



**POLITECHNIKA RZESZOWSKA**  
**im. Ignacego Łukasiewicza**  
**Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska**  
**i Architektury**  
**Katedra Konstrukcji Budowlanych**



Rzeszów, 09 listopada 2023 r

**Recenzent:**

dr hab. inż. Lidia Buda-Ożóg, prof. uczelni  
Politechnika Rzeszowska  
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury  
Katedra Konstrukcji Budowlanych  
ul. Poznańska 2  
35-084 Rzeszów  
tel. +48 17 743 24 02, kom. +48 668 142 154  
e-mail: lida@prz.edu.pl

**Adresat recenzji:**

Rada Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport  
Politechniki Koszalińskiej  
ul. Śniadeckich 2  
75 - 453 Koszalin

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

*Mgr inż. Mateusza Zakrzewskiego*

pt.: Analiza cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie  
materiałów odpadowych

### **1. Podstawa formalna**

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowią:

- a) Uchwała Nr 81/2023 Senatu Politechniki Koszalińskiej z dnia 20 września 2023 r,
- b) Pismo Rektora Politechniki Koszalińskiej dr hab. Danutę Zawadzka, prof. PK  
z dnia 5 października 2023 r.

### **2. Podstawa prawna**

Podstawę prawną opracowania recenzji stanowi Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2022, poz. 574, z późn. zm.).

### 3. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mateusza Zakrzewskiego, pt.: „Analiza cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych”. Praca została przygotowana pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Jacka Domskiego, prof. PK na podstawie spójnych tematycznie sześciu publikacji. Są to publikacje wieloautorskie, pięć z nich zamieszczono w czasopiśmie indeksowanym z bazy JCR takich jak Journal of Cleaner Production, Materials oraz Rocznik Ochrona Środowiska, natomiast jedną publikację zamieszczono w Environmental Challenges in Civil Engineering. W przypadku czterech publikacji doktorant jest pierwszym autorem i jednocześnie autorem korespondencyjnym. Przedstawiony zbiór artykułów poprzedzony jest obszernym ponad 40 stronicowym wprowadzeniem zawierającym: spis treści, tezy i cel pracy oraz wprowadzenie do tematu wraz z uzasadnieniem spójności zamieszczonych publikacji. Całość została zebrana w postaci monografii i podsumowana listą wniosków. W skład monografii wchodzi również streszczenia w języku polskim i angielskim oraz bibliografia która zawiera wykaz cytowanych 79 artykułów, monografii, norm, rozporządzeń i powoływanych w pracy stron internetowych.

### 4. Charakterystyka pracy

W niniejszej dysertacji pt.: „Analiza cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych” przeprowadzono ocenę możliwości wykorzystania materiałów odpadowych pochodzących z produkcji pustaków ceramicznych, produkcji wyrobów porcelanowych oraz piasków odpadowych do stworzenia kompozytów cementowych o właściwościach odpowiadających tradycyjnym betonom. Dodatkowo w celu poprawy elastyczności uzyskanego materiału zastosowano zbrojenie rozproszone w postaci kordu stalowego pozyskiwanego ze zużytych opon. Przeprowadzone badania doraźne nowego materiału rozbudowano o bardzo wartościowe i ważne badania reologiczne.

W strukturze ocenianej rozprawy doktorskiej wyróżniono dwie zasadnicze części. W części pierwszej zawierającej 8 rozdziałów zamieszczono: wprowadzenie, przegląd literatury, tezy, cel i zakres pracy, charakterystykę zastosowanych materiałów odpadowych, metodykę badań oraz obszerną analizę wyników badań wraz z ich podsumowaniem. W ostatnim, 8 rozdziale części pierwszej zamieszczono cytowaną bibliografię. Drugą i jednocześnie najważniejszą część dysertacji stanowią spójne tematycznie publikacje naukowe doktoranta, w których przedstawione zostały wyniki oraz podstawowe wnioski z przeprowadzonych badań i analiz. Cykl publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Mateusza Zakrzewskiego, stanowią:

- Domski, J., Katzer, J., Zakrzewski, M., Ponikiewski, T., (2017), Comparison of the mechanical characteristics of engineered and waste steel fiber used as reinforcement for concrete, *Journal of Cleaner Production*, Volume 158, s. 18–28, (IF 11,072),
- Zakrzewski, M., Gancarz, M., Tvrdá, K., Laskowska- Bury, J., & Domski, J. (2023), Comparative Analysis of Waste, Steel, and Polypropylene Microfibers as an Additive for Cement Mortar. *Materials*, 16(4), 1625, (IF 3,748),
- Pająk, M., Krystek, M., Zakrzewski, M., & Domski, J. (2021). Laboratory investigation and numerical modelling of concrete reinforced with recycled steel fibers. *Materials*, 14(8), 1828, (IF 3,748),
- Zakrzewski, M.; Domski, J. Cracking Behavior and Deflections in Recycled-Aggregate Beams Reinforced with Waste Fibers Subjected to Long-Term Constant Loading. *Materials* 2023, 16, 3622, (IF 3,748),
- Zakrzewski, M., Domski, J., (2023). Analysis of rheological properties of cement composites based on waste materials, *Rocznik Ochrona Środowiska* (IF 0,640),
- Zakrzewski, M., Sanok, A., & Domski, J. (2023), Rheological Properties of Concrete Based on Waste Materials, *Environmental Challenges in Civil Engineering II* (pp. 175-184). Cham: Springer International Publishing.

