu (R13), Wnioski (R14), Program dalszych badań (R15), Bibliografia (R16). Zasadnicza część rozprawy odnosząca się do rozważań podjętych w rozprawie została ujęta w

pierwszych 15 rozdziałach. Rozdziały 6 – 14 prezentują badania własne Autora i analizę ich wyników.

Praca ma charakter doświadczalny i dotyczy technologii druku 3D obiektów z kompozytów cementowych. Zagadnienie to jest nadal słabo rozpoznane. Recenzowana praca zawierająca wyniki bardzo obszernego i interdyscyplinarnego programu eksperymentalnego i niewątpliwie stanowi znaczne poszerzenie wiedzy w obszarze kompozytów cementowych przeznaczonych do druku 3D.

#### **4. Ocena merytoryczna rozprawy**

##### **4.1. Ocena doboru tematu**

Praca mgr inż. Szymona Skibickiego wpisuje się w aktualne trendy rozwojowe inżynierii materiałów budowlanych i podejmuje jeden z najbardziej „gorących” tematów w tym obszarze. Do niedawna zagadnienia podjęte w rozprawie było przedmiotem badań prowadzonych przede wszystkim w jednostkach badawczych. W ostatnich latach notuje się gwałtownie rosnące zainteresowanie drukiem 3D obiektów budowlanych, zarówno w odniesieniu do rozwoju technologii druku w warunkach rzeczywistych, jak i w obszarze technologii kompozytów stosowanych do druku. W tym ostatnim obszarze największym zainteresowaniem cieszą się kompozyty z matrycą cementową. Notowany wzrost wynika przede wszystkim ze wzrastającego zainteresowania firm budowlanych tego rodzaju obiektami, a także zainteresowania znaczących producentów wyrobów szeroko rozumianej chemii budowlanej, np. Sika, HeidelbergCement, LafargeHolcim. W newsletterze Concrete SmartBrief, przygotowywanym przez ACI, nie ma praktycznie miesiąca bez doniesień o nowych osiągnięciach w technologii druku 3D. Poniżej tylko dwa przykłady z ostatniego miesiąca:

- *LafargeHolcim extends university partnerships In its continuing efforts to offer low-carbon products and solutions and reach net zero emissions, LafargeHolcim has partnered with Southeast University in Nanjing, China, to sponsor research into concrete and mortars for on-site construction 3-D printing.*
- *3D-printed concrete house going up in Germany. Peri is using a BOD2 gantry system and materials from HeidelbergCement to construct Germany's first "market-ready," 3D-printed concrete residential building.*

Jednym z wyzwań stojących przed technologią 3D w budownictwie jest opracowanie rozwiązań materiałowo-technologicznych kompozytów cementowych spełniających wymagania technologii druku. Z tego względu nie ma żadnej wątpliwości co do zasadności doboru tematu rozprawy doktorskiej. Po lekturze rozprawy daje się zauważyć u Autora rozprawy duże zainteresowanie, a może nawet fascynację, podjętą tematyką. Należy więc wyróżnić Autora za podjęcie się realizacji rozprawy w stosunkowo słabo rozpoznanym obszarze inżynierii materiałów budowlanych. Tu należą się również gratulacje dla interdyscyplinarnego zespołu z ZUT, który wykazał się odwagą badawczą i podjął wyzwanie opracowania własnej technologii druku 3D, dzięki czemu stał się wiodącym ośrodkiem w kraju w obszarze druku 3D z wykorzystaniem kompozytów cementowych.

##### **4.1. Teza i cele pracy**

W rozdziale 1 *Wprowadzenie* zawarto krótkie omówienie problematyki badawczej podjętej w rozprawie. Na podstawie przeglądu literatury Autor stwierdził, że wybór druku 3D z wykorzystaniem kompozytów cementowych jest nadal mało rozpoznany, odczuwalny jest

brak ogólnie przyjętych znormalizowanych metod badawczych, a także równań wspomagających optymalizację druku oraz umożliwiających przewidywanie właściwości wytrzymałościowych drukowanego kompozytu. Z tymi stwierdzeniami można się tylko zgodzić. Osiągnięcia technologii betonu nie są wprost do przeniesienia do bardziej wymagającej technologii druku 3D. Na tej podstawie w rozdziale 2 Doktorant sformułował tezę pracy:

