Kraków, 4 września 2026 r.

dr hab. inż. Artur Dyczko, prof. IGSMiE PAN
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN
ul. J. Wybickiego 7A, 31-261 Kraków
tel. 604903556; e-mail: arturdyczko@min-pan.krakow.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Agnieszki Przybek

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

Rozprawa przygotowana na Politechnice Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki, pod kierunkiem dr. hab. inż. Michała Łacha, prof. PK. Kraków 2026.

Podstawa opracowania recenzji: pismo nr 1-01.510.7.3.2026

Recenzja została wykonana na podstawie uchwały Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej nr 13 z dnia 10 czerwca 2026 r. (znak: I-01.0021.7.2026) powołującej mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Przybek oraz zgodnie z art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.).

Rozprawa została przygotowana w Szkole Doktorskiej Politechniki Krakowskiej. Przedmiot oceny mieści się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Podstawę oceny stanowią pełny tekst rozprawy oraz odrębnie przekazane streszczenie w języku polskim. Numery stron, tabel, rysunków i pozycji bibliograficznych przywołane w recenzji odnoszą się do numeracji rozprawy. Ocenę przeprowadzono w świetle art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jedn. Dz.U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.), rozpatrując oryginalność rozwiązania problemu naukowego, wiedzę teoretyczną Doktorantki oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Opanowanie warsztatu eksperymentalnego i poprawność interpretacji wyników traktuję jako podstawowe przesłanki tej oceny.

1. Charakterystyka formalna pracy oraz jej układ

Przedłożona rozprawa liczy 209 stron i ma postać monograficznej pracy pisemnej w języku polskim. Obejmuje dziesięć numerowanych rozdziałów, wykaz oznaczeń, streszczenia w językach polskim i angielskim, bibliografię zawierającą 241 pozycji, spisy 39 tabel i 44 rysunków oraz wykaz dorobku naukowego Autorki. Zasadniczy wywód kończy się na stronie 180, streszczenia zamieszczono na stronach 181–182, bibliografię na stronach 183–193, a wykaz dorobku na stronach 198–209.

Układ pracy odpowiada tokowi postępowania eksperymentalnego. Po wprowadzeniu i analizie stanu wiedzy Autorka uzasadnia wybór tematyki, przedstawia tezę, cele i plan badań, następnie opisuje metodykę oraz dobór surowców. Rozdział ósmy, zajmujący strony 75–175, obejmuje trzy etapy: charakterystykę materiałów wyjściowych, wytwarzanie i badanie kompozytów prototypowych oraz ocenę rozwiązań rozwiniętych na podstawie wyników wcześniejszych doświadczeń. Rozprawę zamykają wnioski i perspektywy dalszych prac.

Taką konstrukcję oceniam jako zasadniczo właściwą. Pozwala ona prześledzić, dlaczego do kolejnych etapów wybrano określone surowce, zmieniono sposób zbrojenia i wprowadzono przekładki stabilizujące izolację. Mniej przekonujący jest podział charakterystyki surowców między rozdział siódmy a część 8.1. Materiał ten można było uporządkować bardziej zwarto. Podobnie kilkakrotne omawianie tych samych danych kolejno pod tabelą, wykresem i w podsumowaniu nie zawsze wnosi nowy element interpretacyjny.

Strona edytorska jest czytelna. Dokumentacja fotograficzna ułatwia ocenę sposobu wytwarzania próbek i postaci ich zniszczenia. Tabele zawierają dużo użytecznych danych, choć nie zawsze konsekwentnie podano liczebność serii i charakter miar rozrzutu. Tekst wymaga ograniczenia powtórzeń, korekty oznaczeń i kontroli jednostek. Są to uchybienia o różnym ciężarze: część ma charakter językowy, część wpływa na możliwość odtworzenia obliczeń i dlatego została omówiona dalej jako kwestia merytoryczna.

2. Ocena podjętego tematu rozprawy doktorskiej

Podjęty problem jest uzasadniony zarówno naukowo, jak i technologicznie. Zestawienie mineralnej fazy nośnej z porowatą izolacją pochodzenia roślinnego wymaga pogodzenia sprzecznych właściwości. Zwiększanie udziału izolacji może zwiększać opór cieplny, lecz zmniejszać sztywność i wytrzymałość. Z kolei zespolenie warstw zapewniające przenoszenie obciążeń może zmieniać strukturę maty i tworzyć dodatkowe drogi przepływu ciepła. Badanie tych zależności mieści się w problematyce inżynierii materiałowej, szczególnie w relacji technologia–struktura–właściwości.

Znaczenie podjętej tematyki wiąże się również z możliwością wykorzystania surowców odpadowych i odnawialnych w materiałach budowlanych. W tym ujęciu badania wpisują się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym i ograniczania oddziaływania produkcji materiałów na środowisko. Jest to uzasadnienie kierunku prac, natomiast wykazanie

przewagi konkretnego kompozytu wymaga porównania rozwiązań o równoważnych właściwościach użytkowych. Interdyscyplinarny zakres rozprawy służy właśnie takiej wielokryterialnej ocenie.

3. Charakterystyka merytoryczna rozprawy

Przegląd literatury i przygotowanie naukowe Doktorantki

Przegląd literatury obejmuje zagadnienia istotne dla podjętego problemu: chemię materiałów aktywowanych alkalicznie, budowę włókien lignocelulozowych, funkcjonowanie przegród budowlanych, transport ciepła i uwarunkowania środowiskowe. Uwzględniono zarówno prace podstawowe, jak i opracowania z lat 2023–2026. W zakresie geopolimerów i kompozytów włóknistych baza literaturowa jest szeroka. Obecność starszych monografii nie stanowi wady, jeżeli służą przedstawieniu utrwalonych podstaw fizycznych i materiałowych.

