

Dr hab. Marcin Nabiałek, prof. PCz

Katedra Fizyki

Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

Politechnika Częstochowska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Beaty Figiela

pt. „Synteza i właściwości spienionych materiałów geopolimerowych wytworzonych z wykorzystaniem ubocznych produktów wydobycia węgla kamiennego”

Podstawa opracowania recenzji

Podstawę opracowania recenzji stanowi uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Krakowskiej przekazana w piśmie Przewodniczącego Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa z dnia 09.09.2025.

Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pani mgr inż. Beaty Figiela zrealizowana na Politechnice Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Fizyki. Praca doktorska została przygotowana w ramach realizacji projektu finansowanego z konkursu grantowego LIDER X (numer grantu: LIDER/31/068/L-10/18/NCBR/2019, tytuł: „Pianki geopolimerowe o niskim współczynniku przewodzenia ciepła produkowane na bazie odpadów przemysłowych jako innowacyjny materiał dla gospodarki o obiegu zamkniętym”). Promotorem rozprawy jest Pani dr hab. inż. Kinga Korniejenko, prof. PK będąca jednocześnie Kierownikiem wyżej wymienionego projektu. Rozprawa liczy 197 stron, z czego 190 stron stanowi praca z jej nieodłącznymi elementami. Na końcu rozprawy (od strony 191) znajduje się wykaz dorobku naukowego Doktorantki. Poza tym wyjątkiem, praca charakteryzuje się klasyczną formą. Składa się kolejno z wykazu wykorzystanych skrótów i oznaczeń, wstępu, przeglądu literatury, części dotyczącej uzasadnienia podjęcia tematyki badawczej oraz sformułowania celu, tezy i zakresu pracy, metodyki badawczej, wyników badań wraz z dyskusją, wniosków, streszczenia, spisów

rysunków i tabel oraz spisu literatury. Praca zawiera 72 rysunki, 32 tabele a spis literatury składa się z 250 pozycji, w tym 13 norm, 5 rozporządzeń i dyrektyw. Zdecydowana większość pozycji jest anglojęzycznych. Autorka cytuje 6 własnych pozycji literaturowych, kilka pozycji Promotora pracy oraz pozycje obowiązkowe dla tematyki badawczej (na przykład prace Davidovitsa). Ponadto na końcu pracy w wykazie dorobku naukowego, Doktorantka podaje listę publikacji dotyczących rozprawy doktorskiej).

Charakterystyka rozprawy

Gospodarka o obiegu zamkniętym według definicji Parlamentu Europejskiego jest modelem produkcji i konsumpcji polegającym między innymi na dzieleniu się, pożyczaniu, ponownym użyciu, naprawie, odnawianiu i recyklingu istniejących materiałów. Takie podejście wydłuża cykl życia produktów oraz ogranicza ilość odpadów do minimum. Podejście to jest kluczowe dla rozwoju nowoczesnej gospodarki w dobie rosnących kosztów wydobywania i zasobów naturalnych oraz rosnących kosztów energii. Jednym z elementów idei gospodarki o obiegu zamkniętym jest koncepcja upcylingu polegająca na przekształcaniu różnego rodzaju odpadów w produkty o znacznie wyższej wartości, na przykład użytkowej. W przedłożonej do recenzji pracy doktorskiej, Autorka pochyliła się nad problemem zagospodarowania odpadów związanych z wydobywaniem węgla kamiennego. Pomimo stopniowego wygaszania przemysłu wydobywczego węgla kamiennego, liczba odpadów związanych z wydobywaniem węgla rośnie. Dzięki rozwojowi technologii recyklingu oraz idei gospodarki o obiegu zamkniętym, odpady te można ekonomicznie i efektywnie zagospodarować.

Przedłożona do recenzji praca Pani mgr inż. Beaty Figiela jest rezultatem prac eksperymentalnych i rozwojowych prowadzonych nad nowym rodzajem materiałów geopolimerowych do wykorzystania w budownictwie jako materiały izolacyjne o dobrych właściwościach mechanicznych, wysokiej odporności termicznej oraz względnie niskim współczynnikiem przenikania ciepła.