*Skład mieszanki betonowej, właściwości stwardniałego kompozytu oraz optymalne parametry druku 3D można ustalić na podstawie badań symulacyjnych wydruk oraz przy zastosowaniu metody dojrzałości możliwe jest oszacowanie czasu obciążenia wydrukowanej konstrukcji.*

Sformułowanie jawnej tezy nie jest powszechne w obecnie realizowanych pracach doktorskich i zasługuje na wyróżnienie, jednakże ani w tekście poprzedzającym tezę, ani we wprowadzeniu nie zdefiniowano klarownie co nazywamy badaniami symulującymi wydruk oraz czasem obciążenia konstrukcji. Sprawia to, że teza nie jest do końca zrozumiała. Dopiero dalsza lektura pracy wyjaśnia ideę w niej zawartą.

Aby udowodnić postawioną tezę Autor sformułował cztery cele pracy:

- ustalenie składu i właściwości mieszanek kompozytów istotnych z punktu widzenia przewidywanej technologii druku 3D tj. szybkości wytłaczania mieszanki, czasu obciążania kolejnymi warstwami,
- analizę wyników badań reologicznych i mechanicznych wybranych kompozytów cementowych, z uwzględnieniem wpływu na środowisko,
- zaproponowanie funkcji opisujących wytrzymałość mieszanki,
- zaproponowanie funkcji lub skalibrowanie istniejących funkcji pozwalających na przewidywanie narastania wytrzymałości kompozytu w czasie z uwzględnieniem zmiennych warunków termicznych.

Wyżej sformułowane cele świadczą, że Autor postawił przed sobą bardzo ambitne cele, które mogłyby być przedmiotem co najmniej dwóch prac doktorskich. Powyższe cele świadczą również o tym, że zainteresowania Autora koncentrowały się raczej na stronie aplikacyjnej kompozytów cementowych stosowanych do druku 3D. Na tej podstawie można stwierdzić, że tytuł rozprawy odpowiada jej treści.

#### **4.2. Ocena strony naukowej rozprawy**

Wprowadzeniem do druku 3D z wykorzystaniem kompozytów cementowych jest rozdział 3, który zawiera krótką charakterystykę podstawowych technologii druku 3D oraz przykłady ich praktycznych zastosowań.

W rozdziale 4 omówiono właściwości kompozytów cementowych przeznaczonych do druku 3D wraz metodami badań. Dotyczą one już powszechnie stosowanych podstawowych właściwości mieszanek kompozytów cementowych do druku 3D: pompowność (pkt. 4.2), wytłaczalność, drukowalność i jakość druku (pkt.4.3), urabialność (pkt.4.4.), buildability (pkt.4.5), czas urabialności (pkt.4.6). Punkt 4.7 w tym rozdziale omawia charakterystykę wybranych mieszanek kompozytów cementowych stosowanych do druku 3D. Na tej podstawie Autor zaproponował składy kompozytów które były przedmiotem jego dalszych badań eksperymentalnych. Rozdział kończy się omówieniem podstawowych problemów związanych z doбором kompozytów cementowych do druku 3D. Na podkreślenie zasługuje opracowanie tego rozdziału w oparciu o obszerny przegląd literatury.

