

**RECENZJA**  
rozprawy doktorskiej

**„WPŁYW MIKROSTRUKTURY POWIERZCHNI NA KONTAKTOWY OPÓR CIEPLNY  
STYKU BETONÓW Z TERMOIZOLACJĄ”**

Pana mgr inż. Arkadiusza Urzędowskiego

**1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawę formalną niniejszego opracowania stanowi pismo Pana dr hab. inż. Tomasza Lipeckiego Zastępcy Przewodniczącego ds. postępowań awansowych Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Lubelskiej z dnia 13.10.2023r. z prośbą o opracowanie recenzji rozprawy doktorskiej „*Wpływ mikrostruktury powierzchni na kontaktowy opór cieplny styku betonów z Termoizolacją*”, pana mgr inż. Arkadiusza Urzędowskiego. Rozprawa została przesłana pocztą tradycyjną w formie wydrukowanej z zapisem elektronicznym (na płycie CD).

Podstawę prawną stanowi Ustawa *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018r. (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668) z późniejszymi zmianami, tj. *Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej* z dnia 10 marca 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, Dz. U. 2023 poz. 742, szczególnie Dział V *Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki*, Rozdział 2 *Stopień doktora*, Oddział 1 *Nadawanie stopnia doktora*, Art.187.

Merytoryczną ocenę dokonałam na podstawie treści przesłanej rozprawy.

**2. Charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej**

**2.1. Struktura rozprawy**

Rozprawa składa się z dziesięciu numerowanych rozdziałów, które mają następujące tytuły: rozdział 1 – *Wstęp* (3,5 strony), rozdział 2 – *Przegląd literatury* (30 stron), rozdział 3 – *Tezy, Cel i Zakres pracy* (3 strony), rozdział 4 – *Materiały wykorzystane do badań* (5 stron), rozdział 5 – *Metodyka przeprowadzonych badań* (59 stron), rozdział 6 – *Wyniki badań i ich dyskusja* (56 stron), rozdział 7 – *Statystyka* (9 stron), rozdział 8 – *Analiza efektywności energetycznej budynku po zastosowaniu przegród z powłoką refleksyjno - wygładzającą* (3 strony), rozdział 9 – *Weryfikacja opracowanych rozwiązań w warunkach rzeczywistych* (14

stron), rozdział 10 – *Wnioski końcowe i kierunki dalszych badań* (4 strony). W tym miejscu należy nadmienić, że numeracja rozdziałów w spisie treści jest niezgodna z dalszą numeracją rozdziałów w rozprawie, bowiem w spisie treści *Wstęp* jest numerowany jako rozdział 1, natomiast w samej rozprawie nie jest on numerowany. W konsekwencji numeracja w tekście rozprawy jest mniejsza o jeden od tej zawartej w spisie treści, co utrudnia odnoszenie się do poszczególnych rozdziałów. Po rozdziałach numerowanych zamieszczone są nienumerowane części pracy, do których należą: *Bibliografia*, *Wykaz norm i wytycznych*, *Strony internetowe*, *Spis tabel*, *Spis rysunków*. Na początku rozprawy po spisie treści znajduje się *Oznaczenie skrótów i symboli*, *Streszczenie i Abstract*. Bibliografię (nienumerowaną, podaną w kolejności alfabetycznej) stanowi spis 144 pozycji literaturowych, przy czym trzy z nich są współautorstwa Kandydata i w dwóch z nich jest On pierwszym autorem. *Wykaz norm i wytycznych* stanowi 25 aktów prawnych w postaci norm i jednej Pre-Normy, jedna pozycja to *Tablice Ciepłote*, a jedna dotyczy Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady Europy. Ponadto odwołano się do trzynastu adresów stron internetowych, z których zaczerpnięto wybrane dane i inne wielkości wykorzystane do badań. Rozprawa zawiera 66 tabel i 97 rysunków. Całość liczy 225 stron.

