Imię i nazwisko recenzenta:
Prof. dr hab. inż. Łukasz Kaczmarek
Dane adresowe:
Politechnika Łódzka
Wydział Mechaniczny
Instytut inżynierii Materiałowej

Łódź, 07 września 2026 r.
(data i miejsce)

Recenzja pracy doktorskiej

Mgr inż. Agnieszki Przybek
(imię i nazwisko ~~doktoranta /~~ doktorantki)

pod tytułem: „Badania mechanizmów przenikania ciepła w warstwowych kompozytach na bazie glinokrzemianów oraz włókien pochodzenia naturalnego”

przygotowanej pod kierunkiem:

dr hab. inż. Michała Łacha prof. PK
(imię i nazwisko promotora)

1. Podstawa opracowania

Ocena została wykonana na zlecenie Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej uchwałą z dnia 10 czerwca 2025, nr I-01.0021.7.2026.

Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.)

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

1) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Wymogi budownictwa pasywnego na przestrzeni ostatnich lat stanowią nie lada wyzwanie dla deweloperów już na etapie projektowania budynków. Obecnie fakt ten wymuszany jest Dyrektywą EPBD 2026, która zakłada, że do roku 2050 sektor budowlany osiągnie pełną neutralność energetyczną. Narzuca to konieczność mi.in. wykorzystywania nowoczesnych rozwiązań technologiczno-materiałowych przy możliwie minimalnej emisji CO_2. Z drugiej strony utrzymanie konkurencyjności sektora budowlanego wymaga stosowania rozwiązań ekonomicznie uzasadnionych. Dlatego większość rozwiązań opracowanych w laboratoriach nie znajduje uzasadnienia rynkowego.

Fakt ten nastręcza wiele problemów szczególnie w kontekście np. utrzymania zadanych, szeroko rozumianych finalnych właściwości fizykochemicznych elementów budowlanych przy jednoczesnym generowaniu niższej emisji CO_2 do atmosfery w trakcie ich produkcji.

Jednym z rozwiązań jest obecnie zastosowanie dynamicznie rozwijanych geopolimerów. Natomiast nadal ustępują one właściwościami fizykochemicznymi obecnie produkowanym materiałom budowlanym, a ich właściwości silnie uzależnione są od składu wykorzystywanych substratów, które silnie różnią się w zależności od ich obszaru pozyskiwania.

Przykładem szeroko prowadzonych badań w obszarze geopolimerów są m.in. prace:

1.Zespołu profesora Petra Loudy z Uniwersytetu w Libercu, Czech.

2. Zespołu profesora Kriven'a z University of Illinois Urbana-Champaign, Center for Geopolymer Research and Applications USA.

3. Zespołu profesora Ippei Maruyama z Concrete Engineering Laboratory, Department of Environmental Engineering and Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Japan.

4. Zespołu profesora Jannie van Deventer z Department of Infrastructure Engineering, Geopolymer and mineral processing The University of Melbourne, Australia.

Fakt podejmowania niniejszej tematyki przez wiele ośrodków na świecie wyraźnie wskazuje na ważność problemu i konieczność dalszego rozwijania geopolimerów, w tym ich struktury o zadanej porowatości, a także optymalizacji wprowadzania dodatków umacniających stanowiących np. włókna naturalne.

Analiza stanu literatury została opisana szczegółowo z uwzględnieniem klasyfikacji glinokrzemianów aktywowanych alkalicznie, stanowiących główny przedmiot badań oraz ich właściwości fizykochemiczne. Szeroko przeanalizowano rodzaje włókien naturalnych (m.in. len, konopie, juta, sizal, kokos, bawełna, oraz bambus) jako materiał umacniający wytwarzane kompozyty, skupiając się na ich wadach i

zaletach. Doktorantka opisała także zagadnienia techniczno-materiałowe przegród budowlanych oraz mechanizmy przenikania ciepła. Natomiast można się doszukać pewnych aspektów, które wymagają uszczegółowienia lub omówienia:

1. Strona 7 oraz 15. Co zdaniem doktorantki oznacza pojęcie odnawialność w odniesieniu do włókien naturalnych?

2. Strona 12. Cyt.:

   „Podczas dojrzewania materiału, struktura glinokrzemianowa stopniowo się zagęszcza w wyniku polikondensacji jednostek strukturalnych i reorganizacji sieci [20]. W trakcie tego procesu wydziela się woda reakcyjna, która początkowo stabilizuje środowisko zasadowe i uczestniczy w hydratacji kationów równoważących ładunek. Z czasem woda ta przemieszcza się do porów żelowych i kapilarnych, co wpływa na rozwój mikrostruktury porowatej materiału [21]. Warunki wytwarzania mają istotny wpływ na przebieg tych procesów. Wyższa temperatura utwardzania przyspiesza kondensację i rozwój polimeryzacji sieci glinokrzemianowej, natomiast dłuższy czas dojrzewania sprzyja dalszej reorganizacji i stabilizacji struktury [22].”