Zastrzeżenia budzi natomiast stopień krytycznego wykorzystania źródeł. W wielu miejscach stwierdzenie zgodności z literaturą zastępuje porównanie warunków badań, składu, gęstości lub wilgotności materiałów. Szczególnie w analizie transportu ciepła należało dokładniej rozdzielić wyniki dotyczące styków zwartych ciał, ośrodków ziarnistych i porowatych mat włóknistych. Nie można bez dodatkowego uzasadnienia przenosić zależności między tymi układami. W części środowiskowej występują również niedopasowania odsyłaczy: pozycja [234], przywołana jako źródło wskaźnika emisji dla filcu lniano-konopnego w tabeli 37, jest raportem dotyczącym elektroenergetyki, natomiast pozycja [236] dotyczy betonu zbrojonego włóknem szklanym, a nie prętów szklano-epoksydowych. Wymaga to sprawdzenia przyporządkowania źródeł do danych.

Przygotowanie naukowe Doktorantki znajduje dodatkowe potwierdzenie w wykazie dorobku na stronach 198–202: 39 publikacjach, obejmujących prace jednoautorskie dotyczące włókien naturalnych i geopolimerów, oraz kierowaniu w latach 2023–2026 projektem programu „Perły Nauki” dotyczącym porowatych glinokrzemianów aktywowanych alkalicznie. Tematyczna ciągłość tej aktywności wzmacnia ocenę wiedzy i samodzielności Autorki, nie zastępując oceny wyników samej rozprawy.

Cel, teza i hipotezy badawcze

Teza sformułowana na stronie 42 łączy dwa odrębne zagadnienia. Pierwszym jest możliwość ograniczenia degradacji termicznej włókien przez osłonę geopolimerową. Drugim – poprawa izolacyjności po rozdzieleniu tej samej ilości materiału włóknistego na większą liczbę warstw, przypisana wzrostowi oporu kontaktowego. Z punktu widzenia weryfikacji doświadczalnej korzystniej byłoby przedstawić je jako dwie hipotezy, z osobnymi kryteriami potwierdzenia.

Cel naukowy został określony dostatecznie jasno: rozpoznanie wpływu konfiguracji izolacji na właściwości cieplne i ocena roli granic międzywarstwowych. Cel użytkowy, obejmujący opracowanie kompozytu do zastosowań w przegrodach, logicznie rozwija ten zamysł. Zakres deklaracji jest jednak miejscami szerszy niż zakres przeprowadzonych pomiarów. Dotyczy to

zwłaszcza porównania skuteczności ochronnej geopolimeru z betonem cementowym, oceny bezpieczeństwa pożarowego i identyfikacji poszczególnych mechanizmów transportu ciepła.

Oryginalnego wkładu Autorki upatruję w opracowaniu i doświadczalnym porównaniu określonej rodziny kompozytów warstwowych, ze zróżnicowanym układem izolacji i zbrojenia, oraz w rozpoznaniu ograniczeń koncepcji zwiększania liczby warstw. Nie przypisuję natomiast pracy odkrycia nowego prawa wymiany ciepła ani pełnego ilościowego wyjaśnienia oporu kontaktowego. Pomiary efektywnej przewodności całego elementu dostarczają informacji o jego odpowiedzi cieplnej, lecz nie wyznaczają samodzielnie udziału poszczególnych zjawisk składowych.

Istotne jest stwierdzenie Autorki na stronie 177, że teza została potwierdzona tylko częściowo. Niepotwierdzenie hipotezy nie obniża samo przez się wartości rozprawy doktorskiej. W tym przypadku wynik ograniczający użyteczność wielokrotnego warstwowania ma znaczenie projektowe. Wartość naukowa zależy jednak od konsekwentnego przedstawienia tego rezultatu. Takiej konsekwencji zabrakło pomiędzy tabelą 27, dyskusją na stronie 142, wnioskami na stronach 176–177 i streszczeniami.

W mojej ocenie cel materiałowo-technologiczny został osiągnięty w skali laboratoryjnej, natomiast cel dotyczący mechanizmów przenikania ciepła zrealizowano częściowo, przede wszystkim na poziomie porównawczego rozpoznania wpływu konfiguracji. Nie wykazano ogólnej przewagi większej liczby warstw. Wniosek o funkcji ochronnej matrycy należy ograniczyć do zaobserwowanego zachowania badanego układu podczas zastosowanego cyklu cieplnego.

Metodyka i poprawność eksperymentalna

Zaletą pracy jest wieloetapowy program badań i wykorzystanie komplementarnych metod. Charakterystykę prekursorów oparto na SEM/EDS, XRD, XRF i dyfrakcji laserowej, uzupełniając ją analizą sorpcyjną i porozymetrią rtęciową. Materiały włókniste badano metodami mikroskopowymi, spektroskopią FT-IR oraz pomiarami gęstości i właściwości cieplnych. Kompozyty poddano próbom zginania, ściskania i ekspozycji cieplnej. Zakres rozszerzono o wymywalność, promieniotwórczość naturalną i szacunkową ocenę środowiskowo-ekonomiczną. Dobór tych metod jest zasadny dla rozprawy o profilu materiałowym i aplikacyjnym.

