

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Golewski  
Politechnika Lubelska  
Wydział Budownictwa i Architektury  
ul. Nadbystrzycka 40  
20-618 Lublin

Lublin, dnia 2024.01.05.

## RECENZJA

### Rozprawy doktorskiej mgra inż. Mateusza Jackowskiego

nt.: „Kompozyt cementowy z częściowym wykorzystaniem naturalnych substytutów i materiałów odpadowych”

#### 1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję opracowano na prośbę Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria lądowa, Geodezja i Transport” Wojskowej Akademii Technicznej płk prof. dr hab. inż. Michała Kędzierskiego – pismo z dnia 16 listopada 2023 r.

Recenzowana rozprawa doktorska, napisana pod kierunkiem dr hab. inż. Zbigniewa Szcześniaka, prof. uczelni, została wykonana na Wydziale Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej. Promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim był dr inż. Marcin Małek, pracujący również w Wojskowej Akademii Technicznej.

#### 2. Ogólna formalna ocena pracy

Dorobek naukowy mgra inż. Mateusza Jackowskiego, zgodnie z tym co dopuszcza ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce, został przedstawiony do oceny w postaci dysertacji stanowiącej spójny zbiór opublikowanych artykułów, co muszę przyznać jest pewnym wyzwaniem dla recenzenta, zwłaszcza, że żadna z publikacji nie jest publikacją samodzielną. Jednak Autor rozprawy przedstawił odpowiednie dokumenty poświadczające jego znaczący udział w przygotowanie każdego z przedłożonych manuskryptów. Wg oświadczeń Doktoranta i pozostałych współautorów każdego z artykułów, stanowiących dorobek naukowy przedstawiony do oceny, udział Kandydata w każdym przypadku wynosi co najmniej 50%. Można zatem uznać że wkład Doktoranta w przygotowanie publikacji zgłoszonych do oceny był znaczący. **Stwierdza się zatem, że z formalnego punktu widzenia rozprawa spełnia wymagania ustawowe. Może być zatem poddana krytycznej ocenie merytorycznej.**

#### 3. Aktualność podjętego tematu

Bardzo szybkie tempo przyrostu ludności świata wpływa katalizująco na rozwój budownictwa, głównie betonowego. To z kolei implikuje sukcesywny przyrost produkcji cementu portlandzkiego, który jest podstawowym spoiwem służącym do wytwarzania kompozytów betonowych. Zwiększające się zapotrzebowanie na materiał służący do wykonywania konstrukcji betonowych ma jednak wymierny wpływ

na środowisko naturalne. Należy bowiem zwrócić uwagę, że w ujęciu holistycznym pełny proces wytwarzania cementu jest niestety w znacznym stopniu nieekologiczny. Negatywne skutki wytwarzania podstawowego spoiwa mineralnego związane są m.in. z: koniecznością zużywania surowców naturalnych takich jak wapień, glina i margle potrzebnych do przygotowania mieszaniny do wypalenia klinkieru portlandzkiego, znaczącym zużyciem energii cieplnej i elektrycznej potrzebnych do przeprowadzenia procesu wytworzenia cementu, zwiększoną emisją gazów cieplarnianych do atmosfery powstających w trakcie wypalania ziaren klinkieru portlandzkiego. Szczególnie negatywnie na środowisko naturalne wpływa zwiększona emisja gazów cieplarnianych, głównie CO<sub>2</sub>. Ma to odzwierciedlenie m.in. we wzroście średniej temperatury atmosfery na Ziemi oraz występowaniu coraz częściej anomalii klimatycznych w przyrodzie.