   Czy i jak niniejsze zjawisko może być również wykorzystane do kształtowania struktury porowatej?

3. Strona 21 Doktorantka opisuje, że cyt.:

   „W budynkach o podwyższonym standardzie energetycznym udział strat przez przegrody jest mniejszy, ale nadal stanowi główną część bilansu cieplnego. Największe straty ciepła przypadają zwykle na ściany zewnętrzne (20-30%), dachy i stropy (15-25%) oraz podłogi na gruncie (10-15%) [60].”

Jaki w tym przypadku kształtują się straty ciepła w odniesieniu do stolarki okiennej i drzwiowej?

4. Strona 26. Cyt.:

   „dlatego materiały o drobnej i zamkniętej porowatości mają dobre właściwości termoizolacyjne”

   Proszę uszczegółowić w tym przypadku kwestie „*drobnej porowatości*”.

5. Strona 29 Cyt.:

   „Paradoks ten polega na tym, że zwiększenie liczby interfejsów lub stopnia warstwowania nie zawsze podnosi całkowity opór cieplny, lecz w określonych warunkach może zwiększać efektywna przewodność cieplna układu”

   Proszę o zdefiniowanie pojęcia „interfejs”.

W pracy, za niezwykle cenne uważam zamieszczenie syntetycznego, krytycznego podsumowania stanu wiedzy w kontekście rozwoju materiałów pod kątem osiągnięcia efektywności energetycznej w branży budowlanej. Doktorantka wyraźnie wskazała istniejące problemy szczególnie z punktu widzenia konieczności zastąpienia materiałów wytwarzanych na bazie cementów i towarzyszącą ich produkcji, wysoką emisję CO_2 do atmosfery. Z drugiej strony wykazała perspektywę zastosowania włókien naturalnych w tworzeniu na ich bazie kompozytów. Jednak, jak podkreśliła Doktorantka, nadal wiele problemów nastręcza odpowiednie dopasowanie materiałów na poziomie molekularnym przy jednoczesnym wytworzeniu zadanej struktury porowatej.

Na podstawie powyższego uważam, że rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w dyscyplinie inżynieria materiałowa, zatem spełnia w niniejszej części warunki ustawowe.

Pomijając informacje o technicznym układzie recenzowanej pracy (obrona doktoratu ma charakter publiczny z pełnym dostępem do pracy i recenzji) przejdę do jej oceny merytorycznej.

Teza recenzowanej pracy dotyczy:

Cyt.: „*Materiały geopolimerowe, dzięki swojej nieorganicznej i ogniotrwałej strukturze, mogą pełnić skuteczną funkcję ochronną wobec naturalnych włókien roślinnych stosowanych w przegrodach budowlanych jako izolacje, ograniczając ich degradację termiczną oraz podatność na zniszczenie w warunkach podwyższonych temperatur i oddziaływania pożaru. Jednocześnie odpowiednie zaprojektowanie wielowarstwowego układu izolacyjnego, w którym ta sama ilość materiału włóknistego jest rozdzielona na kilka warstw o mniejszej grubości, prowadzi do poprawy właściwości izolacyjnych całej zaprojektowanej przegrody w porównaniu z rozwiązaniami dwuwarstwowymi. Efekt ten wynika z występowania dodatkowego oporu cieplnego na styku poszczególnych warstw materiałowych (oporu kontaktowego), który ogranicza transport ciepła oraz intensyfikuje rozpraszanie strumienia cieplnego. W konsekwencji, wielowarstwowe przegrody budowlane na bazie geopolimerów z izolacją z włókien naturalnych umożliwiają osiągnięcie wyższej efektywności termicznej oraz zwiększonego poziomu bezpieczeństwa pożarowego bez konieczności zwiększania całkowitej ilości materiału izolacyjnego* ".