Przyjęto matrycę z popiołu lotnego ze spalania węgla kamiennego i piasku kwarcowego w stosunku masowym 50:50. W opisie wykonania prototypów podano aktywację roztworem NaOH i szkłem wodnym sodowym R-145, utwardzanie w 75°C, rozformowanie po 24 godzinach i sezonowanie przez 28 dni. Wybór filcu lniano-konopnego do końcowej serii wynikał z wcześniejszych pomiarów i przesłanek technologicznych. Wprowadzenie elementów dystansujących było trafną reakcją na ryzyko zgniatania mat podczas formowania.

Opis receptury wymaga jednak ujednolicenia. Na stronach 95–96 mowa o NaOH jako jedynym aktywatorze, podczas gdy strona 100 i analiza na stronie 165 wskazują mieszaninę NaOH i szkła wodnego. Nie jest to różnica obojętna chemicznie: dodatkowy krzemian

wpływa na skład roztworu, lepkość, stosunki molowe i produkty reakcji. Należy podać jedną, spójną recepturę, obejmującą masy składników, wodę, udział substancji stałej w szkle wodnym i stosunek cieczy do suchej mieszanki. Zapis utożsamiający roztwór 10 M z około 300 g NaOH na litr wody jest niepoprawny. Stężenie 10 mol/dm³ odpowiada 400 g czystego NaOH w litrze końcowego roztworu; objętości roztworu nie wolno utożsamiać z objętością wody użytej do jego przygotowania.

W badaniach cieplnych wykorzystano HFM 446 Lambda, Isomet 2114 i GHP 900. Taki zestaw pozwala badać zarówno składniki, jak i gotowe układy. Dla Isometu zadeklarowano osiemnaście pomiarów, dla końcowych wariantów GHP – po dwa egzemplarze próbek o wymiarach 300 × 300 × 102 mm. Wykorzystanie różnych metod wzmacnia program badań, lecz nie jest jeszcze walidacją ich wzajemnej zgodności. Wynik uzyskany sondą powierzchniową w lokalnym obszarze materiału nie musi być bezpośrednio porównywalny z efektywną przewodnością całej przegrody mierzoną metodą płytową.

W opisie należało wyraźniej podać wilgotność materiałów podczas pomiaru, sposób ich kondycjonowania, rzeczywistą grubość mat po formowaniu, nacisk płyt i orientację strumienia ciepła względem warstw. Wymienienie wilgoci, pęcznienia i anizotropii wśród czynników zakłócających na stronie 45 świadczy o rozpoznaniu problemu, ale nie zastępuje informacji o sposobie kontrolowania tych wielkości. Brakuje również zestawienia rzeczywistych udziałów objętościowych i grubości wszystkich składników dla każdej próbki GHP. Bez niego nie można rozstrzygnąć, czy zmieniano wyłącznie liczbę styków.

Badania mechaniczne są potrzebnym uzupełnieniem oceny cieplnej. Wykorzystano próbki belkowe oraz sześcienne, a w części doświadczeń połówki belek po zginaniu. Dla tak niejednorodnych materiałów należy jednak precyzyjnie wskazać kierunek obciążenia względem warstw i położenie zbrojenia. Wytrzymałość nominalna obliczona ze wzoru dla jednorodnego przekroju jest użyteczna porównawczo, lecz nie opisuje lokalnego stanu naprężeń w układzie przekładkowym. Zbrojenie biegnące w osi obojętnej nie pracuje tak samo jak zbrojenie strefy rozciąganej; interpretacja jego skuteczności powinna uwzględniać przyczepność, ścinanie i przebieg zniszczenia.

Opracowanie statystyczne jest nierównomierne. W części prototypowej przedstawiono wyniki jednostkowe, co umożliwia ich niezależną ocenę. W tabelach 22–23 pominięto po dwa wyniki skrajne przy obliczaniu średnich. Taki zabieg wymaga uzasadnienia, zwłaszcza gdy duży rozrzut może odzwierciedlać rzeczywistą niejednorodność kompozytu. Dwie połówki tej samej belki nie są ponadto w pełni niezależnymi realizacjami procesu wytwarzania. W tabelach 25 i 32 zabrakło analogicznej informacji o rozrzucie, natomiast powtarzany w tabeli 27 zapis ±0,0001 W/(m·K) wymaga objaśnienia. Nie wiadomo, czy oznacza rozdzielczość, niepewność standardową, rozszerzoną czy inną wielkość. Różnice między egzemplarzami są znacznie większe.

Próby cieplne z etapami 100, 400 i 600°C oraz badania wytrzymałości po nagrzewaniu stanowią wartościowy test przesiewowy. Nie są jednak równoważne klasyfikacji odporności ogniowej przegrody. Dokumentacja stanowiska i termogramów wymaga dokładniejszego

opisania warunków brzegowych: powierzchni ogrzewanej, lokalizacji odczytu, emisyjności, momentu rejestracji i temperatur wewnątrz próbki. Temperatura powierzchni rzędu 58–85°C przy nominalnej temperaturze oddziaływania 600°C nie jest sama w sobie błędem, jeśli mierzono powierzchnię nieogrzewaną. Bez jednoznacznego opisu nie można jednak odtworzyć eksperymentu ani przypisać tej różnicy wyłącznie izolacyjności materiału. Badanie ściskania po nagrzewaniu należy także odróżnić od ściskania prowadzonego podczas ekspozycji cieplnej.

