

Prof. dr hab. inż. Barbara Tora

Kraków, 6

września 2025 r.

Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Recenzja rozprawy doktorskiej

Synteza i właściwości spienionych materiałów geopolimerowych wytworzonych

z wykorzystaniem ubocznych produktów wydobywania węgla kamiennego

Autorką rozprawy jest mgr inż. Beata Figiel

Promotorem pracy jest dr hab. inż. Kinga Korniejko, prof. Politechniki
Krakowskiej

Podstawą formalną wykonania niniejszej recenzji jest decyzja Rady Naukowej
Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej z dnia 9 lipca
2025 o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej p. Beaty Figiel.

Wprowadzenie

Recenzowana rozprawa doktorska powstała w ramach realizacji grantu
LIDER X, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Tytuł
projektu: *Pianki geopolimerowe o niskim współczynniku przewodzenia ciepła
produkowane na bazie odpadów przemysłowych jako innowacyjny materiał dla
gospodarki o obiegu zamkniętym.*

Uzasadnienie podjęcia tematu

Tematyka badawcza podjęta przez Doktorantkę dotyczy wykorzystania
odpadów wydobywczych jako surowców do produkcji pianek geopolimerowych o
wysokich właściwościach mechanicznych, niskiej gęstości i posiadających
własności izolacyjne (o niskim przewodnictwie cieplnym).

Geopolimery to grupa nieorganicznych materiałów glinokrzemianowych, które
powstają w wyniku reakcji surowców mineralnych, takich jak popiół lotny czy
metakaolin, w obecności roztworu zasadowego. Są one alternatywą dla cementu i
charakteryzują się wysoką wytrzymałością, trwałością oraz mniejszym wpływem

na środowisko. Nowoczesne, niewykorzystujące cementu, za to pozwalające na zużycie produktów odpadowych, materiały geopolimerowe mogą stanowić atrakcyjną alternatywę dla tradycyjnego betonu.

Wykorzystanie surowców wtórnych (w tym przypadku odpadów wydobywczych), zamiast surowców naturalnych do produkcji geopolimerowych materiałów budowlanych stanowi **innowację o znaczącym wpływie na środowisko** (zmniejszenie ilości składowanych odpadów) a przede wszystkim przyczynia się do rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym.

Materiały geopolimerowe są znane jako alternatywa dla cementu do zastosowań konstrukcyjnych. Autorka wykazała, w przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych, potencjał geopolimerów (powstałych na bazie odpadów wydobywczych) jako materiału termoizolacyjnego. Geopolimery, po procesie spieniania, mogą uzyskiwać wysoce porowatą strukturę, wysoką stabilność termiczną, dodatkowo są niepalne oraz możliwe do wytwarzania przy pomocy technologii efektywnej kosztowo i bezpiecznej dla środowiska.

Autorka wykazała, że właściwości geopolimerów (które można regulować) powodują, że mogą one być doskonałą alternatywą dla konwencjonalnych materiałów termoizolacyjnych.

Tradycyjne materiały termoizolacyjne charakteryzują się ograniczeniami technicznymi, najczęściej są to materiały łatwopalne, a ich właściwości spadają w wyniku działania temperatury zbliżonej do 80°C, dodatkowo przy kontakcie z ogniem wydzielają toksyczne gazy powodując zagrożenie dla zdrowia; z kolei nieorganiczne materiały termoizolacyjne stanowią zagrożenie dla ludzi, a ich proces produkcyjny jest złożony i wymaga wysokich temperatur spiekania.

Układ pracy

Rozprawa doktorska jest zbudowana na dobrze skomponowanym planie badań. Rozprawa rozpoczyna się od analizy danych literaturowych dotyczących odpadów górniczych, ich ilości, właściwości, możliwości wykorzystania do produkcji geopolimerów i kolejno możliwości modyfikacji właściwości geopolimerów pod kątem izolacyjności termicznej i ognioodporności. W wykazie wykorzystanej literatury Autorka przytoczyła 250 pozycji literaturowych, dobrze wykorzystanych w pracy.

W części doświadczałnej Autorka przedstawiła sposób realizacji celu pracy jakim była synteza spienionych materiałów geopolimerowych na bazie ubocznych produktów wydobywania węgla oraz ich charakterystyka pod kątem zastosowania w budownictwie jako płyty elewacyjne o podwyższonych właściwościach izolacyjnych dla zastosowania w nowoczesnym budownictwie. Rozprawa liczy 197 stron, w tym przegląd literatury 32 strony, 43 strony opisu badań. 40 stron analizy wyników.