W osobnym rozdziale 5 pt. Metoda dojrzałości, Autor skupił się na omówieniu metody maturity method, znanej także pod nazwą metody dojrzałości, stosowanej do monitorowania narastania wytrzymałości betonu. Ujęcie tej metody w osobnym rozdziale jest uzasadnione tym, że ta właśnie metoda została wskazana w tezie pracy jako metoda wspomagająca ustalanie składu mieszanek kompozytów oraz przewidywanie ich właściwości mechanicznych. Na podstawie przeglądu literatury Autor, przy redakcji treści tego rozdziału, skupił się przede wszystkim na uwarunkowaniach i ograniczeniach tej metody z punktu widzenia możliwości jej wykorzystania do monitorowania narastania wytrzymałości kompozytów cementowych do druku 3D. W podsumowaniu Autor podkreślił, że metoda dojrzałości będzie wymagała kalibrowania, a nawet zmian równań stosowanych dla betonów tradycyjnych. Już we Wprowadzeniu pada stwierdzenie, że wyznaczenie funkcji jest *ciężko nierozwiązanym problemem inżynierskim* i wydaje się, że ze względu na bogactwo rozwiązań materiałowo-technologicznych w obszarze kompozytów z matrycą cementową takim pozostanie. Co więcej, maturity method zaliczana jest do metod nieniszczących i często wspominany w tym rozdziale N.Carino w swoich monografiach poświęconych metodom nieniszczącym zawsze podkreślał, że taka kalibracja jest również konieczna nawet w obrębie betonów tradycyjnych. Natomiast należy docenić chęć Autora zmierzenia się z tym problemem w odniesieniu do kompozytów cementowych przeznaczonych do druku 3D. Moim zdaniem korzystne byłoby opracowanie wspomnianej funkcji dla kompozytów cementowych przeznaczonych do druku 3D, która traktowana byłaby jako funkcja referencyjna („master curve”) i do niej kalibrowane byłyby inne mieszanki tego rodzaju kompozytów. To oczywiście wymagałoby innej koncepcji badań eksperymentalnych.

W Rozdziale 6 krótko omówiono program badań przeprowadzonych w ramach rozprawy. Zostały one podzielone na trzy zasadnicze etapy: badania wstępne, badania zasadnicze i badania weryfikacyjne. Badaniom wstępnym poddano 24 mieszanki o założonych właściwościach reologicznych. Na ich podstawie wybrano 8 mieszanek do dalszych badań nazwanych zasadniczymi. W ramach tego etapu wyznaczono właściwości reologiczne, mechaniczne i inne fizyczne badanych mieszanek kompozytów cementowych. Na podstawie tych wyników wybrano 3 mieszanki wykorzystane do kontrolowanego wydruku 3D kilku elementów w ramach badań nazwanych weryfikacyjnymi.

Moim zdaniem taki podział badań jest trochę sztuczny w odniesieniu do kompozytów cementowych przeznaczonych do druku 3D. Do tego rodzaju kompozytów badania zasadnicze powinna obejmować zarówno „tradycyjne” badania stosowane dla mieszanek oraz te które służą potwierdzeniu ich przydatności do druku. Odnajdując w treści rozdział zatytułowany Badania weryfikacyjne spodziewałem się raczej badań potwierdzających postawioną tezę. Co więcej, dopiero na podstawie wyników badań zasadniczych i weryfikacyjnych Autor sformułował zależności pozwalające na:

- obliczenie dopuszczalnego naprężenia w mieszance w czasie wydruku,
- wyznaczenie maksymalnej dopuszczalnej prędkości wydruku przy której nie dojdzie do zbyt dużych deformacji lub zniszczenia konstrukcji,
- monitorowanie narastania wytrzymałości betonu ściskanie.

W rozprawie nie zawarto przykładu potwierdzającego/weryfikującego zasadność opracowanej przez Autora funkcji dojrzałości.

W rozdziale 7 opisano stanowiska badawcze wykorzystane podczas druku 3D. W badaniach wykorzystano robot kartezyjski opracowany na ZUT oraz stanowisko symulujące druk, które zostało opracowane i skonstruowane przy udziale Autora. W pkt.7.2 opisano dokładnie na czym polega pomiar i jak opracowywane były wyniki badań symulacyjnych

wydruk. Próbkę mieszanki są formowane w specjalnej formie a następnie zagęszczane. Autor stwierdził, że zagęszczanie symuluje realny wydruk, bo „mieszanka ulega wibracjom podczas jej podawania”. To stwierdzenie jest dyskusyjne. Korzystne byłoby potwierdzenie istotnego braku wpływu zagęszczania na mikrostrukturę kompozytu poddanemu testowi i próbki pobranej z wydrukowanego elementu.