Praca jest bardzo obszerna. Poszczególne rozdziały są bardzo starannie przygotowane i odpowiednio ilustrowane, zdjęciami i schematami stanowisk badawczych oraz ich elementami składowymi, zdjęciami badanych obiektów i próbek, a także graficzną interpretacją algorytmów prowadzonych badań symulacyjnych, stosowanych metod dyskretyzacji przestrzeni, oraz uzyskanych wyników obliczeniowych, eksperymentalnych (laboratoryjnych) oraz pomiarowych w warunkach rzeczywistych. Poszczególne rozdziały są dobrze ze sobą powiązane i stanowią spójną całość, poza jednym wyjątkiem, a mianowicie punktem 4.8 (w spisie treści 5.8) w rozdziale dotyczącym *Metodyki przeprowadzonych badań*. Punkt 4.8 nie stanowi bowiem żadnego istotnego elementu metodyki badawczej Kandydata, a odnosi się do standardowej metodyki wyznaczania charakterystyki energetycznej budynków. Wyniki uzyskane przez Kandydata w odniesieniu do zmniejszenia współczynnika przenikania ciepła przegrody można wykorzystać właśnie przy tworzeniu charakterystyki energetycznej budynku. Dzięki zastosowaniu w praktyce jednej z opracowanych przez Kandydata metod zwiększenia oporu kontaktowego struktury wielowarstwowej przegrody obudowy zewnętrznej zmniejszeniu ulegnie współczynnik przenikania ciepła przez przegrodę, co oczywiście wpłynie na zmniejszenie wskaźnika sezonowego zapotrzebowania na ciepło, w konsekwencji wskaźnika zużycia energii końcowej i pierwotnej. Punkt ten powinien być przeniesiony do rozdziału 8.

Tytuł rozprawy odpowiednio odzwierciedla analizowany problem badawczy.

## **2.2 Treść i ocena merytoryczna rozprawy**

**Rozprawa doktorska jest napisana na bardzo wysokim poziomie i obrazuje ogrom pracy badawczej włożonej w jej przygotowanie przez Kandydata.** Przedstawienie w bardzo szczegółowy sposób przeprowadzonego przeglądu literatury, udokumentowanie podjęcia się przedmiotowych badań, sformułowanie tez i celu pracy, oraz opis wykonanych badań

teoretycznych, a przede wszystkim duża liczba przeprowadzonych badań laboratoryjnych, symulacji numerycznych, a także badań polowych popartych wnikliwą analizą uzyskanych wyników, oraz sformułowane wnioski o charakterze podstawowym i aplikacyjnym, **stanowią o istotnej wyróżniającej się wartości naukowo – badawczej pracy.**

Układ treści jest przejrzysty i uporządkowany, co wynika ze wspomnianej w punkcie 2.1 dobrze opracowanej struktury pracy (poza punktem 4.8 (5.8)). Poszczególne rozdziały koncentrują się na poszczególnych podstawowych zagadnieniach pracy i odzwierciedlają chronologię przeprowadzonych badań. Rozdziały są odpowiednio ze sobą połączone i tworzą logiczną całość (poza wspomnianym punktem 4.8 (5.8)).

We *Wstępie* w sposób skrótowy uzasadniono podjęcie tematyki badawczej związanej z zagadnieniem przekazywania ciepła między ciałami, których powierzchnie styku nie są idealnie gładkie i wyznaczaniem oporu cieplnego kontaktowego. Kandydat sygnalizuje zakres rozważanych w pracy zagadnień, do których jako podstawowe należą analiza topografii powierzchni kontaktujących się ciał, badania cieplne przegród warstwowych w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych, oraz symulacje numeryczne transportu ciepła na zwalidowanych modelach trójwymiarowych tych ośrodków. Kandydat bardzo trafnie zauważa, że istnieją sytuacje, w których mikro-przestrzenie wypełnione powietrzem występujące na powierzchniach kontaktu warstw przegrody mają wpływ na wymianę ciepła w całej przegrodzie i powinny być uwzględniane we współczynnikach poprawkowych przenikania ciepła.

Kolejny rozdział (nr 1 w treści rozprawy) dotyczy przeglądu literatury krajowej i zagranicznej w obszarze zagadnień wymiany ciepła w różnych ośrodkach i na ich styku. Kandydat zauważa, iż w technice budowlanej „*nie prowadzono badań wpływu mikrostruktury powierzchni na kontaktowy opór cieplny styku materiałów*”. Przedstawione rozważania mają charakter badań podstawowych. Na wstępie Kandydat rozważa mechanizmy transportu ciepła w przegrodach, w szczególności modele matematyczne opisujące pola temperatury w różnych ośrodkach oraz proste i złożone mechanizmy przepływu ciepła w tych ośrodkach, w tym na styku ciał przenoszących ciepło. Kandydat opisuje metody modelowania matematycznego kontaktowego oporu cieplnego, metody pomiaru geometrii kontaktu ciał, a także metody numeryczne służące do analiz symulacyjnych dynamiki zachodzących zjawisk cieplnych przy wykorzystaniu oprogramowania obliczeniowej mechaniki płynów CFD. Rozdział ten obrazuje dużą wiedzę podstawową Kandydata z zakresu modelowania matematycznego i symulacji numerycznej mechanizmów transportu ciepła i masy, a także wybranych metod pomiarowych.