Doktorantka zrealizowała założony cel pracy realizując kolejne etapy, przeprowadzając kolejne badania:

- określenie mechanizmów przemian zachodzących w surowym materiale wydobywczym w wyniku oddziaływania procesów mechanicznych i termicznych w procesie przygotowania procesu geopolimeryzacji (zwiększenia jego reaktywności),
- analiza mechanizmów reakcji zachodzących podczas syntezy materiałów glinokrzemianowych, w tym zmian w mikrostrukturze materiału.
- dobór proporcji aktywatora w procesie syntezy geopolimerów z dodatkami porotwórczymi, w celu otrzymywanie trwałej struktury spienionej.

Realizując pracę Doktorantka osiągnęła cele naukowe:

- określenie mechanizmów przemian zachodzących w surowym materiale (pochodzącym z wydobycia węgla kamiennego) w wyniku oddziaływania procesów mechanicznych i termicznych w trakcie przygotowania surowca do procesu geopolimeryzacji (zwiększenia jego reaktywności),
- analizę mechanizmów reakcji zachodzących podczas syntezy materiałów glinokrzemianowych z wykorzystaniem surowców odpadowych (w tym zmian w mikrostrukturze materiału),
- opracowanie receptury procesu geopolimeryzacji (przygotowanie materiału, dodatek aktywatora i substancji porotwórczych).
- opracowanie metody wytwarzania wysokoporowatych materiałów geopolimerowych o niskiej przewodności cieplnej (0,1–0,2 W/mK), w oparciu o chemiczne środki porotwórcze.
- opracowanie receptury kompozycji materiałowej o ognioodporności i odporności na wysokie temperatury na bazie odpadu górniczego z założeniem uzyskania ognioodporności na poziomie co najmniej REI30.

Do badań Autorka wykorzystwała materiał odpadowy (uboczne produkty wydobycia węgla kamiennego) z czterech kopalń: Sobieski, Murcki – Staszic, Wujek i Wieczorek.

Doktorantka wykazała doskonałe przygotowanie w zakresie planowania i prowadzenia badań naukowych dotyczących materiałów geopolimerowych, w szczególności w zakresie procesów przygotowania materiału i prowadzenia badań analitycznych.

Oryginalnym osiągnięciem Autorki jest

- opracowanie metody wytwarzania wysokoporowatych materiałów geopolimerowych o niskiej przewodności cieplnej (ok. 0,1–0,2 W/mK) z wykorzystaniem chemicznych środków porotwórczych,
- opracowanie receptury materiału geopolimerowego na bazie odpadów wydobywczych o wysokiej ognioodporności i odporności na wysokie temperatury.

Autorka wykazała, że odpady z procesu wydobycia węgla kamiennego, takie jak skała płonna, mogą być użytecznym materiałem w procesie syntezy spienionych materiałów geopolimerowych o właściwościach porównywalnych lub lepszych niż komercyjne izolacje termiczne np. bloczki z betonu komórkowego.

Otrzymane przez Doktorantkę materiały kompozytowe charakteryzują się przewodnością cieplną rzędu 0,1–0,2 W/mK, gęstością objętościową od 500 kg/m³ do 900 kg/m³ oraz ognioodpornością na poziomie REI30.

Takie parametry umożliwią zastosowanie otrzymanych materiałów w płytach elewacyjnych o podwyższonych własnościach izolacyjnych.

Doktorantka zaproponowała dalsze badania w zakresie geopolimerów - modyfikacje składu z użyciem innych domieszek (popiół lotny, żużel hutniczy, metakaolinit) w celu optymalizacji właściwości reologicznych mieszanki, parametrów mechanicznych i mikrostruktury, ocena odporności chemicznej (trwałość materiałów w środowiskach agresywnych (kwaśnych, siarczanowych, chlorkowych).

Recenzowana rozprawa doktorska wykazuje umiejętność p. mgr inż. Betaty Figieli samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Doktoranta jest słuchaczem szkoły doktorskiej na Politechnice Krakowskiej. Jest Doktorantką niezwykle aktywną naukową. Przedstawiona rozprawa doktorska została zrealizowana w ramach projektu Lider. Projekty Lider są realizowane przez młodych naukowców (pod kontrolą Promotora rozprawy doktorskiej, który pełni funkcję Kierownika Projektu).

Doktorantka wykazała dobre przygotowanie do prowadzenia projektu badawczego. Zaprojektowała szeroki wachlarz badań, które realizowała w jednostce macierzystej (Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki) a także w laboratoriach obcych. Główną część pracy stanowią badania nad doбором receptury geopolimerów i badanie ich właściwości. Doktorantka wykazała umiejętność analizy i prezentacji wyników badań technologicznych, które prowadziła.

Zakończywszy z sukcesem część badawczą Doktorantka przeprowadziła Analizę Cyklu Życia (LCA) otrzymanych produktów. W tej części pracy wykazała doskonałą znajomość metod oznaczania oddziaływania na środowisko procesów i produktów. Doktorantka wykazała znajomość technik procesów zarządczych i umiejętność oceny potencjalnych zagrożeń środowiska. Istotą LCA, wykorzystaną przez Doktorantkę, jest zarówno ocena wyniku końcowego badanego procesu technologicznego jak również oszacowanie i ocena konsekwencji całego procesu dla środowiska.