Z drugiej strony należy podkreślić, że w ostatnich latach zwiększyła się świadomość pilnego działania nad zahamowaniem szybko postępującej degradacji środowiska naturalnego. Podejmowane są liczne inicjatywy przez poszczególne państwa i różne organizacje. W wielu krajach powstały również aktywnie działające ruchy ekologiczne. W zamierzeniach istotą tych działań ma być zachowanie wyważonych wzajemnych relacji między społeczeństwem, gospodarką oraz zasobami środowiska naturalnego. Obecnie, jednym z głównym kierunków ekologicznych w zakresie budownictwa jest wdrażanie koncepcji zrównoważonego rozwoju. W założeniach polega ona na realizacji potrzeb obecnego pokolenia bez zmniejszania szans przyszłych pokoleń. W praktyce budownictwo spełniające wymagania zrównoważonego rozwoju charakteryzuje się tym, że na wszystkich etapach, a więc począwszy od projektu i wnieśienia obiektu, a następnie podczas jego eksploatacji, remontów i rozbioru dąży się do minimalizacji zużycia energii i zasobów naturalnych.

Jednym z takich rozwiązań jest zastępowanie w składzie mieszanki betonowej części nieekologicznego cementu portlandzkiego innymi materiałami mineralnymi. Materiały takie, które w większości przypadków są odpadami pochodzącymi z różnych procesów przemysłowych lub rolniczych określane są jako substytuty spoiwa cementowego. Należy zwrócić uwagę że korzyści wynikające z takich rozwiązań w zakresie inżynierii materiałowej są wielokryterialne. Materiały wytwarzane w taki sposób są bowiem: ekologiczne ponieważ wpływają zarówno na zmniejszenie zużycia cementu jak i na ograniczenie składowisk odpadów (często szkodliwych zarówno dla ludzi jak i środowiska naturalnego), ekonomiczne gdyż pozwalają na ograniczenie kosztów związanych z procesem wytwarzania cementu, użyteczne i wartościowe ponieważ często charakteryzują się właściwościami korzystniejszymi w stosunku do parametrów które posiadają betony wykonane jedynie na czystym cemencie portlandzkim.

Dlatego, biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, że zastosowanie zarówno materiałów naturalnych jak i odpadowych jako zamienników cementu w technologii betonu nie budzi wątpliwości. Co więcej, można wręcz stwierdzić że taka modyfikacja materiałowa kompozytów cementowych jest ze wszech miar pożądana.

Na przeciw tym rozwiązaniom wychodzą badania przedstawione w recenzowanej rozprawie doktorskiej mgr inż. M. Jackowskiego. Kompozyty o zmodyfikowanym składzie spoiwa – zawierające zarówno naturalne substytuty cementu w postaci zeolitu, metakaolinitu i mikrometakaolinitu jak i materiały odpadowe w postaci włókien pochodzących z recyklingu – opracowane przez Doktoranta wpisują się niwątpliwie w koncepcję zrównoważonego rozwoju i dążenie do wytwarzania użytecznych materiałów budowlanych o obiegu zamkniętym. **Dlatego, z punktu widzenia zarówno: naukowego, inżynierskiego, środowiskowego jak i ekonomicznego temat podjęty w rozprawie przez Kandydata uważam za ważny, aktualny, innowacyjny i rozwojowy.**

#### 4. Zakres opiniowanej pracy

Opiniowana rozprawa, będąca wynikiem realizacji przez doktoranta 5 etapów badawczych, napisana jest w języku polskim i objęta jest jednym woluminem. Pod względem stylistycznym praca napisana jest poprawnie, zwięzłym językiem z nielicznymi usterkami stylistycznymi i literowymi. Pod względem edytorskim jest również bez większych zastrzeżeń.

Praca zawiera 13 rozdziałów przedstawionych na 66 stronach tekstu obejmujących:

1. Wykaz publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej.
2. Cel pracy i program badań.
3. Uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej.
4. Badania eksperymentalne dodatków.
5. Opis projektowania składu mieszanki.
6. Modyfikacja kompozytów cementowych.
  - 6.1. Zastosowanie naturalnych substytutów.
  - 6.2. Zastosowanie materiałów odpadowych.
7. Opracowanie finalnego kompozytu.
8. Podsumowanie i wnioski.
9. Oryginalne elementy pracy.
10. Kierunki dalszych badań.
11. Bibliografia.
12. Wykaz rysunków i tabel.
13. Załączniki.