W następnym rozdziale (nr 2 w treści rozprawy) Kandydat sformułował problem naukowy, cel i tezy pracy oraz określił ich zakres i nowości naukowe występujące w pracy. Kandydat podjął się istotnej problematyki naukowej, która powinna dać mierzalne efekty aplikacyjne. Prowadzone badania mają skutkować ograniczeniem zapotrzebowania na ciepło na cele ogrzewania budynków dzięki zmniejszeniu strat ciepła przez przegrody warstwowe obudowy budynku, co ma być skutkiem zwiększenia oporu cieplnego przegród, a dokładnie oporu kontaktowego powierzchni betonu od strony styku z termoizolacją. **Sformułowany problem badawczy, cel i tezy pracy jasno definiują zakres koniecznych do**

**przeprowadzenia badań i wykazują możliwość osiągnięcia istotnych korzyści aplikacyjnych oraz obrazują unikalność naukową podjętych prac w zakresie badań dotyczących technik budowlanych.** Tezy są odpowiednio sformułowane. Jednakże, ostatnia teza ma charakter uniwersalny i jest tak naprawdę standardowym elementem badań, i tak powinna być traktowana, bowiem „wyniki otrzymane na drodze prowadzonych symulacji komputerowych transportu ciepła w strukturach warstwowych” powinny być potwierdzeniem wyników badań z doświadczalnej części pracy, jeżeli model matematyczny i symulacja numeryczna prowadzonych zjawisk zostały dobrze opracowane. Zakres pracy zawiera piętnaście (punktów) kolejnych etapów badań dobrze przemyślanych i sformułowanych przez Kandydata, jako konieczne do realizacji postawionych celów badawczych i udokumentowania sformułowanych tez.

Kolejny rozdział (rozdział 3) opisuje materiały budowlane wykorzystane do badań i pięć konfiguracji analizowanych płaskich wielowarstwowych przegród. Opisy są bardzo szczegółowe, zawierają przedstawienie podstawowych parametrów, właściwości użytkowych i fizycznych poszczególnych materiałów i mieszanek betonowych. Odpowiednio dokumentują dane materiałów badanych w pracy.

Następny rozdział (rozdział 4) jest bardzo istotny w odniesieniu do pokazania złożoności procesu badawczego dającego bardzo dobre podstawy osiągnięcia naukowego Kandydata. W rozdziale tym opisana została złożona metodyka prowadzenia badań w celu rozwiązania postawionego problemu, związana z trzema podstawowymi rodzajami badań, a mianowicie z badaniami laboratoryjnymi, symulacjami numerycznymi oraz badaniami polowymi w rzeczywistych warunkach. Zastosowana metodyka badawcza umożliwiała wzajemne uzupełnianie się kolejnych etapów badań, jak i odpowiednią walidację ich wyników. Należy podkreślić, że metodykę prowadzenia badań opracował sam Kandydat, co jest jednym z istotnych elementów Jego osiągnięcia naukowego.

Pierwszym etapem prac (rozdział 4) były prace laboratoryjne dotyczące badania właściwości powierzchni betonu i styropianu, i budowy modeli przegród warstwowych. Wymagały one opracowania odpowiedniej metody przygotowania próbek i metody ich badań. Prowadzone badania zawierały analizę makroskopową i mikroskopową, oraz pomiar emisyjności powierzchni. Pomiar emisyjności odbywał się na stanowisku zaprojektowanym i skonstruowanym przez Kandydata. Analiza mikroskopowa była związana z przeprowadzeniem badań metrologii powierzchni w układzie trójwymiarowym, do której wykorzystano zaawansowane metody skaningowe z wykorzystaniem skanera optycznego i profilometru skaningowego. Kolejnym etapem były dalsze badania laboratoryjne polegające na badaniu właściwości fizycznych materiałów budowlanych (betonu, styropianu), ich gęstości i współczynnika przewodzenia ciepła.