Doktoranta opublikowała w znaczących czasopismach 7 artykułów dotyczących tematy pracy doktorskiej oraz 21 innych publikacji naukowych. Wzięła udział w realizacji 6 projektów badawczych a także przedstawiła prezentacje na trzynastu konferencjach naukowych.

Uwagi

1. Autorka wykazała w spisie literatury 250 pozycji (co zgodnie z Jej uwagą, stanowi ok. 1 promila publikacji światowych). Oczywiście jest, że zespół Politechniki Krakowskiej z Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki jest wiodącym w Polsce, szkoda, że nie wskazała innych publikacji krajowych - przykładowo autorów z AGH (Jan Małolepszy, Jan Deja z zespołem), Politechniki Śląskiej (Marcin Górski i in, Krystyna Rajczyk z ICiMB z Opola, Tomasz Błaszczński z Politechniki Koszalińskiej, Stefania Grzeszczyk z Politechniki Opolskiej i in.)
2. Ciekawą częścią rozprawy jest przeprowadzona analiza LCA dla zagadnienia:
Przegroda termoizolacyjna ze spienionego geopolimeru wytworzonego z materiału odpadowego skały płonnej z kopalni Wieczorek.
Autorka wykazała, że emisja CO₂ jest istotnie mniejsza – w kolejnych badaniach proponuję uwzględnić ślad węglowy aktywatora, spieniacza i innych dodatków – ciekawe do porównania mogą być wyniki w publikacji S. Grzeszczyk (doi.org/10.32047/CWB.2021.26.2.7).
3. Od kilku lat kopalnie węgla kamiennego zaczęły prowadzić badania nad możliwościami wykorzystania odpadów oraz budować instalacje technologiczne do produkcji różnych kruszyw, które mogą być obecnie wykorzystywane do takich celów jak drogownictwo, budownictwo hydrotechniczne (nasypy, obwałowania rzek, tamy itp.), elementy betonów, zapraw i nawierzchni (w tym jako składnik mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń), wypełnienia i bezpośredni materiał budowlany.
4. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 2 stycznia 2007 r. [Dz.U. 2007 nr 4 poz. 29](#) w sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych potasu K-40, radu Ra-226 i toru Th-228 w surowcach i materiałach..... zostało uznane za uchylone, obowiązuje Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 17 grudnia 2020 r. Dz.U. 2021 poz. 33.

Ocena końcowa

- 1) rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną p. Beaty Figieli, ubiegającej się o stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa
- 2) rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez p. Beatę Figieli ubiegającą się o nadanie stopnia doktora;
- 3) rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników badań naukowych w sferze gospodarczej

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Jednocześnie wnioskuję o **wyróżnienie rozprawy doktorskiej** mgr inż. Beaty Figieli pt: *Synteza i właściwości spienionych materiałów geopolimerowych wytworzonych z wykorzystaniem ubocznych produktów wydobywania węgla kamiennego*

Uzasadnianie propozycji wyróżnienia rozprawy doktorskiej p. mgr inż. Beaty Figieli

Pani Beata Figieli przedstawiła kompleksowe rozwiązanie oryginalnego zagadnienia badawczego (od badania odpadów węglowych poprzez opracowanie receptury polimerów o specjalnych właściwościach do badania właściwości geopolimerów). Jednocześnie przeprowadziła analizę cyklu życia uzyskanych produktów. Wykazała doskonałe przygotowanie do realizacji tak szerokiej tematyki badawczej.

Świadczy o tym między innymi, fakt że temat był zrealizowany w ramach projektu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju LIDER, w którym Doktorantka była głównym wykonawcą. LIDER jest programem skierowanym do młodych naukowców. Jego celem jest poszerzenie kompetencji młodych naukowców w samodzielnym planowaniu prac badawczych oraz zarządzaniu własnym zespołem badawczym, podczas realizacji projektów badawczych, których wyniki mogą mieć zastosowanie praktyczne i posiadają potencjał wdrożeniowy. Cel projektu LIDER został w pełni zrealizowany.

Doktorantka osiągnęła cele badawcze i jednocześnie cele społeczne, środowiskowe i gospodarcze: wniosła wkład w gospodarkę o obiegu zamkniętym, w tym redukcję odpadów poprzez ich wykorzystanie jako surowca do produkcji spienionych geopolimerów oraz wskazała możliwość osiągnięcia korzyści społeczno-ekologiczne przez zastosowanie materiałów odpadowych i produktów ubocznych co skutkuje zmniejszeniem Oddziaływania na środowisko.

Wyniki badań przedstawiła w znaczących czasopismach oraz na prestiżowych konferencjach (łącznie blisko 30 publikacji i aktywny udział w 13 konferencjach).

Barbara Tota