Dodatkowo Doktorantka zdefiniowała:

Cel naukowy pracy dotyczący *„określenia doświadczalne określenie wpływu sposobu rozmieszczenia warstwy izolacyjnej z włókien naturalnych, w szczególności jej podziału na kilka warstw o mniejszej grubości, na właściwości izolacyjne wielowarstwowej przegrody budowlanej na bazie materiałów geopolimerowych."*

Oraz **cel utylitarny** *„opracowanie oraz weryfikacja koncepcji materiałowo-konstrukcyjnej wielowarstwowych przegród budowlanych, stanowiących realną i funkcjonalną alternatywę dla konwencjonalnych rozwiązań opartych na cementach portlandzkich oraz izolacjach z tworzyw sztucznych lub wełny mineralnej."*

W ramach badań, Doktorantka przeprowadziła pełną charakterystykę morfologii, budowy chemicznej i fazowej wykorzystanych materiałów przeznaczonych do syntezy kompozytów warstwowych. Określiła ich parametry strukturalne, w tym całkowitą porowatość, a także zakres średnic porów. Jednocześnie określiła morfologię, budowę chemiczną oraz parametry fizyczne stosowanych włókien naturalnych, wykorzystanych do wykonanych na ich bazie mat, w tym określiła ich przewodność cieplną.

Tak scharakteryzowane materiały bazowe stanowiły substrat wytworzonych prototypowych materiałów kompozytowych zgodnie ze schematem 22 zamieszczonym na str. 101.

W oparciu o przeprowadzone badania Doktorantka wykazała, że poprawę parametru termoizolacyjnego w porównaniu do materiału referencyjnego, notuje o ponad 50% w przypadku zastosowania:

a) maty kokosowej (kompozyt zawierający 10 warstw izolacji składającej się z maty kokosowej ze zbrojeniem o średnicy 8 mm – próbka 10K_Z8) oraz

b) maty z filcu lniano-konopnego (kompozyt zawierający 12 warstw izolacji składającej się z filcu lniano-konopnego ze zbrojeniem o średnicy 8 mm – próbka 12L-K_Z8).

Natomiast próbki te charakteryzują się ponad dwukrotnie niższą wytrzymałością na zginanie i wytrzymałością na ściskanie w przypadku zbrojenia jednym prętem wzdłuż próbki.

Na podstawie powyższego Doktorantka do dalszych badań wybrała jako zbrojenie matę z filcu lniano-konopnego argumentując ten fakt jako lokalny zasób w potencjalnym łańcuch dostaw rynkowych. Wytworzyła 14 wariantów próbek opisanych na schematycznie rys. 27, str. 124 oraz w tab. 24 str. 125. Wykazała, że:

a) w zależności od ilości i ułożenia warstw spadek wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do próbki referencyjnej wynosi zaledwie około 10% (próbka K1M-2P-R- kompozyt zawierający 1 matę lniano-konopną, mata obłożona była płytami budowlanymi, warstwowo rozłożone),

b) opór cieplny oraz współczynnik przenikania ciepła U może wynosić nawet odpowiednio 1,02 i 0,98 dla próbki K4M-2P-Ś - kompozyt zawierający 4 maty lniano-konopne, izolacja obłożona była 2 płytami budowlanymi, izolacja umieszczona na środku kompozytu (w porównaniu do próbki

referencyjnej, dla której parametry te wynoszą odpowiednio 0,32 [m2*K)/W] i 3,16 [W/(m2*K)].

c) Przeprowadzone badania w odpowiednio w temperaturze: 100, 400 i 600°C potwierdziły stabilność termiczną kompozytu za sprawą zastosowanej maty geopolimerowej. Zatem badania wykazały, że możliwe jest opracowanie takiego materiału, który charakteryzuje się relatywnie niskim współczynnikiem przewodzenia ciepła, akceptowalnymi właściwościami mechanicznymi oraz jest stabilny termodynamicznie w zakresie badanych temperatur.

Tak przebadane pole parametrów techniczno-materiałowych umożliwia wybór materiału i jego struktury, który stanowi kompromis analizowanych właściwości fizycznych. Fakt ten potwierdza realizację ważnego kroku w kierunku potencjalnego, komercyjnego wykorzystania opracowanej technologii.

O ile wyniki pracy stanowią ważny aspekt poznawczo-technologiczny to następujące kwestie wymagają wyjaśnienia lub uszczegółowienia:

1. Strona 45. Do których czynników zakwalifikowałaby Pani geometrię włókna, kwestia ta została pominięta w schemacie klasyfikacji czynników eksperymentalnych.

2. Strona 54. Na jakiej podstawie określono szybkości grzania i przystanki temperaturowe w badaniu oceny zachowania materiałów w podwyższonych temperaturach? Czy badano naprężenia w próbkach? Ewentualne reakcje chemiczne?

3. Jak Pani ocenia możliwość skalowania technologii w przypadku zróżnicowanego składu fazowego, chemicznego i morfologii zastosowanych popiołów?

4. Czy widzi Pani możliwość wykorzystania sieci neuronowych lub innych analitycznych narzędzi eksperckich do przewidywania właściwości fizykochemicznych wytwarzanych kompozytów na bazie geopolimerów i włókien naturalnych?