Wyniki badań oraz ich wartość poznawcza i aplikacyjna

Dobór surowca mineralnego został poparty wynikami analiz. Według XRF popiół ze spalania węgla kamiennego zawierał około 59,25% SiO_2, 30,68% Al_2O_3 i 2,37% CaO, a mediana wielkości cząstek wynosiła około 12,79 µm. Dane te uzasadniają zainteresowanie tym surowcem jako prekursorem niskowapniowego spoiwa aktywowanego alkalicznie. Trzeba jednak oddzielić ogólną przydatność materiału od ilościowej oceny jego reaktywności. W tabeli 4 udziały faz krystalicznych sumują się do około 100%, mimo wielokrotnego odwoływania się do znacznego udziału fazy amorficznej. Należy wyjaśnić, czy wyniki znormalizowano do sumy faz krystalicznych i jak określono ilość fazy niekrystalicznej. Podobne pytanie dotyczy materiału opisanego jako metakaolin, dla którego tabela 6 podaje 48,0% illitu i 39,7% kaolinitu.

Wartościowy jest przegląd dziewięciu rodzajów surowych materiałów włóknistych oraz gotowych mat, filców i wełen. Dla włókien w tabeli 12 uzyskano λ od 0,039 do 0,052 W/(m·K). W tabeli 13 szczególnie interesujące jest porównanie wełny lnianej bez docisku i po zagęszczeniu: λ zmalało z 0,043 do 0,031 W/(m·K), przy wzroście gęstości z 14,06 do 78,85 kg/m³. Wynik ten pokazuje, że samo zwiększenie porowatości nie zapewnia monotonnej poprawy izolacyjności. Przypisanie zmiany wyłącznie konwekcji byłoby jednak przedwczesne bez oceny wymiarów pustek, przepuszczalności i udziału promieniowania.

Badania prototypów ujawniły zasadniczy kompromis projektowy. W tabelach 18–19 wariant 10K_Z8 osiągnął średnią gęstość 1017,68 kg/m³ i λ = 0,400 W/(m·K), wobec 1716,39 kg/m³ i 1,125 W/(m·K) dla materiału referencyjnego. Oznacza to redukcję gęstości o około 41% i przewodności o około 64%. Dla 12L-K_Z8 otrzymano λ = 0,480 W/(m·K). Są to istotne różnice materiałowe, choć związane równocześnie ze zmianą udziału izolacji, geometrii i zbrojenia. Nie stanowią izolowanego pomiaru wpływu liczby granic.

Wyniki końcowej serii GHP są najważniejszym elementem części cieplnej. Dla trzech mat średnia z dwóch egzemplarzy układu naprzemiennego wynosi 0,21165 W/(m·K), a dla układu centralnego 0,11495 W/(m·K). Dla dwóch mat odpowiednie wartości wynoszą 0,25760 i 0,16185 W/(m·K). Obliczenia te wykonano na podstawie tabeli 27; nie są dodatkowymi wynikami pomiarów.

Zestawienie wskazuje, że w badanych konfiguracjach centralne skupienie izolacji wiązało się z mniejszą efektywną przewodnością cieplną. Redukcja wynosi około 45,7% dla trzech mat i 37,2% dla dwóch mat. Podane na stronie 137 uogólnienie o spadku rzędu 45–50% nie

obejmuje zatem poprawnie obu par. Różnice między egzemplarzami nie zmieniają kierunku zaobserwowanej zależności, choć liczba próbek ogranicza siłę uogólnienia.

Nie podzielam natomiast jednoznacznego przypisania tego rezultatu „paradoksowi oporu kontaktowego". W jednowymiarowym modelu ustalonego przewodzenia, przy zachowaniu tych samych sumarycznych grubości składników i ich przewodności, zmiana kolejności idealnie połączonych warstw nie zmienia sumy oporów. Dodatkowy dodatni opór styku zwiększa opór całkowity. Jeśli układ naprzemienny przewodzi więcej ciepła, trzeba wskazać, które założenie modelu przestało być spełnione: zmieniła się grubość lub gęstość izolacji, powstały boczne drogi przepływu, wystąpiło zawilgocenie, infiltracja zaczynu, inna liczba przekładek albo odmienna geometria kontaktu. Takie wyjaśnienia są fizycznie możliwe, lecz wymagają dowodów. Brak poprawy izolacyjności nie dowodzi również nieistnienia oporu kontaktowego.

Pomiary składników wykonane Isometem dały dla geopolimeru $\lambda = 1{,}0225$ W/(m·K), objętościową pojemność cieplną 1,69 MJ/(m³·K) i dyfuzyjność 0,6045 mm²/s. Dla maty lniano-konopnej otrzymano odpowiednio 0,0467 W/(m·K), 0,1357 MJ/(m³·K) i 0,3448 mm²/s. Wartości te są wewnętrznie zgodne z zależnością $a = \lambda/Cv$, z uwzględnieniem zaokrągleń. Jest to korzystny wynik kontroli spójności danych. Nie uzasadnia jednak twierdzenia, że rozdzielono udziały przewodzenia, konwekcji i promieniowania.

Właściwości mechaniczne końcowych wariantów potwierdzają znaczenie architektury kompozytu. Materiał referencyjny osiągnął 36,119 MPa. Wariant K2M-4P-R uzyskał 22,739 MPa, a K2M-2P-Ś – 31,167 MPa. Dla czterech pełnych mat wartości wyniosły odpowiednio 17,341 MPa w układzie naprzemiennym i 25,973 MPa w centralnym. Są to różnice istotne z punktu widzenia projektowania, ale odnoszą się do nominalnej wytrzymałości badanych próbek, nie do ustalonej nośności pełnowymiarowej ściany.