Dodatkowo, na początku rozprawy zamieszczono jej streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń stosowanych w dysertacji. Wydruki artykułów stanowiących podstawę do przygotowania rozprawy doktorskiej, wraz z oświadczeniami współautorów o ich procentowym udziale w danej publikacji, zestawiono natomiast jej końcu.

Załączniki rozprawy obejmują 4 artykuły stanowiące spójny zbiór, dotyczący tematu niniejszej pracy, tj.:” **Kompozyt cementowy z częściowym wykorzystaniem naturalnych substytutów i materiałów odpadowych**”. Cykl ten zawiera prace opublikowane w latach 2020-2023 w czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Prace są wieloautorskie, w których Doktorant jest trzykrotnie drugim a raz pierwszym autorem. W każdym przypadku został określony procentowy udział Autora w powstanie danego artykułu. W trzech przypadkach jest on równy co najmniej 50%, natomiast w przypadku publikacji P4 – przygotowanej z promotorem pomocniczym rozprawy dr M. Małkiem – wkład własny Doktoranta to aż 90%. Co ciekawe i raczej nietypowe w żadnej z przedłożonych do recenzji publikacji współautorem nie jest promotor główny Doktoranta.

Wszystkie oceniane artykuły zawarte w cyklu publikacyjnym lokowane są w czasopismach wyróżnionych w Journal Citation Reports (JCR), w tym 3 w journalu „Materials” a jedno w „Case Studies in Construction Materials”. Według aktualnie obowiązującej oceny parametrycznej MEiN publikacje stanowiące podstawę rozprawy doktorskiej mają łącznie 520 punktów, z czego udział Doktoranta to 307 punktów. IF czasopism, w których zostały opublikowane

recenzowane artykuły wynosi 3,4 w przypadku Materials i 6,2 dla Case Studies in Construction Materials. Wysoka punktacja oraz wskaźniki IF świadczą niewątpliwie o dużej wartości opublikowanych prac.

W skład rozprawy wchodzi następujące artykuły:

[P1] Characteristics of recycled polypropylene, fibers as an addition to concrete fabrication based on Portland cement, Małek M. (10%), **Jackowski M. (50%)**, Łasica W. (10%), Kadela M (30%), Materials, 13, (2020), 1827.

[P2] Mechanical and material properties of mortar reinforced with glass fiber: An experimental study, Małek M. (15%), **Jackowski M. (50%)**, Łasica W. (10%), Kadela M. (20%), Wachowski M. (5%), Materials, 14, (2021), 698.

[P3] Influence of polypropylene, glass and steel fiber on the thermal properties of concrete, Małek M. (15%), **Jackowski M. (55%)**, Łasica W. (15%), Kadela M. (15%), Materials, 14, (2021), 1888.

[P4] A multi-site study of a new cement composite brick with partial cement substitutes and waste materials, **Jackowski M. (90%)**, Małek M. (10%), Case Studies in Construction Materials, 18, (2023), e01992.

Ponieważ prace zamieszczone w rozprawie doktorskiej zostały wcześniej opublikowane w uznanych czasopismach naukowych, co oznacza, że przed ich opublikowaniem zostały poddane recenzji przez uznanych specjalistów z danej dziedziny, jak również ocenie komitetów redakcyjnych czasopism, swoją opinię skoncentruję na syntezie prac jakiej dokonał Autor rozprawy.

## 5. Ocena merytoryczna rozprawy

Doktorant jako główny cel swojej pracy doktorskiej wskazał zaprojektowanie kompozytu cementowego zawierającego w swoim składzie zarówno naturalne substytuty spoiwa cementowego jak i materiały odpadowe. W założeniu skład nowego ekologicznego materiału kompozytowego miał być tak dobrany aby osiągnąć znaczący wzrost jego parametrów wytrzymałościowych. W celu realizacji założonego celu Kandydat uwzględnił 5 etapów badawczych, co pomogło w sformułowaniu tezy rozprawy doktorskiej iż: **„możliwe jest zaprojektowanie kompozytu cementowego z substytutami cementu i materiałem odpadowym o podwyższonej wytrzymałości”**.