Rozdział 8 prezentuje wyniki badań wstępnych. Badaniom wstępnym poddano 24 mieszanki o założonych właściwościach reologicznych – rozptyw między 126 a 160 mm. W ramach tego etapu wyznaczono właściwości reologiczne, mechaniczne i inne fizyczne badanych mieszanek kompozytów cementowych. Badania tych mieszanek kompozytów były poprzedzone testem ścieżki dla dwóch mieszanek. Służyły one głównie do ustalenia parametrów wyjściowych do badań symulujących druk. Autor nie wyjaśnił jaka jest relacja między mieszankami stosowanymi do druku testowego, a następnie do analizy 24 mieszanek podzielonych w 3 grupy. Mieszanki grupy I zaproponowano na podstawie badań zespołów brytyjskich – dlaczego? Mieszanki grupy II i III były mieszankami autorskimi zaproponowanymi po krytycznej analizie składów grupy I. Autor nie podał na czym polegała ta krytyczna analiza. W ramach tego etapu dla 2 wybranych mieszanek przeprowadzono wydruki testowe stożków ściętych oraz ścian. Na podkreślenie zasługuje zastosowanie automatycznej analizy obrazu do oceny jakości drukowanych ścian z wykorzystaniem autorskiego programu napisanego w środowisku Python, co należy uznać za jedno z osiągnięć Doktoranta. Istotnym wnioskiem z przeprowadzonych badań było ustalenie, że mieszanki do druku powinny charakteryzować się rozptywem w zakresie 155 – 165 mm.

Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych mieszanek oraz analiz kosztu surowców wybrano 8 mieszanek kompozytów do dalszych badań nazwanych zasadniczymi. Zakres badań i stosowane metody badawcze omówiono w rozdziale 9 a wyniki tych badań w rozdziale 10. Wszystkie badania wykonano dla 8 mieszanek a jedynie w wypadku modułu Younga dla 3 mieszanek. Fakt ten nie został skomentowany.

W rozdziale 11 scharakteryzowano przeprowadzone badania weryfikacyjne. Obejmowały one: test jakości ścieżki według autorskiej koncepcji (zmiana kształtu ścieżki), wyznaczenie naprężenia granicznego podczas wydruku oraz określono wytrzymałość na ściskanie wydrukowanej kolumny. Do badań doktorant wybrał 3 mieszanki o różnej wytrzymałości i zróżnicowane pod względem składu materiałowego. Pewien niedosyt budzi fakt nie wykorzystania opracowanego przez Autora programu do analizy obrazu na tym etapie badań.

Rozdział 12 zawiera analizę wyników badań omówionych w rozdziale 11. Na jej podstawie Autor stwierdza, że istotnym parametrem charakteryzującym mieszanki kompozytów przydatnych do druku jest naprężenie  $\sigma_{0,04}$  lub sztywność  $k_{0,04}$  obliczone przy odkształceniu  $\varepsilon=0,04$ . Badane mieszanki zostały podzielone na 3 grupy ze względu na wytrzymałość mieszanki. Następnie Autor przeprowadził analizę wpływu składu mieszanki. Sformułowane wnioski odnoszą się do badanych mieszanek i ze względu na małą liczbę wariantów składu tych mieszanek wnioski nie powinny być uogólnione. W prowadzonej analizie składu Autor zdecydował się raczej na fenomenologiczną analizę wpływu składu na właściwości badanych mieszanek do druku 3D. Stosowanie w tej analizie kryterium mniejszej lub większej zawartości spoiwa jest pewnego rodzaju uproszczeniem. Pozwalają one na wybór najlepszych kompozytów spośród badanych mieszanek z uwzględnieniem oceny oddziaływań ekologicznych i oceny kosztów. Głębsza analiza składu mogłaby być przydatna do wyjaśnienia zagadnień związanych z wyznaczeniem funkcji dojrzewania czemu poświęcony jest rozdział 13. Badane mieszanki zawierały reaktywne dodatki mineralne,

które mogą wpływać na charakterystykę parametrów kompozytu we wczesnym etapie wiązania i mieć wpływ na właściwości mieszanki istotne z punktu widzenia procesu drukowania. W swoich badaniach Autor wykazał korzystny wpływ mączki wapiennej na właściwości kompozytów cementowych przeznaczonych do druku 3D mimo zwiększonego całkowitego skurczu swobodnego.

