

dr hab. inż. Andrzej Marynowicz, prof. uczelni
Politechnika Opolska
Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Fizyki Materiałów
Katowicka 48, 45-061 Opole

Opole, 14.10.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Eryka Goldmanna
pt. „*Analiza możliwości zastosowania funkcjonalnych nanokompozytów cementowych jako materiału naprawczego i samomonitorującego w konstrukcjach budowlanych*”

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę formalną niniejszej opinii stanowi pismo z dnia 18.07.2025 r. (l.dz. RDLGIT.512.36.2025) skierowane do mnie przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej Profesora dra hab. inż. Piotra Folegę, z informacją o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Eryka Goldmanna, zatytułowanej „*Analiza możliwości zastosowania funkcjonalnych nanokompozytów cementowych jako materiału naprawczego i samomonitorującego w konstrukcjach budowlanych*”. Do pisma załączono kopię pracy, druk umowy i wymagane załączniki. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Barbara Klemczak.

2. Tematyka i układ rozprawy

W ramach pracy doktorskiej Autor sformułował kilka celów naukowych, skoncentrowanych wokół:

1. Określenia wpływu dodatku nanorurek węglowych w różnych stężeniach na szereg wybranych cech fizycznych oraz mechanicznych zapraw cementowych.
2. Określenia wpływu nanorurek węglowych na wybrane cechy związane ze zwiększeniem trwałości zaprawy cementowej oraz zastosowania jej jako materiału naprawczego i ochronnego, w tym odporność na czynniki korozyjne, nasiąkliwość i współczynnik podciągania kapilarnego.
3. Ustalenia możliwości pomiaru przewodności elektrycznej zaprawy z dodatkiem nanorurek węglowych w różnych warunkach wilgotnościowych oraz klasyfikację badanych mieszanek jako materiału do zastosowania w monitoringu konstrukcji.
4. Wyboru optymalnego składu zapraw łączącego cechy związane z właściwościami ochronnymi oraz przewodnościami (elektryczną i cieplną) przy zachowaniu cech podstawowych (mechanicznych).

Należy już tutaj zaznaczyć, że w opiniowanym cyklu badań Autor pracy wykorzystał komercyjnie dostępne nanorurki węglowe, co pozwala np. na potencjalne powtórzenie badań w innych laboratoriach.

Do rozwiązania tak sformułowanych celów naukowych doktorant wykorzystał szeroki wachlarz wysokiej klasy urządzeń pomiarowych, szczegółowo dokumentując przebieg badań wraz z interpretacją wyników kończącą każdy podrozdział poświęcony kolejnym pomiarom.

Rozprawa doktorska liczy 181 stron (z bibliografią i streszczeniami). Składa się kolejno z następujących części: spisu treści, wprowadzenia, dalszych 5-u rozdziałów (w tym zamykające Wnioski) oraz bibliografii zawierającej 250 pozycji (w tym 7 normatywów).

W rozdziałach pierwszym i drugim Autor wprowadza w tematykę pracy i przedstawia wyczerpujący przegląd literatury. W rozdziale trzecim formułuje założenia, tezę i cele naukowe rozprawy. Motywację podjęcia tematu doktorant przedstawił jasno i precyzyjnie, wskazując obszary, które jego zdaniem nie są dostatecznie lub w ogóle zbadane. Wnioski Autora płynące w przeglądu literatury i oceny potencjalnych nowych obszarów badawczych są słuszne, a tematyka badań podjęta przez doktoranta otwiera przed nim dalsze obszary badawcze, co podkreślił również w zakończeniu rozprawy.

Rozdział czwarty obejmuje najobszerniejszą część rozprawy. Autor opisuje w nim szeroki zakres zrealizowanych badań, obejmujący badania wstępne, związane w opracowaniem autorskich mieszanek zapraw cementowych z różnym stężeniem nanorurek węglowych, badania cech podstawowych, przez które Autor rozumie rozptył i właściwości reologiczne świeżych mieszanek referencyjnych i modyfikowanych, a także szereg właściwości mechanicznych, m.in.: skurcz wysychania, zmiany gęstości w czasie wiązania, zawartość powietrza, a także wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie i formy zniszczenia w próbie wytrzymałościowej zarejestrowane za pomocą techniki DIC.

W dalszej części rozdziału czwartego Autor opisuje wyniki eksperymentów związanych z trwałością badanych kompozytów, w tym podciąganie kapilarne, badania starzeniowe i badania odporności korozyjnej, obejmujące też czynniki biologiczne. Autor określił również przewodność cieplną badanych kompozytów metodą niestacjonarną.