Dane po ekspozycji cieplnej wymagają bardziej zróżnicowanej interpretacji niż ogólne stwierdzenie spadku wytrzymałości. RKG zachował około 88,2% wartości początkowej, a K4M-8P-R około 50,8%. Jednocześnie dla K2MP-4P-R odnotowano wzrost z 20,702 do 27,521 MPa, a dla K4MP-2P-Ś z 18,461 do 26,779 MPa. Możliwe przyczyny obejmują dalsze przemiany matrycy, zmianę schematu przenoszenia obciążenia i różnice między egzemplarzami. Bez miar rozrzutu nie można rozstrzygnąć, jaka część wzrostu wynika z samej ekspozycji cieplnej. Zachowanie integralności mineralnych warstw przy jednoczesnym zwęgleniu izolacji jest ważnym spostrzeżeniem; nie oznacza jednak zachowania włókien w stanie niezmienionym ani dowodu określonej klasy odporności ogniowej.

Badania wymywalności i promieniotwórczości są uzasadnionym rozszerzeniem pracy wykorzystującej surowiec odpadowy. Dla badanego geopolimeru otrzymano wskaźnik $I = 0{,}60 \pm 0{,}04$. Wskaźnik ten jest bezwymiarowy, w przeciwieństwie do aktywności radionuklidów wyrażanych w Bq/kg. Wynik odnosi się do badanej próbki i określonego kryterium radiologicznego, a nie do wszystkich możliwych oddziaływań wyrobu. W części dotyczącej wymywalności Autorka odnotowała przekroczenia kryteriów dla odpadów obojętnych m.in. dla As, Se i Mo. To cenna informacja, lecz nie jest spójna z późniejszym

ogólnym stwierdzeniem spełnienia kryteriów bezpieczeństwa środowiskowego. Kryteria przyjęcia odpadu na składowisko nie są tożsame z oceną emisji z gotowego wyrobu budowlanego w warunkach użytkowania.

Analiza środowiskowa ma w istocie charakter szacowania śladu węglowego w granicach od pozyskania surowców do bramy zakładu, z uwzględnieniem transportu i energii wytwarzania. Wariant bazowy daje w przedstawionym rachunku około 77,76 kg CO_2-eq na element o powierzchni 0,5 m², a aktywatory odpowiadają za około 61,9% tej sumy. Analiza wrażliwości na ich wskaźniki emisji jest dobrym rozwiązaniem. Pozwala wskazać kierunek optymalizacji, ale nie przesądza o przewadze nad przegrodą konwencjonalną, dopóki nie porówna się rozwiązań o równoważnych parametrach cieplnych, mechanicznych i trwałości.

Możliwość zastosowania wyników jest realna jako punkt wyjścia do projektowania i dalszych badań prefabrykatów. Nie należy jej utożsamiać z gotowością wdrożeniową. Potrzebne będą badania pełnowymiarowych elementów i połączeń, zachowania cieplno-wilgotnościowego, trwałości włókien w matrycy alkalicznej oraz właściwości po cyklach eksploatacyjnych. Planowaną koncepcję patentową ze stron 178–180 traktuję jako perspektywę rozwoju; sam zamiar zgłoszenia nie jest dowodem nowości ani osiągniętego wdrożenia.

4. Uwagi szczegółowe

Przedstawione zastrzeżenia nie mają jednakowego znaczenia. Najistotniejsze dotyczą identyfikacji mechanizmu cieplnego, odtwarzalności receptury i geometrii oraz zakresu uzasadnienia deklarowanych właściwości użytkowych. Warto omówić je podczas obrony, odnosząc odpowiedzi do konkretnych danych i protokołów pomiarowych.

Spójność wnioskowania o warstwowaniu i oporze kontaktowym

Proszę wyjaśnić rozbieżność między tabelą 27, wskazującą mniejszą przewodność układów centralnych, a stwierdzeniem ze strony 176 i streszczeń, że podział izolacji nie powoduje wzrostu efektywnej przewodności. Jak należy odczytać zdanie ze strony 142 przypisujące dodatkowym granicom obniżenie λ oraz wniosek ze strony 177 o pogorszeniu izolacyjności? Które porównania dotyczą tej samej ilości izolacji, tej samej liczby przekładek i identycznej grubości całego elementu? Proszę również wskazać, czy opór kontaktowy został wyznaczony ilościowo, czy pozostaje proponowanym wyjaśnieniem różnic między konfiguracjami.

Geometria próbek i rzeczywisty skład przekładek

Proszę przedstawić zwymiarowany przekrój każdego wariantu GHP, z kierunkiem strumienia ciepła, położeniem zbrojenia, sumarycznymi grubościami geopolimeru, filcu i płyt. Oznaczenia wariantów centralnych w tabeli 24 zawierają „2P”, natomiast w tabeli 27 występują „6P” i „4P”. Czy jest to celowo odmienna konstrukcja próbek, czy niekonsekwencja oznaczeń? Jaki dokładnie wyrób BOTAMENT zastosowano i czy jego rdzeń ma charakter mineralny, czy polimerowy? Odpowiedź rozstrzyga, czy analizowano wyłącznie styki geopolimer–włókna, czy również granice z dodatkowym materiałem izolacyjnym.