Etap trzeci dotyczył badania transportu ciepła w strukturach warstwowych i miał on charakter prac laboratoryjnych (badania w aparacie płytowym), jak i symulacji numerycznych. Analiza laboratoryjna związana była z wyznaczeniem zastępczego współczynnika przenikania ciepła przez przegrodę warstwową. Analiza numeryczna polegała natomiast na budowie modelu trójwymiarowego przegrody i jej fragmentów, w szczególności fragmentów szczelin

(mikropustek) powietrznych na styku warstw (wykorzystano narzędzia do komputerowego wspomaganie CAD) oraz na analizowaniu transportu ciepła w tych strukturach przy zastosowaniu programowania numerycznego zjawisk z zakresu mechaniki płynów (CFD). Ten etap badań obejmował również weryfikację i walidację opracowanego modelu numerycznego przepływu ciepła w przegrodzie, badania wpływu faktury powierzchni na kontaktowe opory cieplne między betonem a izolacją, oraz badania wpływu zmiany emisyjności powierzchni materiałów na opór cieplny w przestrzeniach między betonem a izolacją. Kandydat zbudował 66 cyfrowych modeli warstwowych, do konstrukcji których wykorzystywał wyniki z badań laboratoryjnych skaningowych różnych struktur. Dzięki temu możliwe było wyznaczenie oporów cieplnych w rozważanych szczelinach, przeprowadzenie analizy wielowariantowej, pod kątem różnych struktur przegród i ich wewnętrznych modyfikacji, oraz ostateczne testowanie zaproponowanych rozwiązań.

W celu odpowiedniego wyboru zbiorów otrzymanych wyników i oceny ich przydatności do dalszych rozważań Kandydat wykorzystał analizę statystyczną, co stanowiło 4 etap opracowanej metodyki badawczej.

Kolejnym 5 elementem opracowanej metodyki badań jest weryfikacja opracowanych rozwiązań strukturalnych w warunkach rzeczywistych. Kandydat przeprowadził badania polowe w rzeczywistych warunkach klimatycznych w odniesieniu do zaproponowanej modyfikacji refleksyjności powierzchni materiałów budowlanych występującej na styku dwóch warstw. Badania polowe były ukierunkowane na weryfikację zasadności zastosowania proponowanej modyfikacji refleksyjności pod kątem poprawy parametrów termoizolacyjnych płaskich przegród warstwowych, czyli wzrostu ich oporu kontaktowego. Pomiary wykonano w warunkach rzeczywistych w budynku gospodarczym na wybranej ścianie tego budynku. Rozpatrywano wariant referencyjny bez powłoki refleksyjnej i wariant z zastosowaniem warstwy farby refleksyjnej. Badania transportu ciepła w pionowych przegrodach warstwowych w warunkach rzeczywistych prowadzone były standardowo zgodnie z wytycznymi zawartymi w odpowiednich normach, co opisano w ostatnim punkcie rozdziału 4.9 w odpowiedni sposób. Należy nadmienić, że punkt 4.8 pt. „Analiza efektywności energetycznej budynku po zastosowaniu przegród z warstwą konstrukcyjną pokrytą powłoką refleksyjną” powinien zostać przeniesiony do końcowej części rozprawy, bowiem trudno go uznać za element metodyki badawczej prowadzonych przez Kandydata prac, o czym już wspomniano wcześniej. Niniejsza uwaga nie umniejsza wagi roli Kandydata w opracowaniu metodyki prowadzenia badań naukowych w zakresie poprawy jakości cieplnej struktur wielowarstwowych przegród budowlanych.

W rozdziale 5 Kandydat przedstawił wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych, symulacyjnych i polowych zgodnie z metodyką ich prowadzenia szczegółowo opisaną w rozdziale 4. Otrzymane wyniki zamieścił w postaci tabel i w formie dokumentacji graficznej, tj. zdjęć i tabel pomiarowych oraz symulacyjnych, jak i wykresów sporządzonych na ich podstawie. Następnie przeprowadził szczegółową analizę otrzymanych wyników. Zgodnie z przygotowaną przez Kandydata metodyką badań przeprowadzone analizy dotyczyły transportu ciepła i opierały się na wynikach badań laboratoryjnych, symulacji numerycznych

i badań doświadczalnych. Analiza geometryczna bazowała na wynikach badań laboratoryjnych skaningowych warstwy wierzchniej rozważanych powierzchni przegród. Po weryfikacji i walidacji modelu obliczeniowego, wykonano badania numeryczne uwzględniające zmianę chropowatości warstwy wierzchniej w skali mikro i makro, co dało wyniki pozwalające na przeprowadzenie szczegółowej analizy wpływu modyfikowanych powierzchni kontaktu na przebieg zjawisk wymiany ciepła, a w szczególności określenie zmian oporu kontaktowego w zależności od zastosowanych modyfikacji.