W rozdziale 13 Autor na podstawie uzyskanych wyników badań zasadniczych i weryfikacyjnych, pogłębionej analizy porównawczej z innymi modelami, w tym normy ASTM C1074 zaproponował autorską modyfikację funkcji dojrzewania dla kompozytów cementowych przeznaczonych do druku 3D. Jest to niewątpliwie jedno z ważnych osiągnięć recenzowanej pracy mimo pewnego ograniczonego jest zastosowania. Na podkreślenie zasługuje to, że Autor jest świadomy tych ograniczeń, co zawarł w pkt. 13.4, rozdziału 13. Świadczy to o dojrzałości badawczej Autora pracy.

W rozdziale 14. Autor sformułował wnioski z przeprowadzonych badań, które są istotne z punktu widzenia technologii druku 3D z wykorzystaniem badanych kompozytów cementowych i niewątpliwie zostaną wykorzystane w dalszych badaniach Autora. Kierunki tych badań Autor zawarł w rozdziale 15. Sformułowane kierunki badań są zrozumiałe i są naturalną konsekwencją przeprowadzonego programu eksperymentalnego, ale warto zastanowić się nad rozwiązaniami materiałowymi kompozytów cementowych do druku 3D. W pracy nie poświęcono zbyt wiele uwagi domieszkom do mieszanki, a to właśnie w tym obszarze można też dopatrywać się rozwoju technologii druku 3D, o czym zresztą Autor wspomniał w trzecim zdaniu Wprowadzenia.

### **4.3. Ocena strony edytorskiej pracy**

Układ pracy zasadniczo nie budzi zastrzeżeń i jest typowy dla tego rodzaju opracowań naukowych. Moim zdaniem rozdział 6 i 7 mógłby być połączony w jeden rozdział. Tytuł rozdziału 10 powinien być bardziej precyzyjny, tzn. „Wyniki badań zasadniczych” albo zostać włączony do rozdziału 9. Nie jest jasne dlaczego wyniki tego etapu zostały ujęte osobno. Zwłaszcza, że proponowane ujęcie zastosowano w odniesieniu do badań weryfikacyjnych.

Praca została staranie przygotowana pod względem edytorskim oraz zwartym ujęciem przekazywanych treści. Autor starał się koncentrować na podaniu informacji istotnych z punktu widzenia realizowanego programu badawczego, w tym autorskich opracowań stanowisk badawczych, programów komputerowych, modeli oraz wyników badań i analiz statystycznych. Na wyróżnienie zasługuje umieszczanie w każdym rozdziale punktu podsumowujące rozważania w nim podjęte.

W pracy można znaleźć pewne imperfekcje edytorskie dotyczące użytych sformułowań, czy też edycji rysunków i tablic, np.:

- Autor nie wykazał konsekwencji w podpisach rysunków. W wypadku wielu rysunków występuje brak pełnych opisów pod rysunkami, tj. brak informacji co zostało pokazane na rysunkach w części a) i b), np. rys. 8-10. Powoduje to, że rysunki często są niezrozumiałe, np. rys. 22. Czasami można odnaleźć opisy w tekście, ale w takim przypadku korzystniejsze byłoby umieszczenie tekstu przed rysunkiem,
- Autor często odwołuje się do informacji występujących w treści dalszych rozdziałów, a są one istotne dla zrozumienia treści prezentowanych w danym fragmencie tekstu, np. na str. 119 przedstawiono kryteria oceny mieszanek; jednym z nich była cena surowców. Niezrozumiałe jest umieszczenie tab.33 z cenami surowców w rozdziale. 12.7, kiedy zostały już wykorzystane w tabl. 4,

- na stronie tytułowej widnieje uprzednia nazwa wydziału tj. Wydział Budownictwa i Architektury, umowa o recenzję zawarta z Wydziałem Budownictwa i Inżynierii Środowiska; czy to jest wymóg formalny?,
- w niektórych fragmentach występują skróty myślowe i nieprecyzyjne sformułowania, np. „klasyczna postać metody dojrzałości jest niewystarczająca...” (str.14), „w paście cementowej...” (str.49), „Zaprojektowana struktura nie powinna być podatna na wpływ stateczności...” (str.157),

Podsumowując chciałbym jednak podkreślić, że ogólnie rozprawa jest starannie przygotowana pod względem edytorskim.