Weryfikacja oporu cieplnego i współczynnika U

W tabeli 26 wartości U odpowiadają w przybliżeniu odwrotności podanego R. Jeżeli jest to opór samego kompozytu, należy uwzględnić jeszcze 0,13 i 0,04 m²·K/W, zgodnie z deklaracją metodyczną. Dla R = 1,58 m²·K/W otrzymuje się wówczas U ≈ 0,571 W/(m²·K), a nie 0,63. Jeśli opory powierzchniowe już włączono do tabelarycznego R, trzeba to jednoznacznie zaznaczyć. Sama bliskość U do 1/R nie wystarcza do wskazania, który sposób obliczeń zastosowano. Na stronie 134 Autorka wskazuje, że wartości R i U otrzymano obliczeniowo. Należy je zatem odróżnić od wyników pomiarów GHP w tabeli 27 i uzgodnić geometrię porównywanych wariantów przed zestawianiem obu ocen izolacyjności.

Poważniejszego wyjaśnienia wymaga deklaracja uzyskania U = 0,19 W/(m²·K) dla przegrody 25 cm. Na stronie 135 obszar izolacyjny o grubości 15 cm obejmuje filc wraz z płytami dystansującymi, natomiast w bilansie na stronie 165 przypisano go filcowi. Dla 10 cm geopolimeru o λ = 1,0225 W/(m·K), przy zastąpieniu w rachunku kontrolnym całego obszaru izolacyjnego 15 cm filcu o λ = 0,0467 W/(m·K) i przy oporach powierzchniowych 0,13 i 0,04 m²·K/W, otrzymuje się:

$$U = [0{,}13 + 0{,}10/1{,}0225 + 0{,}15/0{,}0467 + 0{,}04]^{-1} \approx 0{,}287 \text{ W/(m²·K)}.$$

Jest to rachunek dla uproszczonej przegrody dwumateriałowej, bez mostków cieplnych i dodatkowych oporów kontaktowych; nie zastępuje modelu wszystkich przekładek. Pokazuje jednak, że podanych w rozprawie danych nie można bez dodatkowych założeń odtworzyć. Przy tych samych parametrach osiągnięcie U = 0,19 W/(m²·K) wymagałoby około 23,3 cm samego filcu przy 10 cm geopolimeru. Proszę przedstawić pełny rachunek prowadzący do deklarowanego wyniku. Wartość 0,19 W/(m²·K) należy też odróżnić od granicy 0,20 W/(m²·K) podanej w przywołanych warunkach technicznych dla ścian zewnętrznych pomieszczeń o temperaturze obliczeniowej co najmniej 16°C.

Ochrona włókien i interpretacja ekspozycji cieplnej

Jak zdefiniowano skuteczną ochronę włókien: jako ograniczenie ich temperatury, utraty masy, stopnia zwęglenia, czy utrzymanie właściwości kompozytu? Które wyniki pozwalają porównać tę ochronę z osłoną cementową o analogicznej grubości? Czy temperatura była mierzona wewnątrz warstw, a jeśli nie, jakie są granice wnioskowania z termogramów powierzchni? Należy oddzielić odporność na zastosowany cykl nagrzewania od reakcji na ogień i odporności ogniowej całej przegrody. Osobnego omówienia wymaga zachowanie żywicy epoksydowej prętów, a w przypadku zastosowania płyt z rdzeniem polistyrenowym – również ich degradacja.

Niepewność pomiaru i opracowanie statystyczne

Proszę objaśnić sposób wyznaczenia wartości ±0,0001 W/(m·K) w tabeli 27 oraz odróżnić niepewność przyrządu od zmienności pomiędzy próbkami. Jak uzasadniono odrzucenie wyników skrajnych w tabelach 22–23 i czy porównano wnioski otrzymane dla pełnych serii? Na jakiej podstawie oceniono istotność wzrostów wytrzymałości po nagrzewaniu? Osiemnaście odczytów sondy na materiale nie musi oznaczać osiemnastu niezależnych

próbek technologicznych; to rozróżnienie powinno być zachowane w interpretacji przedziałów ufności.

Wyjaśnienia wymaga również odniesienie pomiaru sondą powierzchniową Isomet do ASTM D5334, której procedura dotyczy sondy igłowej. Równanie (19) przedstawia zależność właściwą dla prostego ustalonego przewodzenia, a nie pełny model identyfikacyjny metody impulsowej. W równaniu (21) wielkość Q musi oznaczać energię, nie strumień ciepła w watach. Różnica temperatur nie jest gradientem temperatury; gradient ma wymiar K/m. Poprawki te są potrzebne dla rzetelnego przedstawienia metody, niezależnie od poprawności wyników zwróconych przez aparaturę.

Modelowanie transportu ciepła i kierunkowość właściwości

Uzupełnienia wymaga dyskusja możliwości wykorzystania modelu numerycznego do rozdzielenia wpływu geometrii, właściwości składników i warunków kontaktu. Jakie pomiary byłyby potrzebne, aby taki model zweryfikować niezależnie od danych użytych do jego dopasowania? W szczególności warto rozważyć porównanie przepływu ciepła wzdłuż i w poprzek warstw oraz określić, czy w badanych matach kontrolowano orientację włókien. Pozwoliłoby to odróżnić anizotropię samego materiału włóknistego od kierunkowości wynikającej z architektury całego kompozytu.