Oceniając założony cel pracy oraz dedykowane do jego realizacji metody diagnostyczne należy uznać, że tematyka rozprawy jest istotna i aktualna, ma zarówno znaczenie poznawcze, jak i odniesienie do praktyki inżynierskiej. Betony z materiałami odpadowymi stanowią bowiem obecnie jedną z najnowocześniejszych i najszybciej rozwijających się grup tworzyw cementowych zaliczanych do betonów specjalnych o wysokich parametrach wytrzymałościowych. Dodatkowo, co jest bardzo ważne, materiały te wpisują się w ze wszech miar pożądaną w obecnym czasie działania proekologiczną i szeroko rozumianą strategię zrównoważonego rozwoju. Materiały takie są wynikiem wieloletniego i sukcesywnego procesu redukcji negatywnych właściwości jakimi charakteryzują się tradycyjne betony cementowe poprzez stosowanie różnego rodzaju ekologicznych materiałów odpadowych, oraz korzystanie z najnowszych możliwości inżynierii materiałów budowlanych. Należy zatem stwierdzić, że problem naukowy podjęty w rozprawie jest wartościowy z punktu widzenia zarówno naukowego jak i aplikacyjnego. Tematyka ta jest również zdecydowanie prorozwojowa.

Oceniając merytoryczną stronę rozprawy stwierdza się, że Autor dokonał oceny aktualnego stanu wiedzy w przedmiocie oraz wykonał serię badań eksperymentalnych podzieloną na 5 odrębnych etapów. Następnie przeprowadził analizę statystyczną uzyskanych wyników badań. Zrealizowane eksperymenty i analiza ich wyników pozwoliła na sformułowanie sześciu obszernych szczegółowych wniosków wskazujących na osiągnięcie celu

postawionego w rozprawie. Dodatkowo Doktorant bardzo trafnie i precyzyjnie wykazał główne oryginalne elementy swojej pracy. Przedstawił również sensowne i ambitne kierunki swoich dalszych studiów naukowych w zakresie badań nad modyfikacją kompozytów cementowych i możliwości efektywnego substytuowania ich składu zarówno w odniesieniu do spoiwa cementowego jak i kruszywa drobnego.

## 6. Uwagi dotyczące pracy

Po dokładnym przestudiowaniu publikacji Doktoranta, zgłoszonych do oceny jako osiągnięcie naukowe, które praktycznie wszystkie są pracami prezentującymi wyniki testów laboratoryjnych, recenzent zauważył kilka istotnych mankamentów dotyczących zarówno metodyki prowadzonych badań jak i podejścia do opracowania i prezentacji uzyskanych wyników. Kilka istotnych uwag zestawiono poniżej:

1. W prezentowanych artykułach w bardzo ograniczonym zakresie przeprowadzono analizę mikrostrukturalną przedmiotowych kompozytów. Dodatkowo brakuje istotnych informacji dotyczących tych badań. Na przykład, w przypadku badań SEM nie podano informacji o sposobie przygotowania próbek do badań. Czy próbki były napyłane przed umieszczeniem w mikroskopie a jeżeli tak to jakim preparatem i jak długo. Są to ważne dane, które mogą rzutować na uzyskane obrazy struktury materiału i późniejszą jego interpretację.
2. W badaniach pominięto zupełnie ocenę warstw stykowych w kompozytach o zmodyfikowanym składzie. Brak jest chociażby zwykłych zdjęć SEM tej strefy betonu. Korzystne byłoby również wykonanie bardziej zaawansowanych testów, np. z wykorzystaniem techniki nanoindentacji. Niestety, właściwości strefy ITZ w przedmiotowych betonach nie zostały przedyskutowane w żadnym z artykułów.
3. Badania z wykorzystaniem systemu cyfrowej korelacji obrazu, zawarte w [P4], przedstawiono bez podania istotnych informacji dla tego typu eksperymentów, np.: pełnych danych dotyczących użytych kamer, sposobu przygotowania próbek, opisu procesu kalibracji, panującego oświetlenia itp. Sposób prezentacji uzyskanych wyników również nie został przeprowadzony do końca prawidłowo. Brak widoku stanowiska badawczego z umieszczoną próbką rodzi wątpliwości czy kamery i oświetlenie próbek pozwalały na prawidłowe przeprowadzenie tych subtelnych testów. Z obrazów pokazanych w [P4] nie wynika nic istotnego a zmiany kolorystyki na mapach odkształceń próbek są właściwie niezauważalne. Trudno jest zatem wysnuć jakieś konstruktywne wnioski z tych wyników.
4. Dodatkowo, należy zwrócić uwagę że recenzowana rozprawa doktorska oparta jest wyłącznie na wnioskach wynikających z przeprowadzonych eksperymentów. Sporym mankamentem rozprawy jest brak opracowania w postaci modelu numerycznego, który mógłby posłużyć do walidacji uzyskanych wyników badań. Należy jednak docenić fakt, że Doktorant widzi potrzebę przygotowania w przyszłości takiego modelu, co wyraźnie zaznaczył w kierunkach swoich przyszłych badań.