W przeprowadzonych badaniach Kandydat koncentrował się na dwóch podstawowych układach przegród warstwowych, a mianowicie na przegrodach pionowych wznoszonych z betonowych elementów prefabrykowanych, ze szczeliną między betonem a termoizolacją wypełnioną powietrzem lub klejem, oraz na przegrodach poziomych, w których keramzytobeton i termoizolacja były w bezpośrednim kontakcie. Otrzymane wyniki dla przegród pionowych ilustrują zmiany oporu cieplnego szczeliny przy zmianie własności mikrostruktury powierzchni kontaktu. Badane zmiany wynikają po pierwsze z zastosowania domieszek do betonu, po drugie z wypełnienia szczeliny zaprawą klejącą, oraz z pokrycia powierzchni kontaktu powłoką refleksyjno – wygładzającą. W każdym z wariantów Kandydat badał także wpływ zmiany odległości między powierzchnią betonu a izolacją cieplną (trzy warianty grubości szczeliny: 10, 15, 20 mm). W przegrodach poziomych z keramzytobetonów Kandydat badał wpływ szlifowania powierzchni na kontaktowy opór cieplny.

W wyniku przeprowadzonych badań i analizy uzyskanych wyników Kandydat wykazał istotny wpływ ukształtowania faktury betonu na opór kontaktowy na styku warstw materiałów. Naniesienie powłoki refleksyjno - wygładzającej skutkowało zmniejszeniem emisyjności powierzchni z  $\varepsilon=0,93$  do  $\varepsilon=0,29$ , co w konsekwencji powodowało wzrost oporu cieplnego w szczelinie powietrznej o ok. 88,5%. Wzrost oporu cieplnego szczeliny powietrznej powodowało również zastosowanie domieszek do betonu, w postaci przyspieszacza wiązania. W tym przypadku opór ten wzrósł o 1,9%. Dalszy wzrost oporu cieplnego o około 12%, uzyskano dzięki zwiększeniu grubości szczeliny powietrznej z 10 do 15 mm, a po naniesieniu powłoki refleksyjnej o około 19%. Zauważono również, że dalsze zwiększenie grubości szczeliny o 5 mm nie wpływa już w sposób istotny na wzrost oporu, bowiem rośnie on wtedy o około 2%. Kolejne obserwacje dotyczyły przegród poziomych. Otóż, jak można było oczekiwać, szlifowanie powierzchni keramzytobetonów powodowało znaczące zmiany struktury geometrycznej tej powierzchni. W strukturach przegród, w których keramzytobeton był w kontakcie z termoizolacją szlifowanie powierzchni powodowało spadek oporu cieplnego szczeliny powietrznej o około 70%. Przeprowadzone przez Kandydata badania i analiza otrzymanych wyników wyraźnie wskazują, iż wielkość i forma pustek powietrznych, stosowanie odpowiednich modyfikacji mikrostruktury powierzchni betonu wpływają na zmianę kontaktowych oporów cieplnych między betonem a termoizolacją.

Reasumując przeprowadzona analiza struktury geometrycznej powierzchni warstwowych przegród budowlanych jest istotna z punktu widzenia jasnego i czytelnego zobrazowania przebiegu zjawisk transportu ciepła zachodzących w budowlanych przegrodach warstwowych. Daje ona szereg wskazań zarówno co do badań o charakterze podstawowym,

jak i praktycznych zastosowań otrzymanych wyników. Zaproponowane przez Kandydata rozwiązania mikrostruktury mogą być stosowane jako innowacyjna metoda zwiększenia oporności cieplnej przegród obudowy budynków. Co więcej powinny one także wpłynąć na modyfikację normowych współczynników przenikania ciepła w przypadku przegród o strukturach warstwowych. Należy podkreślić, iż Kandydat podjął się próby wykazania korelacji między współczynnikiem przenikania ciepła przegród a wybranymi parametrami struktury, takimi jak: ukształtowanie powierzchni betonu wewnątrz szczeliny powietrznej, emisyjnością powierzchni betonu wewnątrz szczeliny powietrznej oraz grubością szczeliny między betonem a termoizolacją. Próba ta zakończyła się powodzeniem, co do wykazania istnienia takich korelacji. Do tej pory przyjmowano stałą wartość kontaktowego współczynnika oporu cieplnego przy wyznaczaniu współczynnika przenikania ciepła przez przegrody warstwowe. Jak słusznie zauważa Kandydat wpływ struktury powierzchni kontaktu (jej podstawowe własności) powinien być uwzględniany w obliczeniach kontaktowego współczynnika oporu cieplnego w obliczeniach normowych. Odpowiednie struktury kontaktowe mogą wpływać na ograniczenie przenikania ciepła przez przegrody. Celowa byłaby więc kontynuacja badań i sformułowanie odpowiednich ilościowych zależności korelacyjnych do wyznaczania oporu kontaktowego przegrody w zależności od struktury i własności pustek pomiędzy warstwami .

Kolejny rozdział 6 przedstawia statystyczną ocenę otrzymanych wyników. Ze względu na bardzo dużą liczbę uzyskanych wyników Kandydat zdecydował się na przeprowadzenie ich weryfikacji stosując odpowiednie metody statystyczne. Analizie rozbieżności statystycznych poddano wyniki badań transportu ciepła przegród zbudowanych z dwóch rodzajów betonów w odniesieniu do takich parametrów jak: opór cieplny przegrody, opór cieplny szczeliny powietrznej, emisyjność powierzchni betonu, średnia arytmetyczna wysokość struktury powierzchni. Brano pod uwagę trzy rodzaje przegród: ze szczeliną powietrzną między betonem a termoizolacją, ze szczeliną wypełnioną klejem, ze szczeliną powietrzną i powierzchnią betonu pokrytą powłoką o niskiej emisyjności.

Rozdział 7 dotyczy analiz efektywności energetycznej przykładowego budynku (opisanego w rozdziale dotyczącym metodyki w punkcie 5.9), którą przeprowadzono zgodnie z metodyką obowiązującą przy wyznaczaniu charakterystyki energetycznej budynków. Analizę przeprowadzono dla dwóch wariantów przegród obudowy, tj. przed i po naniesieniu powłoki refleksyjno – wygładzającej na powierzchnię betonu po stronie szczeliny powietrznej w ścianie konstrukcyjnej. Zamieszczono wyniki dotyczące rocznego zapotrzebowania budynku na nieodnawialną energię pierwotną, końcową i użytkową, rocznego zapotrzebowania na energię dostarczane dla systemu ogrzewania, a także uproszczony wynik analizy ekonomicznej.

Rozdział 8 przedstawia wyniki badań polowych służących weryfikacji opracowanych rozwiązań strukturalnych w warunkach rzeczywistych. Pomiar realizowane były w okresie od 12 do 30.04.2022 r. Do analiz wybrany został okres krótszy (72 godzin) wymagany normowo do badań oporów cieplnych w warunkach polowych. Wyborem okresu referencyjnego kierowano się ze względu na ustabilizowanie temperatury i brak anomalii po obydwóch stronach przegrody w przyjętym czasie. W wyniku przeprowadzonych pomiarów wyznaczono

wartości oporu cieplnego przegrody dla dwóch wariantów struktury przegrody różniących się występowaniem pokrycia powierzchni betonu powłoką refleksyjno – wygładzającą. Bazując na otrzymanych wartościach oporu cieplnego przegrody przeprowadzono symulację w celu wyznaczenia grubości materiałów izolacyjnych koniecznych do zastosowania w dwóch rozważanych wariantach przegrody, tak aby spełnione były obowiązujące warunki izolacyjności termicznej. Wyniki wykazały różnicę w wymaganej grubości izolacji rzędu 2,5 cm, co jest wyraźną różnicą w przypadku, gdy uwzględnia się jedynie wpływ jednej składowej całkowitego zastępczego oporu cieplnego, tj. oporu kontaktowego pomiędzy warstwami przegrody.

Rozdział 9 zawiera wnioski końcowe i przedstawia kierunki dalszych badań. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych, polowych oraz analiz numerycznych wpływu mikrostruktury powierzchni na kontaktowy opór cieplny styku warstw przegród Kandydat sformułował istotne wnioski końcowe o charakterze ilościowym i jakościowym. Podkreślił, że zaproponowane przez niego modyfikacje struktury poprawiają izolacyjność cieplną przegród budowlanych, w konsekwencji zmniejszają straty ciepłe budynków, a więc zapotrzebowanie na energię do celów grzewczych budynków. Kierunki dalszych badań zostały odpowiednio wyszczególnione.

**Istotną wartością naukową pracy jest fakt, iż łączy ona różne podstawowe metody badawcze służące do realizacji postawionego celu naukowego i aplikacyjnego. Przeprowadzenie szerokiego zakresu badań laboratoryjnych, badań polowych, symulacja numeryczna i walidacja pozyskanych wyników gwarantują wiarygodność naukową uzyskanych wyników i sformułowanych wniosków.** Należy też zaznaczyć, że do analizy otrzymanych wyników pomiarowych Kandydat wykorzystał metody statystyczne. Wszystko to stanowi o istotnej wartości poznawczej i aplikacyjnej pracy, pozwala na rozwiązania postawionego problemu i udokumentowanie prawdziwości postawionych tez oraz realizacji założonego celu badawczego.

**Rozprawa dotyczy bardzo istotnego zagadnienia zarówno badawczo – naukowego, jak i aplikacyjnego, a mianowicie możliwości zwiększenia oporności cieplnej przegród budowlanych dzięki odpowiednim rozwiązaniom strukturalno – materiałowym przegród wielowarstwowych umożliwiającym zwiększenie oporu kontaktowego na granicy warstw przegrody.** Problem zwiększenia izolacyjności cieplnej przegród obudowy budynku jest ciągle bardzo istotnym zagadnieniem związanym z ograniczeniem energochłonności budownictwa i to nie tylko w kraju. Zagadnienie możliwości zwiększania oporu kontaktowego na granicy warstw przegród budowlanych jest nadal niedoceniane, niewystarczająco opisane w literaturze i przebadane w warunkach polowych oraz laboratoryjnych. Często opór kontaktowy jest pomijany przy wyznaczaniu oporu zastępczego przegród, co w konsekwencji powoduje nie przywiązywanie zbyt dużej wagi do praktycznego sposobu łączenia warstw i stosowania odpowiednich rozwiązań strukturalno - materiałowych. Brakuje zaleceń, co do tworzenia takich rozwiązań i metodyki wyznaczania ich efektów ilościowych, chociażby w postaci poprawkowych współczynników przenikania ciepła uwzględniających na odpowiednim rzeczywistym poziomie wielkość oporu kontaktowego. Dlatego też **podjęcie przez Kandydata**



tematyki dotyczącej wpływu mikrostruktury powierzchni na kontaktowy opór cieplny styku betonów z termoizolacją uważam za bardzo celowe i świadczące o Jego dogłębnym rozeznaniu tematyki struktur i konstrukcji budowlanych oraz procesów wymiany ciepła w nich zachodzących, jak i szeroko pojętej problematyki energooszczędności budownictwa.

### 2.3. Pytania i uwagi szczegółowe

W niniejszym punkcie zostały sformułowane bardziej szczegółowe pytania i uwagi w odniesieniu do całej rozprawy, a następnie w kolejności odpowiadającej poszczególnym rozdziałom.

Jak wspomniano wcześniej *Spis treści* nie odpowiada rzeczywistej numeracji rozdziałów.

W tekście występują pewne błędy związane z nazewnictwem, w szczególności odnosi się do współczynnika przenikania ciepła. Pojęcie współczynnika przenikania ciepła z definicji odnosi się do kompleksowego łącznego uwzględnienia wszystkich procesów złożonej wymiany ciepła, które zachodzą pomiędzy ośrodkami ograniczającymi przegrodę od wewnątrz i zewnątrz (o różnych temperaturach), jak i w niej samej (również o innej temperaturze jej powierzchni i warstw, a dokładnie o zróżnicowanym polu temperatury). Współczynnik opisujący wymianę ciepła w samej przegrodzie, np. w miejscu kontaktu warstw nie jest współczynnikiem przenikania ciepła, a jedynie współczynnikiem wymiany ciepła, która może odbywać się na drodze przewodzenia, konwekcji lub promieniowania, a jego odwrotność jest rozważanym przez Kandydata kontaktowym oporem cieplnym.