Powtarzalność technologii i przejście do skali przemysłowej

Proszę wskazać, które parametry procesu wytwarzania należy uznać za krytyczne przy zwiększaniu wymiarów elementów i liczby produkowanych sztuk. Dotyczy to zwłaszcza jednorodności aktywacji i utwardzania, tolerancji grubości warstw, stopnia sprasowania izolacji oraz rozmieszczenia zbrojenia i przekładek. Jak powinien wyglądać plan kontroli jakości zapewniający odtwarzalność właściwości cieplnych i mechanicznych pomiędzy partiami? Analiza kosztów i oddziaływania środowiskowego powinna uwzględniać również konsekwencje takiej kontroli i ewentualnych braków produkcyjnych.

Uwagi redakcyjne i porządkujące

W poprawionej redakcji należy ujednolicić nazwy wielkości cieplnych, oznaczenia próbek i liczbę cyfr znaczących. W tabeli 30 występuje zapis „0,,0110”; w podpisach i nagłówkach pojawiają się m.in. „charakterysktyka” oraz „wytwrzanie”. W bibliografii pozostały adresy z prefiksem rozszerzenia przeglądarki. Wskaźnik promieniotwórczości I należy podawać bez jednostki Bq/kg. Określenie porów o średnicy około 1,7 nm jako mezoporów na stronie 76 wymaga korekty klasyfikacyjnej. Warto też wyraźnie odróżniać porowatość upakowania proszku od porowatości stwardniałego spoiwa i strefy międzywarstwowej.

Deklarację wykorzystania narzędzi cyfrowych w punkcie 6.16 oceniam jako przejaw transparentności. Sama obecność takich narzędzi nie rozstrzyga o samodzielności naukowej. Za poprawność interpretacji widm, źródeł, obliczeń i wniosków odpowiada Autorka; wskazane niezgodności należy oceniać według tych samych kryteriów, co pozostałą część pracy.

5. Ocena osiągnięcia naukowego oraz wartości rozprawy

Rozprawa mgr inż. Agnieszki Przybek przedstawia rozbudowane badania doświadczalne kompozytów z mineralną matrycą aktywowaną alkalicznie i izolacją włóknistą. Jej najmocniejszą stroną jest opracowanie materiałów, przeprowadzenie kolejnych etapów selekcji oraz porównanie właściwości cieplnych i mechanicznych różnych konfiguracji. Wyniki pokazują, że architektura układu ma istotne znaczenie dla jego odpowiedzi, a zwiększanie liczby warstw nie może być traktowane jako samodzielna gwarancja poprawy izolacyjności.

Uwagi krytyczne są istotne, szczególnie w odniesieniu do interpretacji oporu kontaktowego, obliczeń U i analizy środowiskowej. Ograniczają zakres twierdzeń, które można uznać za wykazane, oraz dojrzałość sformułowanych deklaracji aplikacyjnych. Nie przekreślają jednak wartości zasadniczego osiągnięcia materiałowego i porównawczych wyników eksperymentalnych. Pozytywnej oceny rozprawy nie opieram na deklarowanym U = 0,19 W/(m²·K), przewadze kosztowej lub środowiskowej ani na twierdzeniu o jednoznacznym potwierdzeniu „paradoksu". Opieram ją na opracowaniu i zbadaniu określonej klasy kompozytów oraz rozpoznaniu zależności pomiędzy ich budową i właściwościami. Niepełne wyjaśnienie mechanizmu nie jest równoznaczne z brakiem oryginalnego wyniku materiałowego. To rozróżnienie uzasadnia pozytywną konkluzję przy zachowaniu przedstawionych zastrzeżeń.

W odniesieniu do przesłanek art. 187 ust. 1 i 2 ustawy stwierdzam, co następuje.

Po pierwsze, rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o charakterze materiałowo-technologicznym, polegające na opracowaniu i eksperymentalnej ocenie konfiguracji warstwowych kompozytów geopolimerowych z izolacją naturalną oraz określeniu zależności między ich architekturą a właściwościami cieplnymi i mechanicznymi. Oryginalność dotyczy konkretnego rozwiązania i uzyskanej wiedzy doświadczalnej, a nie ustanowienia nowego mechanizmu fizycznego.

Po drugie, przedstawiony przegląd zagadnień materiałowych, dobór metod i realizacja programu badań pozwalają pozytywnie ocenić ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w dyscyplinie inżynieria materiałowa oraz opanowanie warsztatu badawczego w zakresie wymaganym dla rozprawy doktorskiej.

Po trzecie, sekwencyjne rozwijanie programu, modyfikowanie rozwiązań na podstawie pomiarów oraz przedstawienie wyników niepotwierdzających części tezy świadczą o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Interpretacja wyników wymaga w kilku miejscach większej dyscypliny i powściągliwości, jednak całokształt przedstawionego postępowania stanowi wystarczającą podstawę do pozytywnej oceny tej kompetencji. Współpraca z wyspecjalizowanymi laboratoriami nie jest sprzeczna z samodzielnością, rozumianą jako odpowiedzialność za problem, plan i naukową syntezę badań.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawę doktorską mgr inż. Agnieszki Przybek oceniam pozytywnie. Jej zasadniczą wartość stanowią opracowanie i doświadczalna ocena kompozytów warstwowych z matrycą

aktywowaną alkalicznie oraz izolacją pochodzenia naturalnego, a także rozpoznanie zależności między konfiguracją tych materiałów a ich właściwościami cieplnymi i mechanicznymi. Na uznanie zasługują wieloetapowy program badań, modyfikowanie rozwiązań na podstawie uzyskiwanych wyników oraz wskazanie ograniczeń koncepcji zwiększania liczby warstw izolacyjnych. Częściowe niepotwierdzenie przyjętej tezy stanowi przy tym wartościowy wynik poznawczy, istotny dla dalszego projektowania tej grupy kompozytów.