5. Strona 74. Cyt.:

   „Metakaolin nie został uwzględniony w dalszym etapie ze względu na wysoka cenę. Ogranicza to zasadność jego zastosowania w kontekście potencjalnych wdrożeń technologicznych”.

   Czy może Pani rozwinąć argumentację?

6. Strona 76. Cyt.:

   „powierzchnia właściwa w zakresie 5-7 m^2/g jest typowa dla popiołów lotnych z dużym udziałem fazy amorficznej. Wartości te wiążą się także z obecnością rozwiniętej mikro- i mezoporowatości"

   Jeśli tak jest jak Pani pisze to ta wartość powinna być o dwa rzędy wielkości wyższa. Proszę o komentarz.

7. W odniesieniu do badania zachowania materiałów w podwyższonych temperaturach str. 142. Bezwzględnie są to bardzo istotne badania natomiast na ile będą one odzwierciedlały rozkład temperatury dla pełnoskalowych ścian.

Przedłożone do oceny wyniki prowadzonych prac posiadają utylitarny charakter, o czym świadczy:

a) zidentyfikowany przez Doktorantkę aktualny problem w rozwoju technologii wytwarzania materiałów kompozytowych na bazie matrycy geopolimerowej i umacnianych włóknami naturalnymi o właściwościach izolacyjnych i akceptowalnych właściwościach mechanicznych oraz

b) przeprowadzenie badań szeregu kompozycji materiałowych prowadzących do określenia pola parametrów technologicznych determinujących finalne kompozycje materiałowe ich właściwości i perspektywę aplikacji rynkowej uwzględniającej emisje CO_2.

Zatem recenzowana praca doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

3. Wniosek końcowy.

Podsumowując, uważam, że recenzowana praca wpisuje się w światowy nurt badawczy dotyczący opracowania nowoczesnych materiałów geopolimerowych o dedykowanych właściwościach fizykochemicznych stanowiących potencjalny materiał izolacyjny dedykowany dla branży budowlanej.

Przedłożone do oceny wyniki badań posiadają wyraźny charakter utylitarny. W szczególności na podkreślenie zasługuje:

a) zidentyfikowanie i rozwiązanie istotnego problemu materiałowo-konstrukcyjnego, jakim jest jednoczesne uzyskanie korzystnych właściwości termoizolacyjnych, mechanicznych i termicznych w wielowarstwowych przegrodach budowlanych z wykorzystaniem mat z włókien naturalnych i matrycy geopolimerowej,

b) przeprowadzenie systematycznych badań różnych konfiguracji materiałowych i konstrukcyjnych, pozwalających na określenie wpływu liczby i rozmieszczenia warstw izolacyjnych oraz sposobu ich zbrojenia na właściwości użytkowe kompozytów,
c) wskazanie materiału na bazie filcu lniano-konopnego jako rozwiązania o szczególnym potencjale aplikacyjnym, również ze względu na możliwość wykorzystania lokalnych zasobów w potencjalnym łańcuchu dostawo,
d) określenie pola parametrów techniczno-materiałowych umożliwiającego dobór rozwiązania stanowiącego kompromis pomiędzy wymaganiami dotyczącymi izolacyjności cieplnej, właściwości mechanicznych i stabilności termicznej, co stanowi istotny krok w kierunku praktycznego wykorzystania opracowanej technologii.

Zatem recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a uzyskane wyniki mają jednocześnie istotny potencjał aplikacyjny. Przeprowadzone badania pozwoliły nie tylko na określenie wpływu sposobu rozmieszczenia warstwy izolacyjnej z włókien naturalnych na właściwości wielowarstwowej przegrody budowlanej, ale również na opracowanie i eksperymentalną weryfikację koncepcji materiałowo-konstrukcyjnej, która może stanowić podstawę dalszych prac nad wdrożeniem tego typu rozwiązań w budownictwie.

Cel i teza pracy został osiągnięty. Uzyskane wyniki stanowią przyczynek do dalszych badań i analiz, w tym badań z wykorzystaniem innych dodatków w tym wpływu składu chemicznego stosowanych substratów, a także zastosowania np. sieci neuronowych w projektowaniu materiałów o z góry określonych właściwościach.

Ponadto Doktorantka posiada ponadprzeciętny dorobek naukowy, który stawia ją w gronie wybitnych młodych naukowców dyscypliny inżynieria materiałowa.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania 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.



Signed by / Podpisano przez:

Łukasz Piotr Kaczmarek
Politechnika Łódzka

Date / Data: 2026-09-07 08:50