W dysertacji na podstawie aktualnego stanu wiedzy sformułowano dwie tezy pracy:

- pierwsza – możliwe jest opracowanie takiego kompozytu cementowego, wytworzonego na bazie odpadów pochodzących z fabryk porcelany, pustaków ceramicznych oraz piasku odpadowego, którego właściwości doraźne oraz długotrwałe będą odpowiadały betonowi zwykłemu;
- druga – możliwe jest skuteczne zastosowanie systemu cyfrowej korelacji obrazu do pomiaru wybranych cech reologicznych kompozytów cementowych w elementach belkowych obciążonych długotrwałe.

Postawione tezy są prawidłowe, a ich naukowe potwierdzenie i uzasadnienie poszerza aktualny stan wiedzy.

W pracy Doktorant wyodrębnił i zrealizował cztery zadania badawcze o następujących celach:

- charakterystyka wybranych cech materiałów odpadowych użytych w badaniach,
- ocena możliwości zastosowania kordu stalowego jako zbrojenia rozproszonego betonu,
- analiza doraźnych i reologicznych cech wybranych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych,

- analiza wybranych cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych z wykorzystaniem nowatorskiego stanowiska badawczego.

Zadanie 1 dotyczące charakterystyki wybranych cech materiałów odpadowych użytych w badaniach, omówiono szczegółowo w dwóch publikacjach. Są to: "Comparison of the mechanical characteristics of engineered and waste steel fiber used as reinforcement for concrete" oraz "Analysis of rheological properties of cement composites based on waste materials". Dodatkowe, uporządkowane i rozbudowane informacje dotyczące cech materiałów odpadowych zamieszczono w pierwszej części pracy, w rozdziałach 4 i 6.2. W pierwszej z wymienionych publikacji porównano parametry wytrzymałościowe włókien produkowanych seryjnie oraz kordu stalowego. Zrealizowany program badawczy dostarczył wiedzy na temat kluczowych właściwości kordu stalowego takich jak: geometrii włókien wraz z typem rozkładu opisującego ich wymiary (grubość, długość), wytrzymałości na rozciąganie oraz plastyczności. Zauważono, że uzyskane w procesie recyklingu włókna charakteryzują się wyższą wytrzymałością na rozciąganie i znacznie wyższą ciągliwością niż tradycyjne zbrojenie rozproszone. Włókna z kordu stalowego uległy zniszczeniu po blisko trzykrotnie większej ilości przegięć niż włókna komercyjne. W drugiej z wymienionych publikacji pt.: „Analysis of rheological properties of cement composites based on waste materials” przedstawiono rezultaty badań parametrów kruszywa odpadowego. Analizowano kilka podstawowych parametrów takiego kruszywa tj.: gęstość pozorną, gęstość nasypową, jamistość oraz nasiąkliwość.

Zadanie 2, ocena możliwości zastosowania kordu stalowego jako zbrojenia rozproszonego betonu szeroko opisano w publikacjach „Comparative Analysis of Waste, Steel, and Polypropylene Microfibers as an Additive for Cement Mortar” oraz “Laboratory investigation and numerical modelling of concrete reinforced with recycled steel fibers”. Sprawdzone wpływ kordu stalowego na zaprawę cementową oraz element fibrobetonowy. Określono parametry materiałowe zaprawy cementowej z dodatkiem kordu stalowego takie jak: wytrzymałość na zginanie, wytrzymałość na ściskanie, odporność na pękanie, natomiast na fibrobetonowych elementach betonowych określono dodatkowo wytrzymałości resztkowe na rozciąganie przy zginaniu. Analizowano elementy o zróżnicowanej zawartości włókien stalowych od 0,5% do 1,50% w stosunku do objętości mieszanki. Wykazano, że włókna stalowe pochodzące z recyklingu mogą stanowić skuteczną alternatywę dla komercyjnych włókien stalowych i polipropylenowych, wpływają na zwiększenie wytrzymałości na zginanie zapraw cementowych oraz wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu analizowanego betonu.

Przedstawione przez Doktoranta zadania 3 i 4 są wzajemnie powiązane i dotyczą analizy doraźnych i reologicznych cech zaprojektowanych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych. Opisano je w trzech publikacjach: “Cracking Behavior and Deflections in Recycled-Aggregate Beams

Reinforced with Waste Fibers Subjected to Long-Term Constant Loading”, “Analysis of rheological properties of cement composites based on waste materials”, “Rheological Properties of Concrete Based on Waste Materials”. Uwzględniając tytuł dysertacji oraz procentowy wkład doktoranta w ich powstanie, należy przypuszczać, że są to najważniejsze publikacje z całego cyklu publikacji będących podstawą rozprawy doktorskiej. Dla zaprojektowanych kompozytów cementowych z wykorzystaniem materiałów odpadowych pochodzących z produkcji pustaków ceramicznych, wyrobów porcelanowych i piasków odpadowych oraz z dodatkiem włókien stalowych pochodzących z recyklingu opon samochodowych, przeprowadzono typowe badania doraźne w celu wyznaczenia parametrów wytrzymałościowych oraz modułu sprężystości. Wyznaczono współczynnik pełzania oraz przeanalizowano zjawiska skurczowe. Na potrzeby badań długotrwałych doktorant zaprojektował autorskie stanowisko badawcze, umożliwiające jednoczesne obciążanie z porównywalną siłą trzech elementów belkowych oraz zapewniające dostęp do powierzchni bocznej belek – niezbędny do oceny zmian zarysowania za pomocą systemu cyfrowej korelacji obrazu. W wyniku przeprowadzonych badań sformułowano kilka istotnych wniosków, mogących mieć praktyczne zastosowanie w procesie wykorzystywania materiałów odpadowych do produkcji kompozytów cementowych. Zauważono wyraźną korelację pomiędzy skurczem i pełzaniem a rodzajem materiału odpadowego (ceramika biała, czerwona czy piasek odpadowy). Wykazano, że wadą kompozytów cementowych z na bazie odpadów z ceramiki czerwonej są zwiększone odkształcenia w stosunku do betonu zwykłego. Kompozyty te cechuje większy niż w przypadku betonu współczynnik pełzania, co ma wpływ na morfologię zarysowania oraz jej zmiany na skutek obciążeń długotrwałych. Uwzględniając ten fakt, w pracy zaproponowano korektę normowej procedury obliczania zarysowania, wprowadzając odpowiednie współczynniki korekcyjne dla kompozytów na bazie ceramiki czerwonej i białej.

## 5. Merytoryczna ocena rozprawy

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską Pana mgr inż. Mateusza Zakrzewskiego stwierdzam, że w pracy podjęty został temat ważny i aktualny, dotyczący zagospodarowania odpadów pochodzących z produkcji ceramiki oraz recyklingu opon samochodowych. Doktorant na podstawie przeprowadzonych badań, realizując postawione cele potwierdził, że zaproponowany skład kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych pozwala na otrzymanie materiałów o parametrach wytrzymałościowych odpowiadających klasycznym betonom. Należy mieć jednak świadomość innych zmian reologicznych takiego materiału skutkujących ich zróżnicowaną odkształcalnością i zarysowaniem.

W mojej opinii na fakt jednoznacznie pozytywnej oceny przedmiotowej dysertacji wpływają następujące argumenty:

- bardzo dobre rozpoznanie przez Doktoranta problemu wykorzystania materiałów odpadowych w zastępstwie klasycznych kruszyw oraz wykorzystania kordu stalowego w fibrobetonach,
- umiejętność zebrania, przeanalizowania literatury naukowej w wybranej tematyce,
- czytelne i logiczne opracowanie programów badawczych nowych materiałów, zarówno w zakresie badań doraźnych jak i długotrwałych,
- umiejętność zbudowania stanowiska umożliwiającego prowadzenie badań długotrwałych kilku elementów jednocześnie z wykorzystaniem systemu cyfrowej korelacji obrazu,
- bezpośrednie odniesienie uzyskanych rezultatów do praktyki projektowej poprzez wprowadzenie współczynnika modyfikującego szerokość rys,
- podanie szeregu argumentów potwierdzających postawione w dysertacji tezy pracy oraz osiągnięcie założonych celów.

Podczas studiowania pracy nasunęły się pewne wątpliwości, niejasności lub błędy, które nie obniżają wartości merytorycznej pracy i jednoznacznie pozytywnej oceny. Zostały one podane w charakterze dyskusji z podziałem na grupy:

- uwagi ogólne:

W mojej opinii tytuł dysertacji „Analiza cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych” nie odzwierciedla w pełni treści zamieszczonych w cyklu publikacji i jednocześnie zdefiniowanych celów pracy. W tytule położono nacisk na cechy reologiczne, natomiast połowa z przedstawionych publikacji oraz znaczna część wprowadzenia dotyczy szerszego zagadnienia jakim jest ocena poszczególnych składników kompozytu cementowego oraz przeprowadzenie doraźnych badań wytrzymałościowych.

- uwagi dotyczące wykonanych badań, analiz i interpretacji wyników:

W publikacji “Comparative Analysis of Waste, Steel, and Polypropylene Microfibers as an Additive for Cement Mortar “ na rysunku 1 przedstawiono histogramy opisujące smukłość kordu stalowego i zaproponowano typ rozkładu opisujący smukłość kordu stalowego. W opisie rysunku jest informacja o dopasowaniu rozkładu normalnego o średniej 50,6 i odchyleniu standardowym 29,3. W jaki sposób przeprowadzono dopasowanie i w jakim celu? W mojej opinii rozkład Gumbela byłby lepszym dopasowaniem do przedstawionych histogramów.

W tabeli 2, wyżej wymienionej publikacji błędnie podano współczynnik zmienności wytrzymałości na rozciąganie kordu stalowego, powinno być 30% a nie 0,3.

W publikacji "Analysis of rheological properties of cement composites based on waste materials" zaproponowano globalny współczynnik korygujący szerokość rys w zależności od rodzaju kruszywa odpadowego. Analizując tabelę 6 zamieszczoną w publikacji "Cracking Behavior and Deflections in Recycled-Aggregate Beams Reinforced with Waste Fibers Subjected to Long-Term Constant Loading" można zauważyć, że problem jest bardziej złożony. Wyraźnie we wszystkich belkach z kruszywem odpadowym pomierzony rozstaw rys jest mniejszy niż wynika to z obliczeń wg PN-EN-1992-1-1, natomiast pomierzona szerokość rys w zależności od typu ceramiki charakteryzują zróżnicowane zależności. W przypadku zastosowania ceramiki czerwonej pomierzone szerokości są większe od obliczonych, natomiast w przypadku ceramiki białej zbliżone do wartości normowych. Czy w takim przypadku zastosowanie współczynników korekcyjnych odpowiednio do  $\varepsilon$  i  $s_{max}$  nie byłoby bardziej uzasadnione?

W tabeli 8 powyższej publikacji błędnie wyliczono różnice % ugięć belek z badań doświadczalnych i obliczeń wg. wybranych metod. Przykładowo podana różnica ugięć pomierzonych i policzonych wg metody Bywalskiego dla elementu RCf05 wynosi 156,84 %, a powinno być  $\frac{16,9-6,58}{16,9} \cdot 100 = 61,06 \%$ . Takich pomyłek w podanej tabeli jest więcej.

- błędy stylistyczne, gramatyczne oraz inne uwagi:

W pracy zdarzają się błędy stylistyczne i gramatyczne, przytoczę wybrane:

str. 10 „Jest to metoda prosta z obliczeniowego punktu widzenia”,

str. 14 „Jest to związane z występowaniem włókien stalowych, które warunkują maksymalny wymiar ziaren jaki powinien zostać zastosowany w kompozycie” (może chodziło o „zastosowaniem włókien...?”),

str. 16 „Średnica większości włókien odpadowych wynosi od 0,2 do 0,3 mm” (proponuję: Większość włókien odpadowych charakteryzowało się średnicą od ...),

str. 24 „w stosunkowo długim okresie czasu”, str. 30 „ogromny potencjał” – pleonazmy czyli „masło maślane”,

str. 32 „Urządzenia te umożliwiają przyłożenie stałego obciążenia, niezależnego od skrócenia się próbek, przez cały okres badania” ( proponuję: Przez cały okres badania i niezależnie od skrócenia się próbek urządzenia te umożliwiają realizację stałego obciążenia”), itp.

## 6. Podsumowanie recenzji

W opiniowanej rozprawie doktorskiej mgr inż. Mateusza Zakrzewskiego podjęto problem w pełni aktualny, mający znaczenie nie tylko poznawcze ale przede wszystkim praktyczne. Praca rozwiązuje

postawione zagadnienie naukowe i stanowi istotny wkład w rozwój procedur projektowania i zastosowania kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych. Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy naukowej i technicznej w zakresie prezentowanej tematyki, umiejętnościami planowania badań doświadczalnych oraz analizą otrzymanych wyników. Świadczy to o dojrzałości naukowej Doktoranta oraz Jego dużym doświadczeniu w obszarze prowadzenia badań naukowych.

W mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Zakrzewskiego pt. „Analiza cech reologicznych kompozytów cementowych na bazie materiałów odpadowych” spełnia wymogi stawiane w ustawie w Ustawie z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. poz. 1669) i 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 pol. zm.) oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z 19 stycznia 2018 r (Dz.U. z 30.01.,2018 r. poz. 261), dlatego wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*Lidia Buda-Oxio*