#### 4.4. Podsumowanie

Zgodnie z Ustawą przedmiotem rozprawy doktorskiej jest *oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne*. Recenzowana rozprawa jednoznacznie potwierdza, że spełnione są warunki ustawowe. Praca wyróżnia się obszernością programu eksperymentalnego, umożliwiającego badanie parametrów istotnych do skutecznego wykorzystania kompozytów cementowych do druku 3D z wykorzystaniem zaprojektowanych i opracowanych przy współudziale Autora rozprawy stanowisk badawczych i narzędzi badawczych (programy komputerowe). Wymagało to znajomości zagadnień związanych z technologią druku 3D, zdolności do wyboru i właściwej realizacji eksperymentu, w tym znajomości technik informatycznych umożliwiających strefowaniem drukiem 3D, jak również zapisu cyfrowego defektów powstających podczas druku obiektów budowlanych. Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowanie stanowiska do symulacji wydruku 3D kompozytów cementowych i jego twórczego wykorzystania do rozwiązania postawionych w pracy zadań badawczych.

Do najważniejszych osiągnięć Autora zaliczam:

- poszerzenie bazy wiedzy w zakresie kompozytów cementowych przeznaczonych do druku 3D na podstawie własnych oryginalnych badań przydatności kompozytów cementowych,
- współudział w zaprojektowaniu, wykonanie i skalibrowaniu stanowiska do symulacji wydruku 3D oraz i jego twórczego wykorzystania do rozwiązania postawionych w pracy zadań badawczych,
- wykorzystanie stanowiska do symulacji druku do przeprowadzenia badań potwierdzających jego przydatności do wyznaczania funkcji dwóch zmiennych (czas badania i interwał czasowy) pozwalających na określenie maksymalnej prędkości wydruku zapewniającej nie przekraczanie maksymalnego dopuszczalnego poziomu naprężeń w drukowanym obiekcie - ma to duży walor praktyczny,
- opracowanie autorskiego modelu dojrzewania pozwalającego na oszacowanie wytrzymałość betonu w zmiennych warunkach termicznych,
- opracowanie autorskiego programu do analizy obrazu defektów drukowanych ścian modelowych pozwalających na automatyczną kontrolę ich jakości.

Powyższa charakterystyka rozprawy wskazuje jednoznacznie, że Autor spełnia wymagania stawiane przed samodzielnymi badaczami, którymi ma charakteryzować się osoba ze stopniem doktora nauk inżynieryjno-technicznych.

Zawarte w poprzednich punktach uwagi krytyczne, mają charakter raczej uwag dyskusyjnych wobec stanu rozpoznania zagadnienia i w żaden sposób nie obniżają wartości

pracy stanowiącej oryginalne osiągnięcia Autora, która niewątpliwie wiele wnosi do poszerzenia wiedzy w obszarze dynamicznie rozwijającej się technologii druku 3D obiektów budowlanych z wykorzystaniem kompozytów cementowych.

## **5. WNIOSEK KOŃCOWY**

Recenzowaną rozprawę doktorską Pana mgr inż. Szymona Skibickiego pt. „Ocena właściwości kompozytu na spoiwie cementowym do druku 3D” oceniam bardzo wysoko i uważam ją za ważne osiągnięcie naukowo-badawcze. Autor sformułował oryginalny problem naukowy, który ma istotne znaczenie dla praktycznego wykorzystania kompozytów cementowych jako materiału konstrukcyjnego w obiektach budowlanych wznoszonych technologią 3D. Wyniki badań Autora przedstawione w rozprawie stanowią istotny wkład w poszerzenie wiedzy w obszarze technologii druku 3D z wykorzystaniem kompozytów cementowych. Pozwala to na stwierdzenie, że postawiony w pracy cel został osiągnięty, a postawiona teza udowodniona. Mgr inż. Szymon Skibicki wykazał się twórczym podejściem do rozwiązywania postawionych zadań badawczych, umiejętnością prowadzenia badań, w tym z wykorzystaniem zaprojektowanych i wykonanych przy Jego udziale stanowisk badawczych, oraz umiejętnością formułowania wniosków. Na tej podstawie, stwierdzam, że zostały spełnione wymagania Ustawy z dn. 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym (wraz z późniejszymi zmianami). Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Szymona Skibickiego do publicznej obrony jego rozprawy doktorskiej oraz jej wyróżnienie.