Znaczenie pracy dostrzegam również z perspektywy własnych badań prowadzonych w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, poświęconych gospodarce o obiegu zamkniętym i ekonomice górnictwa, oraz zadań związanych z kierowaniem Oddziałem Górnośląskim Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego. Transformacja Śląska, likwidacja kopalń i ponowne zagospodarowanie terenów pogórniczych wymagają poszukiwania nowych sposobów wykorzystania zasobów i infrastruktury regionu. Badania nad materiałami wytwarzanymi z udziałem surowców odpadowych wpisują się w te potrzeby, łącząc zagadnienia inżynierii materiałowej z problematyką racjonalnej gospodarki surowcowej.

Wykorzystanie popiołu lotnego w badanej matrycy jest bezpośrednim przykładem takiego powiązania. Przyjęty sposób doboru składników i oceny właściwości kompozytów może również stanowić podstawę dalszych badań nad innymi surowcami antropogenicznymi związanymi z górnictwem. Szczególne znaczenie przypisuję możliwości zagospodarowania odpadów wydobywczych i przeróbczych, w tym odpadów poflotacyjnych gromadzonych w obiektach KGHM. Rozszerzenie opracowanej koncepcji na te materiały wymagałoby odrębnego rozpoznania ich składu, reaktywności i zmienności oraz potwierdzenia trwałości i bezpieczeństwa środowiskowego otrzymanych wyrobów. Jest to perspektywa dalszych zastosowań, której realizacja mogłaby służyć zarówno ograniczaniu składowania odpadów, jak i rozwojowi nowych kierunków produkcji w regionach górniczych.

Przedstawione w rozprawie porównanie kosztów wskazuje, że w przyjętych warunkach proponowane rozwiązanie jest droższe od rozwiązań tradycyjnych. Wynik ten należy uwzględnić w ocenie dojrzałości technologii, po wyjaśnieniu wskazanych w recenzji nieścisłości rachunkowych. Nie przesądza on jednak o długookresowych możliwościach jej wykorzystania. Z perspektywy ekonomiki górnictwa istotne są również zmiany cen i dostępności surowców, koszty energii, lokalizacja produkcji oraz efekty zwiększania jej skali. Doskonalenie procesu aktywacji i utwardzania, wykorzystanie lokalnych strumieni surowcowych oraz poprawa powtarzalności wytwarzania mogą zmieniać warunki opłacalności, co uzasadnia kontynuowanie badań.

Dalsza ocena ekonomiczna powinna obejmować cały cykl życia wyrobów i porównywać rozwiązania zapewniające równoważną funkcję użytkową. Obok kosztów wytwarzania należy uwzględnić przygotowanie i transport surowców, kontrolę jakości, trwałość oraz końcowe zagospodarowanie materiałów. Osobnego oszacowania wymagają korzyści społeczne i środowiskowe wynikające z ograniczenia składowania odpadów i zużycia surowców pierwotnych. W tym kontekście za uzasadnione uważam publiczne wspieranie badań

pilotażowych i demonstracyjnych, pozwalających zweryfikować rzeczywiste efekty takich technologii i ich przydatność dla transformacji gospodarczej regionów górniczych.

Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne dotyczą przede wszystkim zakresu interpretacji mechanizmów transportu ciepła, spójności części obliczeń oraz uzasadnienia niektórych deklaracji aplikacyjnych. Wymagają rzeczowego odniesienia się przez Doktorantkę podczas obrony. Nie podważają jednak zasadniczego osiągnięcia materiałowo-badawczego ani całościowej, pozytywnej oceny rozprawy. Ocenę tę opieram na uzyskanych wynikach doświadczalnych i ich wartości poznawczej, przy zachowaniu wskazanych granic wnioskowania.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Przybek pt. „Badania mechanizmów przenikania ciepła w warstwowych kompozytach na bazie glinokrzemianów oraz włókien pochodzenia naturalnego" spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.). Praca przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w dyscyplinie inżynieria materiałowa oraz jej umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Dobór i wykorzystanie metod eksperymentalnych świadczą również o opanowaniu warsztatu badawczego wymaganego na tym etapie rozwoju naukowego. Rozprawa ma postać pracy pisemnej i zawiera streszczenie w języku angielskim, odpowiadając wymaganiom dotyczącym jej formy.

W związku z powyższym wnoszę do Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki o dopuszczenie mgr inż. Agnieszki Przybek do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.

Wnoszę również o wyróżnienie rozprawy. Wniosek ten uzasadniam rozległością i konsekwentnym rozwojem programu eksperymentalnego, połączeniem komplementarnych metod charakterystyki materiałowej oraz wartością poznawczą porównania opracowanych konfiguracji kompozytów. Za szczególnie wartościowe uznaję rozpoznanie ograniczeń wielokrotnego warstwowania, które dostarcza wskazówek dla dalszych prac projektowych. Dodatkowym argumentem jest potencjał wykorzystania uzyskanej wiedzy w gospodarce o obiegu zamkniętym i rozwoju technologii zagospodarowania surowców odpadowych. Znaczenie tego kierunku dla transformacji regionów górniczych wzmacnia ocenę perspektyw aplikacyjnych pracy, natomiast podstawą wniosku o wyróżnienie pozostaje konkretne osiągnięcie naukowe Autorki.

.....

dr hab. inż. Artur Dyczko

prof. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN