

WPLYNĘŁO  
Dnia 4.10.2022  
L. KR. IL. PW. / 582 / 2022

Prof. dr hab. inż. Lech Lichołai  
Politechnika Rzeszowska  
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury  
Katedra Budownictwa Ogólnego  
al. Powstańców Warszawy 12  
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 12-IX-2022 roku

## RECENZJA

### Rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Tomasza Krzysztofa Kułakowskiego

pt: „**Modelowanie i analiza procesów wymiany ciepła w oszkleniu wypełnionym materiałem fazowo zmiennym**”

wykonana pod opieką naukową:

Pana Promotora dr hab. inż. Dariusza Heima, prof. Politechniki Łódzkiej  
oraz Pana Promotora pomocniczego dr inż. Arkadiusza Węglarza

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Pana dr hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni - Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej z dnia 14.07.2022 r. informujące, że Rada Naukowa Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej na posiedzeniu w dniu 07.07.2022 r. powołała mnie na Recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Tomasza Kułakowskiego pt.: "Modelowanie i analiza procesów wymiany ciepła w oszkleniu wypełnionym materiałem fazowo zmiennym" wraz z prośbą o opracowanie recenzji.

Dołączone zostało także pismo z Uchwałą nr 486/2022 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport z dnia 05.07.2022 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Tomasza Kułakowskiego, podpisane przez Pana dr hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni - Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej oraz Pana dr hab. inż. Adama Rosińskiego, prof. uczelni - Sekretarza Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej.

## **2. Informacja dotycząca tytułu rozprawy doktorskiej stanowiącej podstawę ubiegania się w aktualnym postępowaniu o nadanie stopnia doktora**

Tytuł recenzowanej rozprawy doktorskiej „Modelowanie i analiza procesów wymiany ciepła w oszkleniu wypełnionym materiałem fazowo zmiennym” został właściwie sformułowany i ściśle odpowiada merytorycznej zawartości przedmiotowej pracy doktorskiej. W sposób jednoznaczny tytuł pracy odnosi się do prowadzonych przez Doktoranta zadań badawczych. W tytule zawarta jest problematyka naukowa, która rozwijana jest w pracy w sposób specjalistyczny, ukierunkowany naukowo i zgodny z przyjętymi założeniami badawczymi.

## **3. Ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska, której Autorem jest Pan mgr inż. Tomasz Krzysztof Kułakowski pt: „Modelowanie i analiza procesów wymiany ciepła w oszkleniu wypełnionym materiałem fazowo zmiennym” wykonana pod opieką Pana Promotora dr hab. inż. Dariusza Heima, prof. Politechniki Łódzkiej oraz Pana Promotora pomocniczego dr inż. Arkadiusza Węglarza.

Rozprawa doktorska liczy 175 stron i składa się z dziesięciu ponumerowanych rozdziałów. Kolejnymi rozdziałami są: 1. Streszczenie, 2. Abstract, 3. Wstęp, 4. Tezy, Cel i Zakres pracy, 5. Algorytm obliczeniowy, 6. Weryfikacja algorytmu obliczeniowego, 7. Walidacja algorytmu obliczeniowego, 8. Analiza parametryczna okna trzyszybowego z warstwą MFZ, 9. Wnioski, 10. Bibliografia. Większość rozdziałów podzielona jest na podrozdziały. Na początku rozprawy znajduje się spis głównych symboli, bardzo przydatny i potrzebny do merytorycznej analizy zawartości wykonanej dysertacji doktorskiej.

Rozdział pierwszy - Streszczenie – zawiera skrócone informacje o prowadzonych badaniach dotyczących modelowania i symulacji zjawisk wymiany ciepła i procesów optycznych zachodzących w trzyszybowym zestawie okiennym, w którym jedna z komór została wypełniona materiałem fazowo zmiennym. Na potrzeby tych analiz Doktorant opracował autorski algorytm obliczeniowy, umożliwiający symulację wymiany ciepła sprzężonej z procesami optycznymi przy uwzględnieniu zmiennych parametrów fizycznych i optycznych materiału fazowo zmiennego. Pan mgr inż. Tomasz K. Kułakowski zweryfikował algorytm przyjmując ściśle rozwiązania nieustalanej wymiany ciepła, przy równoczesnym uwzględnieniu zjawiska przemiany fazy w dedykowanej do badań strukturze materiałowej. Walidacja algorytmu została wykonana przy wykorzystaniu wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych w komorze termicznej, a także przy wykorzystaniu przegrody wkomponowanej w zewnętrzną elewację budynku. W tym rozdziale zawarte są także informacje

dotyczące wykorzystania algorytmu do symulacji wymiany energii w ciągu pełnego roku meteorologicznego. Symulowano trzydzieści dwa warianty charakteryzujące się różnymi rozwiązaniami materiałowymi i geometrycznymi, przy uwzględnieniu aspektów efektywności energetycznej, ekologicznej i ekonomicznej. Rozdział ten zawiera również słowa kluczowe, istotne dla naukowej tematyki przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

Rozdział drugi - Abstract - jest przetłumaczeniem na język angielski treści zawartych w poprzednim rozdziale.