## 7. Najważniejsze osiągnięcia w pracy

Lektura całości dostarczonej dokumentacji pozwala na stwierdzenie, że dobór tematyki rozprawy doktorskiej jest aktualny, o trendzie rozwojowym, z wyraźnymi elementami oryginalnymi. W pracy zaprezentowano pełne (kompleksowe) rozwiązanie podjętego problemu naukowo-badawczego (studia literaturowe, programowanie badań, badania wstępne i zasadnicze, zastosowana różnorodna aparatura

badawcza, pełna analiza zbioru licznych danych, analiza statystyczna uzyskanych wyników, poprawne wnioskowanie, wskazanie kierunków dalszych badań).

Do najważniejszych szczegółowych osiągnięć Doktoranta można zaliczyć:

1. Opracowanie autorskich testów laboratoryjnych do scharakteryzowania parametrów materiałowych oraz mechanicznych zastosowanych włókien odpadowych polipropylenowych, szklanych i stalowych.
2. Opracowanie oryginalnych receptur kompozytów cementowych wykonanych na bazie cementu portlandzkiego i jego substytutów naturalnych i odpadowych.
3. Kompleksowe oszacowanie zmian parametrów wytrzymałościowych w okresie od 1 do 28 dni siedmiu rodzajów kompozytu cementowego zbrojonego włóknami polipropylenowymi.
4. Oszacowanie maksymalnych zawartości zastosowanych włókien oraz substytutów spoiwa cementowego zapewniających wzrost parametrów wytrzymałościowych zaprojektowanych kompozytów cementowych.
5. Opracowanie koncepcji wykorzystania opracowanych składów kompozytów cementowych w produkcji drobnowymiarowych elementów budowlanych, tj. cegieł, oraz wskazanie możliwości ich dalszego efektywnego zastosowania przy produkcji wyrobów dla branży drogowej.

Co cenne, Autor w końcowej części dysertacji wskazał również zaskakująco dojrzałe dalsze kierunki swoich przyszłych prac naukowych. Zastosowanie kolejnych użytecznych substytutów cementu bądź kruszywa jest jak najbardziej pożądane. Natomiast, propozycje wdrożenia do optymalizacji tych koncepcji metod numerycznych bądź sztucznej inteligencji świadczą o już dużej świadomości naukowej Kandydata w zakresie nowoczesnych metod stosowanych w inżynierii materiałowej.

## **8. Wniosek końcowy**

Biorąc pod uwagę zakres i poziom recenzowanego dorobku naukowego, prezentowanego w przedłożonych do oceny publikacjach, oraz jego bezpośredni związek z praktyką inżynierską, wykazaną przez Doktoranta wiedzę a także umiejętność prowadzenia badań naukowych stwierdzam, że w rozumieniu obowiązujących ustaw, zostały spełnione wymagania niezbędne do uzyskania stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Wnioskuje zatem o dopuszczenie mgr inż. Mateusza Jackowskiego do publicznej oceny Jego dorobku naukowego.

Gregorz Golecki