Praca doktorska charakteryzuje się typową strukturą – podziałem na część literaturową oraz wyniki badań własnych. W pracy znajduje się jeden rozbudowany rozdział dotyczący przeglądu literatury. Doktorantka zamieściła najistotniejsze informacje dotyczące geopolimerów. W rozdziale znajdują się informacje na temat wytwarzania materiałów geopolimerowych wraz z opisem mechanizmów zachodzących podczas ich wytwarzania. Doktorantka skupia się na wyodrębnionej grupie geopolimerów, tak zwanych spienionych materiałów geopolimerowych. W rozdziale zamieszczono również i dane na temat

właściwości tych materiałów. Rozdział zakończono wnioskami z przeglądu literatury. Bezpośrednio po wnioskach, Doktorantka przedstawiła uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej. Postawiono w tym miejscu alternatywne wykorzystanie geopolimerów jako materiałów do produkcji wyrobów termoizolacyjnych. Podjęcie tej tematyki badawczej można uznać za podwójnie proekologiczne: po pierwsze praca wpisuje się w koncepcję gospodarki o obiegu zamkniętym, po drugie – efektem realizacji pracy jest rozwój materiałów termoizolacyjnych co jest proekologicznym podejściem do przemysłu budowlanego. W następnym rozdziale, Doktorantka stawia tezę oraz cele pracy. Wskazano jeden główny cel jakim jest: „synteza materiałów geopolimerowych na bazie produktów ubocznych procesu wydobywania węgla oraz ich charakterystyka pod kątem zastosowania w budownictwie na płyty elewacyjne o podwyższonych właściwościach elewacyjnych dla nowoczesnego budownictwa”. Ponadto postawiono cele szczegółowe: 3 cele naukowe, dwa cele techniczne oraz dwa cele społeczno – środowiskowo – gospodarcze. Następnie przedstawiono zakres prowadzonych prac, który obejmował: wybór surowców do produkcji geopolimerów, wstępne przygotowanie materiałów, dobór parametrów produkcyjnych, przeprowadzenie podstawowych badań fizyko – chemicznych wytworzonych geopolimerów, dobór materiałów dodatkowych, kompleksowe badania struktury i właściwości wytworzonych pianek geopolimerowych oraz wytworzenie prototypu spienionego panelu geopolimerowego oraz przeprowadzenie testu odporności ogniowej. W czwartym rozdziale zamieszczono plan prowadzonych badań. Piąty rozdział dotyczy metodyki badawczej. Dokonano charakterystyki procesu przygotowania surowców do syntezy materiałów geopolimerowych, proces wytwarzania oraz spieniania geopolimerów, następnie opisano stosowane metody badawcze. W kolejnym rozdziale zamieszczono charakterystykę wykorzystanych surowców z wykorzystaniem technik takich jak spektroskopia FTIR, dyfrakcja rentgenowska, badania SEM – EDS, analiza DSC, analizy termogravimetryczna oraz fluorescencyjna spektrometria rentgenowska XRF. W rozdziale 7 zamieszczono wyniki badań dla wytworzonych materiałów. Przeprowadzono testy takie jak: badania wytrzymałości na zginanie, wytrzymałość na zginanie, obrazowanie skaningową mikroskopią elektronową, EDS, spektroskopia FTIR, pomiary wymywalności pierwiastków i związków chemicznych, pomiary promieniotwórczości, pomiary współczynnika przenikalności ciepła, badania mikrotomografią komputerową, badania dyfrakcji rentgenowskiej, pomiary gęstości. Testy dla wytworzonych materiałów przeprowadzono również po ich ekspozycji na wysokie temperatury. Przeprowadzono także testy odporności ogniowej spienionego panelu geopolimerowego. W rozdziale 8 zamieszczono uproszczoną

analizę cyklu życia wytworzonej płyty geopolimerowej. W rozdziale 9 zamieszczono dyskusję wyników badań. Następnie przedstawiono wnioski końcowe z pracy.