W rozdziale trzecim – Wstęp - Pan mgr inż. Tomasz K. Kułakowski zawarł bardzo potrzebne i ważne informacje o charakterze wprowadzającym do dalszych składowych wykonanej dysertacji doktorskiej. Doktorant zwraca uwagę na potrzebę przeciwdziałania postępującym zmianom klimatycznym poprzez wdrażanie działań w zakresie prowadzenia racjonalnej gospodarki energetycznej przy uwzględnianiu zasad zrównoważonego rozwoju. W tym kontekście ważnym jest zwrócenie uwagi na rozwijanie różnych innowacyjnych przegród budowlanych, nowoczesnych materiałów izolacyjnych oraz materiałów o niskim śladzie węglowym w postaci izolacji z materiałów poddanych recyklingowi lub innych rozwiązań kcmpozytowych (np. beton konopny). Autor podkreśla także, że najłabszym pod względem izolacyjności termicznej elementem budynku pozostają przegrody przezroczyste. Dlatego w wielu ośrodkach naukowych prowadzone są badania naukowe dotyczące stosowania powłok niskoemisyjnych, aerożeli jako materiału wypełniającego komory pomiędzy szybami oraz w obramowaniach okiennych, a także stosowania folii szklanej w celu zwiększenia liczby komór gazowych w pakietach szybowych, jak również wykorzystanie technologii umożliwiających zmianę parametrów optycznych (m.in. okna elektrochromatyczne, ciekłokrystaliczne, fotochromatyczne, termooporowe). Dobrym kierunkiem jest stosowanie konwencjonalnych elementów zacieniających (rolety, żaluzje, pergole, rastry) oraz zaawansowanych nowoczesnych rozwiązań wykorzystujących automatykę aplikacyjną. Oczywistym kierunkiem jest stosowanie ogniw fotowoltaicznych zintegrowanych z pakietami szybowymi. Bardzo innowacyjnym sposobem jest stosowanie materiałów fazowo zmiennych w pakietach szybowych oraz w obramowaniach okiennych. Pan mgr inż. Tomasz K. Kułakowski zaznacza, że powyższe czynniki związane z rozwojem nauki w licznych ośrodkach były inspiracją do podjęcia badań naukowych w obszarze wykorzystania materiałów fazowo zmiennych jako wypełnienia przestrzeni międzyszybowych w zestawach okiennych. W dalszej części tego rozdziału przedstawione zostały materiały fazowo zmienne w kontekście ich zastosowania zgodnie z przyjętymi założeniami badawczymi. Doktorant zaznacza, że podział materiałów fazowo zmiennych stosowanych w budownictwie można przeprowadzić ze względu na właściwości chemiczne i wyróżnia: materiały fazowo zmienne w postaci parafin i kwasów tłuszczowych oraz materiały fazowo zmienne nieorganiczne, do których zalicza się przede wszystkim sole uwodnione. W dalszej części tego rozdziału Autor rozprawy doktorskiej porusza

zagadnienia dotyczące potencjału wykorzystania materiałów fazowo zmiennych w budynkach ze zwróceniem uwagi na możliwości zastosowania materiałów fazowo zmiennych w przegrodach przezroczystych i przeziernych. Ponadto zaprezentowane są parametry materiałów fazowo zmiennych oraz metody oceny materiałów fazowo zmiennych pod względem ich efektywności energetycznej. Ważną składową tego rozdziału jest przegląd metod obliczeniowych mogących znaleźć zastosowanie do symulacji wymiany ciepła. Doktorant podaje przykłady metod numerycznych rozwiązywania równań różniczkowych, wymieniając: Metodę Różnic Skończonych, Metodę Objętości Kontrolnych, Metodę Elementów Skończonych, oraz Metodę Elementów Brzegowych. Pan mgr inż. Tomasz K. Kułakowski zaznacza, że każda z powyższych metod obliczeniowych pozwala na analizę wymiany ciepła przez przegrody budowlane, w których zastosowano materiały fazowo zmienne.

W rozdziale czwartym – Tezy, Cel i Zakres pracy - Autor stwierdza, że wykonana praca, której tematyka dotyczy modelowania procesów termicznych i optycznych w trzyszybowych pakietach okiennych, częściowo wypełnionych materiałem fazowo zmiennym może przybliżyć naukowo rozwiązania dotyczące ich efektywności energetycznej w warunkach zbliżonych do występujących na terenie Polski, a uzyskane rezultaty mogą przyczynić się do wytyczania dalszych kierunków badawczych w przedmiotowym, doktorskim obszarze tematycznym. W rozprawie zostały sformułowane dwie tezy; pierwsza o możliwości jednowymiarowego odwzorowania sprzężonych procesów termicznych i optycznych w rozpatrywanej w pracy przegrodzie na podstawie modyfikacji istniejącej metody. Druga teza odnosi się do możliwości określenia parametrów w oszkleniu trójszybowym, które pozwolą na poprawę efektywności energetycznej, ekologicznej i ekonomicznej analizowanej przegrody w odniesieniu do analogicznego zestawu, jednak bez materiału fazowo zmiennego. Następnie, w tym rozdziale Doktorant przedstawia cel pracy, którym jest opracowanie autorskiego pakietu numerycznego służącego do symulacji wymiany ciepła w konkretnej przegrodzie przezroczystej modyfikowanej materiałem fazowo zmiennym, a w kolejnych etapach weryfikacja sformułowanych w pracy tez badawczych.