Każde opisane w rozdziale czwartym badanie laboratoryjne kończy podsumowanie, wraz z wnioskami i interpretacją uzyskanych wyników. Pozwoliło to doktorantowi na ocenę przydatności badanych zapraw pod kątem ich zastosowania do napraw i monitorowania konstrukcji.

Podsumowując tę część rozprawy należy podkreślić, że doktorant podjął się wymagającego zadania kompleksowego zbadania wielu cech fizycznych zarówno świeżych, jak i stwardniałych zapraw z domieszką nanorurek węglowych. Badania te zrealizował bardzo starannie, każdorazowo przykładając dużą wagę do interpretacji uzyskanych wyników.

Pracę kończy rozdział piąty i szósty, w którym Autor podsumowuje uzyskane wyniki i przedstawia plany dalszych prac badawczych.

W podsumowaniu niniejszego punktu stwierdzam, że układ rozprawy jest prawidłowy (kolejność rozdziałów i omawianych zagadnień, kompozycja, umiejscowienie rysunków i tablic). Strona graficzna pracy została opracowana bardzo starannie, a poruszana problematyka jest przedstawiona w sposób zrozumiały. Liczba cytowanych pozycji literatury jest wystarczająco duża, co wskazuje na realizację przez Autora szerokich studiów literaturowych. Do uwag krytycznych odniosę się w dalszej części recenzji.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1. Ocena doboru tematu i celów badawczych

Wybór tematyki rozprawy i postawionych w niej celów badawczych oceniam zdecydowanie pozytywnie. Poruszony temat jest aktualny i ciekawy naukowo, z potencjałem wykorzystania nabytej przez doktoranta wiedzy do dalszej pracy naukowej. Teza pracy została jasno sformułowana, a cele badawcze właściwie uporządkowane. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością rozbudowanego warsztatu badawczego, poczynawszy od ustalenia składu badanych mieszanek, a kończąc na systematycznej analizie uzyskanych wyników. Na uznanie zasługuje fakt podjęcia przez doktoranta niełatwej i rzadkiej w polskich realiach tematyki kompleksowych badań w obszarze materiałów budowlanych modyfikowanych nanodomieszkami.

3.2. Ocena wartości naukowej

Zdaniem recenzenta omówiona w dysertacji problematyka oraz zrealizowane w tym zakresie badania eksperymentalne i dogłębna analiza wyników pozwoliły Autorowi osiągnąć oryginalne wyniki co z kolei pozwoliło osiągnąć założone cele naukowe, sformułowanych na początku pracy. Dzięki temu

rozprawa spełnia ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim, mającym wykazać przede wszystkim odpowiedni warsztat i przygotowanie merytoryczne doktoranta do prowadzenia badań naukowych.

Do zasadniczych osiągnięć doktoranta zaliczyć należy ustalenie, iż:

- 1) Wpływ dodatku nanorurek węglowych na cechy podstawowe zapraw cementowych jest w większości przypadków negatywny lub neutralny, korzystny jedynie w niektórych przypadkach, oraz generalnie wzrastał wraz ze wzrostem zastosowanej dawki domieszki.
- 2) Modyfikacja składu zaprawy cementowej poprzez dodanie większej ilości cementu pozwala na łatwiejsze wykonanie nanokompozytów cementowych oraz prowadzi do poprawy wpływu dodatku CNT na cechy zapraw cementowych;
- 3) Zgodnie z oczekiwaniami i tzw. naturą rzeczy, wilgotność próbek miała istotny wpływ na ich przewodność elektryczną.
- 4) Wpływ dodatku nanorurek węglowych na odporność korozyjną i trwałość badanych zapraw był niejednoznaczny, szczególnie w przypadku efektów o podłożu biologicznym.

Zawartość rozprawy (streszczona w p. 2 recenzji) pozwala recenzentowi stwierdzić, że doktorant posiada szeroką wiedzę teoretyczną i praktyczną, wymaganą na poziomie pracy doktorskiej w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport. Ponadto, sposób przygotowania i realizacji programu badań w kontekście postawionego celu badawczego świadczy o zdobyciu przez Niego dużych umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

4. Uwagi krytyczne i ogólne

Jakość recenzowanej pracy stoi na wysokim poziomie merytorycznym i redakcyjnym. Żaden z elementów pracy nie psuje jej odbioru, a ponadto można w niej znaleźć wiele walorów poznawczych, mogących znaleźć zastosowanie w pracy badawczej nie tylko Autora rozprawy.

Autor nie ustrzegł się jednak kilku niedociągnięć, co przy tym rozmiarze pracy nie wywołuje zdziwienia. Poniżej przedstawię uwagi merytoryczne do recenzowanej rozprawy.

- a. W pracy brakuje spisu oznaczeń wielkości fizycznych wraz z ich jednostkami. Byłoby to wybaczone, gdyby były opisane w miejscu ich wystąpienia w tekście – ale nie są. Brak opisu jednostek mierzonych wielkości w całej pracy dziwi tym bardziej, że ma ona charakter pomiarowy.
- b. Str. 44: Autor naprzemiennie używa pojęcia rezystywności (Ω/m) i rezystancji (Ω). To są różne wielkości, chociaż związane ze sobą (błąd w opisie wielkości pod wzorem 2.8).
- c. Brak wyjaśnienia zaburzeń pomiaru na wykresie 4.8 (str. 56). Co powoduje takie duże fluktuacje dla części próbek?
- d. Na tej samej stronie, rys. 4.9: przybliżanie wielomianem jest ryzykowne, zwłaszcza, gdy później porównujemy jakość dopasowania za pomocą R^2 .
- e. Str. 58: „najbardziej optymalny” jest błędem językowym (tzw. konstrukcja nadmiarowa, pleonazm).
- f. Str. 63: brak źródła równania 4.2. To jest uwaga ogólna, do wszystkich równań w pracy.
- g. Str. 64, pierwszy akapit: na jakiej podstawie Autor sformułował takie stwierdzenia? Brak źródła lub przesłanki za takimi stwierdzeniami.
- h. Str. 65: wielkość na wykresie podana z dużą dokładnością, a co z niepewnością pomiarową? Uwaga dotyczy większości wykresów wynikowych w pracy.
- i. Str. 75: dokładność to nie niepewność. Autor powinien w przyszłości rozwinąć aparat szacowania niepewności pomiarowej, szczególnie, jeśli planuje dalsze prace badawcze w obszarze eksperymentalnym.

- j. Str. 102: Błąd w jednostce. Współczynnik podciągania kapilarnego ma wymiar $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})]$ lub w innym zapisie: $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-0,5}]$.
- k. Str. 139: pojemność cieplna nie jest współczynnikiem. W literaturze częściej operuje się iloczynem izobarycznego ciepła właściwego i gęstości, co daje w efekcie właśnie pojemność cieplną.
- l. Str. 140 (tabela 4.29): błędna jednostka odchylenia standardowego. Zapis sugeruje otrzymanie wyniku z bardzo małym odchyleniem rzędu ułamków procenta, podczas gdy powinno mieć ono jednostkę wielkości opisywanej. Wtedy też można na wykresie słupkowym oznaczyć te odchylenia, co zmienia odbiór wyników. Metoda niestacjonarna, która jest podstawą działania miernika Isomet, charakteryzuje się dużym błędem pomiarowym, rzędu 10% dla materiałów o względnie dużej przewodności cieplnej. Zależy silnie m.in. od jakości kontaktu sondy z badanym podłożem.
- m. Wartość średnia z tabeli 4.30 ma zbyt dużą dokładność.

Uwagi redakcyjne uznają za pomijalnie małe, poza niezrozumiałym nieuwzględnieniem w p. 4.1. wykonanych i opisanych w rozdziale 4.16. badań właściwości cieplnych. Uwaga dodatkowa: warto powtórzyć w przyszłości badania porozymetryczne po testach starzeniowych.

5. Wnioski końcowe

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Eryk Goldmann przedstawił rezultaty obszernego zakresu badań laboratoryjnych kompozytów na bazie cementu modyfikowanych nanodomieszkami w postaci rurek węglowych. Na potrzeby realizacji celów naukowych przygotował receptury badanych kompozytów i zrealizował szereg badań fizyko-chemicznych otrzymanych w ten sposób materiałów. Uzyskane wyniki są dużym osiągnięciem naukowym i praktycznym doktoranta. Warto podkreślić, że przedstawione badania stanowią solidną bazę do dalszego rozwoju tematyki, na co doktorant również zwrócił uwagę w podsumowaniu. Stwierdzam więc, że uzyskane w pracy badawczej doświadczenie otwiera przed Nim drogę do twórczej pracy naukowej w przyszłości.

Na podstawie analizy treści przedłożonej do opinii dysertacji mogę stwierdzić, że nakreślone w niej cele naukowe zostały osiągnięte na poziomie wymagań, które stawia się rozprawom doktorskim, co stanowi wkład do dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport. Autor pracy wykazał się przede wszystkim umiejętnością samodzielnego planowania i prowadzenia badań naukowych, a uwagi wymienione w punkcie 4 mają charakter dyskusji lub konstruktywnych sugestii i nie wpływają negatywnie na ocenę uzyskanych wyników.

W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Eryka Goldmanna spełnia wymagania, o których mowa w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz.U. 2024 poz. 1571 z późn. zm.) i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Recenzję podpisał
Andrzej Marynowicz