Biorąc pod uwagę trendy proekologiczne oraz uwarunkowania prawne, dobór tematyki jest trafny. Realizowana praca niewątpliwie mieści się w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria materiałowa z elementami inżynierii lądowej.

Uwagi szczegółowe

1. Autor powołuje się na różnego rodzaju dyrektywy i dokumenty dotyczące górnictwa, ochrony klimatu itd. Przytoczone są konkretne daty, np. data wygaszania kopalni. Czy technologia wykorzystująca odpady pogórnice ma szansę zostać wdrożona w terminie zapewniającym ekonomiczność.
2. Strona 24, Doktorantka pisze o wysokiej przepuszczalności. Jaką, a raczej czego przepuszczalność ma na myśli Autorka?
3. Czy porównywano palność opracowanych materiałów z wełną mineralną?
4. Strona 29, Autorka wskazuje, iż właściwości termoizolacyjne tradycyjnie stosowanych materiałów ulegają pogorszeniu w temperaturze około 80 C. Czy ma to jakiekolwiek praktyczne znaczenie?
5. Proszę doprecyzować informację o negatywnym wpływie na zdrowie niektórych produktów izolacyjnych (strona 29). Jak się to ma do opracowanego materiału?
6. Czym podyktowane jest porównywanie opracowanego materiału termoizolacyjnego do betonu komórkowego? (strona 29)
7. Jakie jest najkorzystniejsze zastosowanie opracowanego materiału. To znaczy, jaki konkretnie produkt może zastąpić opracowany geopolimer. Jeśli ma to być płyta elewacyjna to należy przedstawić dodatkowe parametry użytkowe, na przykład odporność na UV, rozszerzalność termiczną, możliwość nanoszenia powłok. Czy Doktorantka ma w planach dalsze badania w tym kierunku?
8. Czy wspomniane odpady pogórnice można inaczej zagospodarować. Czy proponowana technologia jest ekonomicznie korzystniejsza od na przykład stosowania jako materiał do budowy nasypów, niwelacji terenu (generalnie wykorzystanie w budownictwie drogowym oraz hydrotechnicznym).
9. W części eksperymentalnej wkradł się błąd odnośnie pomiaru XRD (z podanych elementów wynika że jeden pomiar trwał kilka miesięcy).

10. Wnioski zamieszczone na końcu pracy są nazbyt rozbudowane. 6 stron to nieco za dużo, brakuje uwypuklenia najistotniejszych wniosków płynących z przeprowadzonych badań. Pozytywnym aspektem jest za to wskazanie przyszłych kierunków badań.

11. W tabeli 9.1 brakuje informacji jakiego rodzaju materiały są ze sobą porównywane (znajdują się tam jedynie dane odnośnie technologii czy wybranych właściwości). Proszę o uzupełnienie.

11. Rysunki 9.1 oraz 9.2 są nie do końca czytelne, szczególnie dotyczy to znaczników w ciemniejszych kolorach. Jest to uwaga na przyszłość, sama struktura rysunku jest poprawna. W legendzie rysunków znajduje się literówka (polstyren zamiast polistyren).

12. W pracy Doktorantka często wskazuje na dobre właściwości mechaniczne wytworzonych materiałów. Jednakże odnosi się do materiałów o różnej charakterystyce i przeznaczeniu. Przykładowo jaki jest sens porównywania właściwości na ściskanie wełny mineralnej i XPS skoro ich przeznaczenie jest zupełnie inne. Podobnie na stronie 152 – proszę wyjaśnić z jakich względów wełna mineralna miałaby przenosić obciążenia ściskające. Jak istotne w tym kontekście są dobre właściwości mechaniczne wytworzonego prototypu?

13. Brakuje jednoznacznego wykazania, jaki produkt może wytworzyć z wykorzystaniem opracowanego materiału.

Uwagi edycyjne

Praca prezentuje wysoki poziom edycyjny, rysunki zamieszczone w pracy są odpowiedniej jakości a tekst, tabele oraz spis literatury poprawnie sformatowane. Pomimo to Autorka nie ustrzegła się różnego rodzaju drobnych błędów edycyjnych, jak na przykład:

- strona 10, brak przecinków przy w punktowaniu (podobnie w innych miejscach, np. strony 36-37),
- strona 12, kropka po latach 70
- strona 13, brak indeksu dolnego CO₂,
- strona 18, niepotrzebna spacja przed stopniami Celsjusza (podobnie w innych miejscach),
- strona 31, brak kropki po celach szczegółowych,
- strona 37, brak indeksu dolnego,
- strona 94, używanie różnego zapisu dla tej samej jednostki: W/mK i W/(mK)
- stosowanie zapisu dla danej wielkości z różną dokładnością zapisu (na przykład wartość λ podawana jest od 2 do 4 miejsca po przecinku,

- błędy w spisie literatury: pozycje: 2, 17, 20, 21, Ponadto w niektórych pozycjach Autorka podaje pełne nazwy czasopism, w innych skróty, w niektórych pozycjach miesiąc wydania pracy jest podany w skrócie, w innych pełną nazwą.

Błędy te są nieliczne i nie wpływają w żaden sposób na pozytywną ocenę pracy.

Podsumowanie i ocena końcowa

Recenzowana praca doktorska charakteryzuje się bardzo wysokim stosunkiem ilości treści „badawczych” do części przeglądowej. Na uwagę zasługuje dobór technik badawczych. Pomimo iż rozprawa ma charakter prac przedwdrożeniowych (co jest naturalną konsekwencją faktu, iż powstała w ramach realizacji projektu finansowanego z programu LIDER), opis prowadzonych badań podstawowych jest na bardzo wysokim poziomie. Analiza FTIR i XRD (w tym analiza Rietvela) zostały przeprowadzone bardzo skrupulatnie. Zestawiając to ze bardzo dużą ilością prac laboratoryjnych nad wytwarzaniem materiałów do badań należy uznać iż praca stanowi spójną całość – od badań podstawowych do wytworzenia prototypu produktu. Z punktu widzenia krajowej gospodarki, tego rodzaju rozprawy doktorskie mają szczególną wartość. Wskazują bowiem na konieczność prowadzenia ukierunkowanych badań podstawowych, które stają się podwalinami pod przyszłe rozwiązania materiałowe czy konstrukcyjne stosowane w przemyśle.

Czytając pracę można dopatrzeć się nieścisłości przy sformułowaniu tezy i celów pracy. Konfrontując tezy i cele pracy z rozdziałem Uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej można mieć wrażenie, iż Doktorantka chciała opracować uniwersalny materiał do wielu zastosowań w budownictwie. Z tego powodu w pracy nie wybrzmiało do czego konkretnie dedykowany byłby opracowany geopolimer.

Przedłożona do recenzji praca doktorska Pani mgr inż. Beaty Figiela stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej. Warunki te w pełni wyczerpują wymogi ustawowe pracom doktorskim. Uwagi krytyczne i wymienione błędy edycyjne nie wpływają na pozytywną ocenę pracy.

Za najważniejsze osiągnięcie pracy należy przyjąć: zaprojektowanie i wytworzenie nowego materiału geopolimerowego charakteryzującego się wysokimi właściwościami mechanicznymi przy jednoczesnej niskiej gęstości oraz względnie wysokich parametrach

termoizolacyjnych. Materiał ten po przeprowadzeniu dalszych badań i udoskonalenia procesu może zostać wykorzystany w przemyśle budowlanym.

W mojej opinii przedłożona do recenzji praca Pani mgr inż. Beaty Figiela pt.: „Synteza i właściwości spienionych materiałów geopolimerowych wytworzonych z wykorzystaniem ubocznych produktów wydobywania węgla kamiennego” spełnia ustawowe wymogi ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20.07.2018 (j.t. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) Art. 187, stanowiąc *oryginalne rozwiązanie problemu naukowego* oraz *oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej*. W związku z powyższym wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Krakowskiej o dopuszczenie rozprawy do dalszego procedowania oraz stawiam wniosek o jej wyróżnienie.

Gzgstochow a, 25.09.2025