W rozdziale piątym Pan mgr inż. Tomasz K. Kułakowski przedstawia algorytm obliczeniowy zastosowany w wykonanej rozprawie doktorskiej. Doktorant zdefiniował problem fizyczny, dokonał matematycznego opisu rozpatrywanego zjawiska oraz wybrał metodę przybliżonego rozwiązywania równań różniczkowych. Problemem fizycznym jest nieustalona wymiana ciepła na drodze przewodzenia występująca wraz ze zjawiskiem przemiany fazy w wybranych materiałach. Autor podaje, że dużą trudnością jest modelowanie zjawiska zmiany stanu skupienia, co związane jest ze zmianą parametrów fizycznych materiału fazowo zmiennego oraz konieczność uwzględnienia ciepła utajonego (ciepła przemiany). Wraz z uzasadnieniem Doktorant informuje, że dla rozwiązania tego zadania w sposób przybliżony posłużył się metodą objętości kontrolnych. Dla określonego problemu matematycznego Doktorant

opracował własny algorytm obliczeniowy na potrzeby przeprowadzenia badań będących przedmiotem wykonywanej pracy doktorskiej. Algorytm obliczeniowy pozwala na iteracyjne rozwiązanie przedstawionego w pracy układu równań opisujących nieustaloną wymianę ciepła z przemianą fazy.

Rozdział szósty przedstawia zagadnienia dotyczące weryfikacji algorytmu obliczeniowego. Doktorant stwierdza w tym rozdziale, że dla oceny algorytmu matematycznego w kontekście możliwości analizy postawionego problemu matematycznego niezbędna jest jego weryfikacja w zakresie zgodności równania dyskretnego z równaniem ciągłym, stabilności, czyli sprawdzenia czy błąd zaokrąglenia nie narasta w kolejnych krokach czasowych oraz zbieżności, czyli sprawdzenia czy spełnione są wymagania twierdzenia Laxa. Doktorant zastosował dwie metody weryfikacyjne, dla których znane są rozwiązania ścisłe; pierwsza: symulacja nieustalonej wymiany ciepła na drodze przewodzenia oraz druga: symulacja wymiany ciepła ze zjawiskiem przemiany fazy. Weryfikacja algorytmu w pierwszym przypadku pozwoli na wyeliminowanie ryzyka, iż brak zbieżności w zagadnieniu wymiany ciepła z przemianą fazy wynika z błędów w modelowaniu przewodzenia. Weryfikacja algorytmu w drugim przypadku pozwoli na ocenę przydatności algorytmu w symulowaniu wymiany ciepła w wielowarstwowych przegrodach częściowo wypełnionych materiałem fazowo zmiennym. Weryfikacja algorytmu numerycznego potwierdziła, że w zagadnieniach nieustalonej wymiany ciepła możliwych do opisania w formie układów liniowych równań różniczkowych cząstkowych przedstawiony przez Doktoranta algorytm numeryczny jest zgodny, stabilny i zbieżny co umożliwia jego stosowanie w analizach inżynierskich. Natomiast weryfikacja algorytmu wykonana dla zagadnienia wymiany ciepła na drodze przewodzenia z przemianą fazy, wykazała, że mimo braku matematycznego dowodu zgodności, przeprowadzone symulacje pozwalają na uzyskanie zadowalającej zbieżności do rozwiązania ścisłego, co osiągnięto dzięki zastosowaniu techniki linearyzacji równań różniczkowych w postaci metody efektywnego ciepła właściwego. Pan mgr inż. Tomasz K. Kułakowski ocenił algorytm jako wystarczająco dokładny do analizy problemów inżynierskich, które przewidują wymianę ciepła z przemianą fazy w przegrodach budowlanych i uznał, że można przystąpić do kolejnego etapu, czyli walidacji algorytmu na podstawie wyników badań eksperymentalnych.

W rozdziale siódmym Doktorant przedstawia walidację algorytmu obliczeniowego. Autor rozprawy doktorskiej skorzystał z wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych w trzyszybowym zestawie okiennym, w którym jedna z komór wypełniona była materiałem fazowo zmiennym. Badania zostały wykonane w Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej w zespole Pana Profesora Dariusza Heima. Prace eksperymentalne obejmowały; po pierwsze: badania przegrody w komorze termicznej, co umożliwiała ocenę algorytmu numerycznego w zagadnieniu przenikania ciepła, po drugie: badania przegrody wmontowanej w elewację budynku, co umożliwiała ocenę algorytmu numerycznego w zagadnieniu

przenikania ciepła oraz propagacji i absorpcji promieniowania słonecznego. Stanowiska badawcze zostały oddzielnie opomiarowane, co umożliwiło porównanie wyników symulacji i eksperymentu. W obu badaniach w przygotowanych stanowiskach zastosowane było oszklenie trzyszybowe, w którym jedna z komór wypełniona była materiałem fazowo zmiennym, którym był RT18HC. Parametry fizyczne tego materiału zostały zamieszczone w tym rozdziale. Na podstawie przeprowadzonych badań w komorze termicznej i uzyskanych wyników Doktorant stwierdza, że symulacja wymiany ciepła w trakcie topienia materiału fazowo zmiennego w trzyszybowym pakiecie okiennym, w którym jedna z komór wypełniona jest materiałem fazowo zmiennym, a druga argonem, mimo przedstawionych przez Autora rozprawy rozbieżności, dała zadowalającą zgodność z eksperymentem przeprowadzonym w komorze termicznej. Odnotowana zgodność jest potwierdzeniem, że opracowany algorytm jest skutecznym narzędziem do analizy wymiany ciepła na drodze przenikania ze zjawiskiem przemiany fazy. Z kolei na podstawie przeprowadzonych eksperymentów w przegrodzie zainstalowanej w elewacji zewnętrznej Doktorant stwierdza, że opracowany algorytm numeryczny pozwala na efektywną symulację wymiany ciepła na drodze przenikania oraz, że algorytm pozwala na skuteczne modelowanie przemiany fazy wywołanej wymianą ciepła i absorpcją promieniowania słonecznego. Opracowany przez Doktoranta algorytm jest wystarczająco dokładny do analizy opłacalności stosowania materiału fazowo zmiennego w przegrodach przezroczystych, a odwzorowana za jego pomocą wymiana ciepła na drodze przenikania i przemiany fazy wykazała wysoką zgodność z wynikami eksperymentów. Zaprezentowane w tym rozdziale wyniki wraz z wnioskowaniem są potwierdzeniem pierwszej tezy niniejszej rozprawy doktorskiej.

W rozdziale ósmym Pan mgr inż. Tomasz K. Kułakowski przedstawia rozważania dotyczące analizy parametrycznej okna trzyszybowego z warstwą materiału fazowo zmiennego pod kątem weryfikacji drugiej tezy. Doktorant zwraca uwagę na potrzebę dokładnego i precyzyjnego projektowania przegród posiadających materiał fazowo zmienny, który charakteryzuje się różnymi parametrami fizycznymi, gdyż zastosowanie materiału zmienno fazowego o błędnie dobranym zakresie temperatury topnienia, ciepła przemiany lub geometrii zasobnika może nie tylko nie poprawić termicznej efektywności przegrody, ale nawet ją pogorszyć. Symulacje komputerowe umożliwiają ocenę możliwości poprawy efektywności energetycznej, ekologicznej i ekonomicznej wynikającą z zastosowania okien modyfikowanych materiałami fazowo zmiennymi i ich porównanie z oknami konwencjonalnymi. Pan mgr inż. Tomasz K. Kułakowski rozpatrywał różne zmienne w trzyszybowym zestawie okiennym z materiałem fazowo zmiennym, mające istotny wpływ na bilans energetyczny w odniesieniu do konwencjonalnego zestawu okiennego. Tymi zmiennymi były: cechy charakterystyczne przyjętego materiału fazowo zmiennego (zakres temperatur topnienia i krzepnięcia, ciepło przemiany), geometria przegrody (umieszczenie warstwy materiału fazowo zmiennego i jej grubość), warunki brzegowe (temperatury

powietrza atmosferycznego, temperatura powietrza wewnętrznego, natężenie promieniowania słonecznego, a także dynamika ich zmian). Po wykonaniu szeregu analiz Doktorant stwierdza, że trzyszybowe okno z odpowiednio dobranym materiałem fazowo zmiennym pozwala na poprawę efektywności energetycznej, ekologicznej i ekonomicznej w polskich warunkach klimatycznych o około 10% dla wariantu najkorzystniejszego w odniesieniu do okna referencyjnego. Dla wielu z rozpatrywanych wariantów na wszystkich elewacjach udało się wykazać redukcję zapotrzebowania na energię chłodniczą, jednak w żadnym z wariantów nie udało się uzyskać poprawy w sezonie grzewczym. Jest to ważna uwaga, zważając na to, że budynki w polskich warunkach klimatycznych funkcjonują zarówno w okresach występowania niskich jak i wysokich temperatur powietrza atmosferycznego, a także znaczących wahań dotyczących intensywności promieniowania słonecznego. Autor pracy zwraca uwagę na istniejący potencjał wykorzystania tego typu przegród w sytuacjach pojawiania się nadmiernych problemów z przegrzewaniem pomieszczeń np. w budynkach pozbawionych instalacji chłodniczej.

Rozdział 9 - Wnioski - zawiera merytoryczne informacje podsumowujące wykonaną rozprawę doktorską. Doktorant zwraca uwagę na opracowany autorski algorytm obliczeniowy pozwalający na symulację sprzężonych procesów termicznych i optycznych w transparentnej przegrodzie częściowo wypełnionej materiałem fazowo zmiennym. Autor pracy wykonał symulację wymiany ciepła przy użyciu Metody Objętości Kontrolnych, a rozważania dotyczące absorpcji i propagacji promieniowania słonecznego wykonał przy użyciu Metody Bilansowania Promieniowania Netto. Są to oryginalne, innowacyjne podejścia. Rozdział zawiera informacje o analizach wykonanych przez Doktoranta w kontekście weryfikacji pierwszej i drugiej tezy pracy. Rezultatem wykonanych analiz w ramach niniejszej pracy są sformułowane przez Pana mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego i zamieszczone w niniejszym rozdziale wnioski szczegółowe w liczbie pięć. Podsumowaniem tego rozdziału są przedstawione przez Doktoranta tematy dalszych badań ukierunkowanych na ocenę trzyszybowych okien wyposażonych w materiały fazowo zmienne, wynikające z rozważań naukowych zrealizowanych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 10 – Bibliografia – Doktorant skompletował 86 pozycji literaturowych, z których skorzystał na etapie przygotowywania założeń do pracy oraz w trakcie prowadzenia kolejnych rozważań naukowych. W większości są to artykuły naukowe, opublikowane w renomowanych czasopismach w ostatnich latach. Znajdują się także pozycje zwarte opracowane jako monografie i podręczniki. Zamieszczone pozycje literaturowe są ściśle związane z tematyką wykonanej rozprawy doktorskiej

Układ pracy doktorskiej zrealizowanej przez Pana mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego jest należycie opracowany. Zaproponowana tematyka i kolejność poszczególnych rozdziałów jest poprawna i odpowiednia w kontekście naukowej zawartości dysertacji doktorskiej. Układ wykonanej pracy doktorskiej jest czytelny

i umożliwia zapoznanie się z poszczególnymi, poruszonymi w dysertacji zagadnieniami naukowymi.

#### **4. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej**

Pan mgr inż. mgr inż. Tomasz K. Kułakowski zestawiał w przemyślany i rozsądny sposób zestaw potrzebnych pozycji literaturowych. W rozdziale dziesiątym Doktorant wymienił osiemdziesiąt sześć pozycji literaturowych, które zostały wykorzystane do opracowania przedmiotowej pracy doktorskiej. W większości są to artykuły naukowe opublikowane w ostatnich latach. W tym wykazie znajdują się również podręczniki i monografie naukowe. Należy stwierdzić, że zamieszczone pozycje literaturowe są ściśle związane z tematyką zrealizowanej dysertacji doktorskiej. Od strony formalnej przytoczone pozycje literaturowe zostały poprawnie opisane. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej jest pozytywna.

#### **5. Wskazanie oraz ocena celu pracy Kandydata do stopnia doktora**

Cel dysertacji doktorskiej został w sposób właściwy sformułowany przez Pana mgr inż. mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego i odnosi się do możliwości poprawy charakterystyki energetycznej budynków poprzez aplikację innowacyjnych rozwiązań materiałowo-technologicznych mogących znaleźć zastosowanie w przegrodach budowlanych. Doktorant wskazuje na potencjał wykorzystania materiałów fazowo zmiennych w budownictwie do poprawy energoefektywności budynków. Autor pracy przedstawia główne cele stosowania materiałów fazowo zmiennych w budownictwie w kontekście potrzeb grzewczych, a także w kontekście potrzeb chłodniczych. Ważnym naukowym obszarem badawczym związanym z energooszczędnością w budownictwie są zagadnienia zastosowania materiałów fazowo zmiennych w przegrodach transparentnych. Cel pracy zawiera aspekty naukowe jak też i aplikacyjne. Głównym celem naukowym wykonanej pracy doktorskiej było stworzenie przez Pana mgr inż. mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego autorskiego algorytmu numerycznego służącego symulacji wymiany ciepła w rozważanej przegrodzie transparentnej modyfikowanej materiałem fazowo zmiennym, przy pomocy którego będzie możliwa weryfikacja sformułowanych w rozprawie tez badawczych. Doktorant opracował autorski algorytm numeryczny pozwalający na symulację wymiany ciepła w trakcie przemiany fazy ze szczególnym uwzględnieniem wpływu energii promieniowania słonecznego. W trakcie kolejnych etapów wykonywania pracy doktorskiej Autor pracy poddał program weryfikacji numerycznej w zakresie zgodności, stabilności i zbieżności dla zagadnienia nieustalonej wymiany ciepła na drodze przewodzenia, analizie zbieżności dla zagadnienia wymiany ciepła z uwzględnieniem zjawiska przemiany fazy, walidacji na podstawie wyników eksperymentu



przeprowadzonego w przyjętej przegrodzie znajdującej się w komorze termicznej w kontekście zgodności symulacji z wynikami pomiarów w zakresie przenikania ciepła, a także walidacji na podstawie wyników eksperymentu przeprowadzonego w przyjętej przegrodzie wmontowanej w elewację budynku w aspekcie zgodności symulacji z wynikami pomiarów. Cel aplikacyjny związany był z wykonaniem symulacji wymiany ciepła w trzydziestu dwóch wariantach rozpatrywanej przegrody w typowym roku meteorologicznym dla stacji pogodowej Warszawa-Okęcie, biorąc pod uwagę weryfikację drugiej tezy pracy.

Sformułowane wnioski końcowe mające związek z tezami pracy oraz przedstawienie kierunków dalszych badań wraz z wszystkimi składowymi pracy pozwalają na pozytywną ocenę celu pracy Kandydata do stopnia doktora.

## **6. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych**

Pan mgr inż. Tomasz K. Kułakowski mając na uwadze przyjęte w wykonywanej dysertacji założenia naukowe, a także uwzględniając cel pracy oraz sformułowane tezy, zastosował właściwe metody badawcze. Doktorant w sposób szczegółowy dokonał przeglądu metod obliczeniowych służących do symulacji wymiany ciepła. W większości są to numeryczne metody przybliżonego rozwiązywania równań różniczkowych. Autor dysertacji wymienia: Metodę Różnic Skończonych, Metodę Objętości Kontrolnych, Metodę Elementów Skończonych, Metodę Elementów Brzegowych. Kolejno Doktorant prezentuje każdą z metod, zwracając uwagę na jej zalety ale też i istniejące ograniczenia. Każda z przedstawionych przez Doktoranta metod obliczeniowych umożliwia analizę wymiany ciepła przez przegrody budowlane, w których zastosowany został materiał fazowo zmienny. Doktorant do wykonania obliczeń w ramach realizowanej pracy wybrał Metodę Objętości Kontrolnych uzasadniając to przekonująco w tekście pracy. Doktorant opracował autorski algorytm obliczeniowy, zrealizowany na potrzeby przeprowadzenia badań wynikających z przyjętego zakresu pracy. Dla oceny algorytmu numerycznego w kontekście możliwości analizy założonego problemu matematycznego Doktorant wykonał jego weryfikację w zakresie zgodności równania dyskretnego z równaniem ciągłym, stabilności dotyczącej sprawdzenia nienarastania błędu zaokrąglenia w kolejnych krokach czasowych oraz zbieżności w kontekście sprawdzenia spełnienia wymagań twierdzenia Laxa. Ważną częścią pracy są badania eksperymentalne, które obejmowały badania przegrody w komorze termicznej w celu oceny algorytmu numerycznego w zagadnieniach przenikania ciepła oraz badania przegrody wkomponowanej w elewację budynku w celu oceny algorytmu numerycznego w zagadnieniu przenikania ciepła rozprzestrzeniania i absorpcji promieniowania słonecznego. Stanowiska badawcze zostały opomiarowane, co umożliwiło porównanie wyników uzyskanych na drodze założonych symulacji oraz z badań

eksperymentalnych. Zastosowane przez Pana mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego metody badawcze, umożliwiające realizację przedmiotowej pracy doktorskiej należy ocenić bardzo pozytywnie.

## **7. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań**

Wyniki badań przedstawione przez Pana mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego są ściśle związane z przeprowadzonymi badaniami wynikającymi z przyjętych założeń. Ważne wyniki zamieszczone w pracy mają związek z weryfikacją oraz walidacją algorytmu numerycznego, co miało związek z potwierdzeniem pierwszej tezy badawczej. Uzyskane wyniki potwierdziły zbieżność algorytmu, a także jego zgodność i stabilność. Pozytywna weryfikacja pozwoliła na wykonanie walidacji algorytmu w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych. Walidacja umożliwiła wykorzystanie programu do weryfikacji drugiej tezy odnoszącej się do możliwości stosowania w warunkach klimatycznych Polski trzyszybowych zestawów okiennych wyposażonych w warstwę materiału fazowo zmiennego. Na potrzeby uzyskania miarodajnych wyników Doktorant wykonał symulację wymiany ciepła, uwzględniając udział promieniowania słonecznego dla trzydziestu dwóch wariantów obejmujących różne cechy charakterystyczne materiału fazowo zmiennego, a także rozwiązania geometryczne przegrody transparentnej. Uzyskane wyniki z przeprowadzonych badań umożliwiły Doktorantowi sformułowanie wniosków szczegółowych oraz wytyczyć kierunki przyszłych badań w tematyce zrealizowanej pracy doktorskiej. Część rozprawy doktorskiej dotycząca omówienia wyników badań została zrealizowana bardzo rzetelnie i precyzyjnie.

## **8. Informacja dotycząca praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań**

Pan mgr inż. Tomasz K. Kułakowski zrealizował w ramach rozprawy doktorskiej badania naukowe, które pozwalają na praktyczne zastosowanie uzyskanych wyników badań. Przede wszystkim należy podkreślić, że prowadzone w pracy rozważania naukowe dotyczą poprawy właściwości cieplnych przegród budowlanych. Innowacyjne przegrody budowlane, a takie są rozważane w przedmiotowej dysertacji, mają bardzo duże znaczenie w kontekście charakterystyki energetycznej budynków. Ważnym praktycznym znaczeniem uzyskanych wyników jest zwrócenie uwagi przez Doktoranta na możliwości jakie oferują obliczenia numeryczne w kontekście pogłębionych analiz, umożliwiających przeprowadzenie dużej liczby wielowariantowych analiz i obliczeń. Uzyskane wyniki mają duże praktyczne znaczenie. Wykonana praca doktorska, przeprowadzone rozważania naukowe realizowane były z uwzględnieniem praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań.

## 9. Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

Wykonana przez Pana mgr inż. mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego rozprawa doktorska jest rzetelnym opracowaniem naukowym, jednak po zapoznaniu się z całością opracowania, nasuwają się pewne uwagi - pytania o charakterze krytyczno-dyskusyjnym, uzupełniającym całość opracowania:

- czy istniały problemy dotyczące uszczelnienia przestrzeni, które zostały wypełnione materiałem fazowo zmiennym ?
- jakie zalecenia przyszłościowe można sformułować w tym obszarze funkcjonowania przegród z materiałami fazowo zmiennymi ?
- czy zostały zaobserwowane zagadnienia dotyczące chemicznej agresywności materiałów fazowo zmiennych ?
- gazem szlachetnym stosowanym w pakietach szybowych był argon – czy Doktorant rozważał zastosowanie innych gazów szlachetnych ?
- czy była rozważana tematyka zastosowania rolet lub żaluzji okiennych (od strony zewnętrznej lub wewnętrznej) w celu poprawy efektywności termicznej badanych przegród ?
- jaka jest opinia Doktoranta w temacie zastosowania rozważanych przegród transparentnych w szklanych przybudówkach, będących jednym z systemów pasywnego wykorzystania energii promieniowania słonecznego ?
- czy rozważane przegrody mogą być stosowane w przezroczystych drzwiach tarasowych, balkonowych o dużych wymiarach ?
- Doktorant napisał na str. 165 o: „Zasadności stworzenia czteroszybowych okien z warstwą MFZ...” czy takie zestawy – zdaniem Doktoranta - mogą być efektywne i użyteczne do stosowania w budynkach ?
- czwartym wnioskiem szczegółowym zamieszczonym w pracy jest (str. 164): „W ramach analizowanych wariantów nie udało się znaleźć jednego wspólnego rozwiązania poprawiającego efektywność energetyczną zarówno w okresie sezonu grzewczego, jak i chłodniczego” – jaka powinna być hierarchia ważności – zdaniem Doktoranta – dalszych badań (zaproponowanych w pracy) mających na celu poprawę efektywności energetycznej tych przegród ?
- na str. 24 Doktorant napisał: „...Bez wątplenia okno z warstwą MFZ ogranicza w znacznym stopniu kontakt wzrokowy ze środowiskiem zewnętrznym stając się przegrodą przezierną o zmiennych parametrach optycznych...” – jak zdaniem Doktoranta takie ograniczenie może wpłynąć na komfort użytkownika pomieszczenia wyposażonego w okno z warstwą MFZ ?

Wykonana praca doktorska jest bardzo starannie zredagowana pod względem edytorskim (wyjątek: str. 36 – „autor postanowili go pominąć”), zarówno w części opisowej jak też graficznej.

#### **10. Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**

Wykonana przez Pana mgr inż. mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego rozprawa doktorska trafnie wpisuje się we współczesne zagadnienia naukowe związane z prowadzeniem prac badawczych dotyczących energoefektywności w budownictwie.

Do oryginalnych zagadnień dotyczących rozwiązania problemu naukowego można zaliczyć:

- opracowanie autorskiego algorytmu numerycznego służącego do symulacji wymiany ciepła w trakcie przemiany fazy z uwzględnieniem wpływu energii promieniowania słonecznego.
- modelowanie sprzężonych procesów termicznych i optycznych w przegrodzie transparentnej z uwzględnieniem znajdującego się w przegrodzie materiału fazowo zmiennego w którym rozrózniono stan płynny, stały i przejściowy.
- symulację bilansu energetycznego okna z warstwą materiału fazowo zmiennego w ciągu pełnego roku meteorologicznego,
- analizę parametryczną trzydziestu dwóch wariantów zestawu okiennego składającego się z potrójnego przeszklenia ze znajdującą się wewnątrz warstwą materiału fazowo zmiennego, biorąc pod uwagę efektywność energetyczną, ekologiczną i ekonomiczną w odniesieniu do przegrody tradycyjnej,
- wybór najlepszych parametrów obliczeniowych do symulacji długookresowej na podstawie wyników weryfikacji, walidacji oraz analizy uwarunkowania algorytmu numerycznego.

Wykonana przez Pana mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, zawartość merytoryczna pracy świadczy o właściwym przygotowaniu Kandydata do prowadzenia badawczych prac naukowych. Doktorant wykonał szczegółowy przegląd literatury w zakresie zastosowania materiałów fazowo zmiennych w przegrodach transparentnych oraz wykorzystania metod numerycznych służących rozwiązywaniu problemu wymiany ciepła w trakcie przemiany fazy. Kolejne etapy, doktorskiego wywodu naukowego stanowią spójną całość mającą ścisły związek z przyjętymi założeniami badawczymi. Przedstawione w pracy wnioski końcowe mają związek z naukowym tokiem pracy, a zamieszczone informacje o kierunkach dalszych badań dopełniają całości opracowania doktorskiego.

## **11. Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria lądowa i transport oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**

Po szczegółowym zapoznaniu się z merytoryczną zawartością recenzowanej dysertacji doktorskiej, stwierdzam, że wykonana rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Pana mgr inż. mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego do stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria lądowa i transport.

Doktorant zajął się ważnymi zagadnieniami, mającymi istotne znaczenie w problematyce energoefektywnych rozwiązań materiałowo-technologicznych w obszarze budownictwa. Doktorant rozważał naukowe zagadnienia mające ścisły związek z wiedzą teoretyczną, między innymi opracował autorski algorytm obliczeniowy do symulacji zjawisk wymiany ciepła i procesów optycznych zachodzących w trzyszybowym oknie, w którym jedna z komór wypełniona jest materiałem fazowo zmiennym. Algorytm oparty o Metodę Objętości Kontrolnych, który do symulacji wartości promieniowania słonecznego wykorzystuje Metodę Bilansowania Promieniowania Netto, a w zakresie przemiany fazy zmodyfikowaną metodę Mushy Volume Tracking. Autor rozprawy doktorskiej wykorzystał w swoich rozważaniach algorytm do symulacji wymiany energii w ciągu pełnego roku meteorologicznego, w kontekście możliwości zaprojektowania parametrów badanej przegrody w taki sposób, aby zasadne było jej stosowanie w polskich warunkach klimatycznych. Doktorant rozpatrywał aspekty efektywności energetycznej, ekologicznej i ekonomicznej, co umożliwiło wytypowanie wariantu dającego najlepsze rezultaty w okresach grzewczym, chłodniczym oraz na przestrzeni całego roku.

W toku prowadzonych naukowych rozważań i prac badawczych Pan mgr inż. Tomasz K. Kułakowski wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Doktorant posiada wyróżniający się dorobek publikacyjny, związany tematycznie z naukowym obszarem obejmującym przedstawione rozważania w zrealizowanej rozprawie doktorskiej.

## **12. Podsumowanie**

Pan mgr inż. mgr inż. Tomasz K. Kułakowski w zrealizowanej rozprawie doktorskiej pt: „Modelowanie i analiza procesów wymiany ciepła w oszkleniu wypełnionym materiałem fazowo zmiennym”, wykonanej pod opieką naukową Pana Promotora dr hab. inż. Dariusza Heima, prof. Politechniki Łódzkiej oraz Pana Promotora pomocniczego dr inż. Arkadiusza Węglarza zajął się ważną tematyką naukową, dotyczącą innowacyjnych transparentnych przegród budowlanych, które zastosowane w budynkach mogą przyczynić się do poprawy charakterystyki energetycznej tych budynków. Charakterystyka energetyczna budynków ma istotny wpływ na funkcjonowanie budynków w kontekście ich zapotrzebowania na energię.

Kandydat w wykonanej rozprawie doktorskiej przedstawił wyniki badań dotyczące modelowania i symulacji wymiany ciepła i procesów optycznych, które zachodzą w trzyszybowym zestawie okiennym, w którym w jednej z komór znajduje się materiał fazowo zmienny. Autor opracował własny algorytm obliczeniowy służący do symulacji złożonych zjawisk fizycznych w przyjętej do analizy przegrodzie. Algorytm został zweryfikowany w oparciu o ścisłe rozwiązania nieustalonej wymiany ciepła, przy uwzględnieniu zjawiska przemiany fazy, a także został zwalidowany przy wykorzystaniu wyników badań eksperymentalnych. Ważną częścią wykonanej pracy są rozważania naukowe dotyczące możliwości doboru parametrów rozpatrywanej przegrody tak, aby jej zastosowanie w polskich warunkach klimatycznych było zasadne w kontekście efektywności energetycznej.

Zrealizowana dysertacja doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu naukowego w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa i transport oraz posiada duże wartości w zakresie zastosowania otrzymanych wyników badań naukowych w sferze gospodarczej.

Zamieszczone w recenzji dyskusyjne uwagi krytyczne nie pomniejszają merytorycznej zawartości wykonanej dysertacji doktorskiej.

### **13. Wniosek końcowy**

Przedstawiona do recenzji przedmiotowa rozprawa doktorska pt: „Modelowanie i analiza procesów wymiany ciepła w oszkleniu wypełnionym materiałem fazowo zmiennym”, wykonana przez Pana mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego, której Promotorem jest Pan dr hab. inż. Dariusz Heim, prof. Politechniki Łódzkiej, a Promotorem pomocniczym jest Pan dr inż. Arkadiusz Węglarz, spełnia wymagania określone w art. 186 ust. 1 pkt 5 oraz w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 roku poz. 478 ze zm.) oraz spełnia wymagania określone w art. 13 ust.1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789, z późn. zm.).

W związku z powyższym przedstawiam pozytywną konkluzję i uprzejmie wnoszę o przyjęcie przedmiotowej rozprawy doktorskiej oraz wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego do kolejnych etapów przewodu doktorskiego - Ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 roku poz. 478 ze zm.) art. 191.1.

Równocześnie zgłaszam wniosek o wyróżnienie przedmiotowej rozprawy doktorskiej. Uzasadnieniem wniosku jest podjęcie przez Pana mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego rozważań naukowych, których złożoność i trudność zasługuje na podkreślenie. Wykonane, naukowe prace badawcze oraz sformułowane ważne wnioski mogą być rozważane w kontekście ich praktycznego zastosowania. Naukowe

problemy wynikające z tematyki i zakresu przedmiotowej pracy doktorskiej zostały rozpatrywane i analizowane w sposób dokładny i wnikliwy. Na szczególne uznanie zasługuje modelowanie sprzężonych procesów termicznych i optycznych w przegrodzie transparentnej z uwzględnieniem dynamicznego zachowania znajdującego się w przegrodzie materiału fazowo zmiennego oraz wykonanie symulacji bilansu energetycznego okna z warstwą materiału fazowo zmiennego w ciągu pełnego roku meteorologicznego. Istotną wartością rozprawy jest analiza parametryczna trzydziestu dwóch wariantów trzyszybowego okna z warstwą materiału fazowo zmiennego w kontekście ich efektywności energetycznej, ekologicznej i ekonomicznej w odniesieniu do przegrody konwencjonalnej. Zrealizowana przez Pana mgr inż. Tomasza K. Kułakowskiego rozprawa doktorska jest kompletnym opracowaniem naukowym, została wykonana na wysokim poziomie i wnosi nowe wartości w naukowym obszarze dotyczącym energoefektywności w budynkach.