W pierwszym rozdziale *Wstęp* wszystkie równania opisujące wymianę ciepła przez promieniowanie zapisane są w starej nie obowiązującej już postaci, która wynikała ze stosowanej kiedyś aparatury pomiarowej. W dalszej części Kandydat opisuje podstawy wymiany ciepła przez promieniowania (rys. 1.4) i m.in. błędnie przedstawia współczynnik odbicia jako refleksyjność.

Rozdział 6 wydaje się być niedokończony, na zakończenie sformułowanie kilku wniosków co do zastosowanej analizy statystycznej względem danych pomiarowych byłoby celowe.

W Rozdziale 8 rysunki pokazujące rozłożenia sensorów w przegrodach mogłyby być narysowane we współrzędnych trójwymiarowych wtedy byłyby bardziej czytelne.

W pracy występują drobne błędy redakcyjne, w tym interpunkcyjne.

Podstawowe bardziej szczegółowe pytania są zebrane poniżej.

#### Rozdział *Wstęp*

1. Dlaczego współczynnik przewodzenia (*Tabela 1.1.b. Zależność współczynnika przewodności cieplnej powietrza  $\lambda$  od średnicy porów  $d$  (Żenczykowski W. 1987)*) rośnie wraz ze średnicą porów?
2. Co to jest współczynnik ciepłochłonności (równanie 9) i jaka jest jego jednostka?
3. Proszę wyjaśnić wzór (11) i (12).

4. Kandydat temperaturę oznacza czasem jako „t”, a czasem jako „T”, różnie też oznacza czas „τ” lub „t”, skąd te różnice? (np. równanie (6), (11), (16), (18) – (31), itd.) Dotyczy to większości równań do końca rozdziału 1.

#### Rozdział 4

5. Kandydat rozważa występowanie turbulencji w mikro-przestrzeniach między warstwami przegrody. Co powoduje powstanie takich turbulencji?

#### Rozdział 5

6. Na str.134 Kandydat pisze „W modelu bazowym, oddającym rzeczywiste warunki pracy przegrody budowlanej, przyjęto, że nie następuje odpływ ciepła na boki modelu”, proszę wyjaśnić, co stanowi „boki modelu” i dlaczego nie ma przepływu ciepła?
7. Proszę wyjaśnić, co oznaczają temperatury  $T_1$  i  $T_2$  w równaniu (90), jakiego ośrodka one dotyczą?
8. Dlaczego w Tabeli 5.17 w odniesieniu do struktur B+P+S wartości  $U_F$  są mniejsze niż  $U_0$ , i w Tabeli 5.18 dla struktur Z+Kl+S również wartości  $U_F$  są mniejsze niż  $U_0$ ? Podobne pytania można odnieść do kolejnych tabel, proszę dokładnie opisać jak definiowane są oba współczynniki?

#### Rozdział 6

9. Jak definiuje się parametr „kod”?

#### Rozdział 9

10. We wnioskach końcowych Kandydat w punkcie 5 napisał m.in. „Zarejestrowany przyrost wartości U, chociaż korzystny energetycznie, dla modeli warstwowych ...”. Co to znaczy „korzystny energetycznie przyrost U”?
11. Na str.199 w punkcie 11 Kandydat m.in. pisze o „współczynniku b.p/b.s...”, co to za współczynnik?

### 2.4. Podsumowanie

Podsumowując należy stwierdzić, iż **recenzowana rozprawa dokumentuje głęboką i wszechstronną wiedzę oraz ogromny wkład pracy, jaką włożył pan mgr inż. Arkadiusz Urzędowski w zorganizowanie i przeprowadzenie badań laboratoryjnych oraz polowych, a także bardzo rozbudowanych symulacji numerycznych, a następnie w jasne i efektywne opracowanie i analizę wyników mających istotne walory naukowo-poznawcze.** Rozprawa dokumentuje istotne oryginalne osiągnięcie naukowe Kandydata, a zamieszczone uwagi i pytania wynikają przede wszystkim z pokazania możliwości dopracowania pewnych niezbyt jasnych sformułowań w pracy.

**Wyrażam opinię, że w świetle rozpoznanego przez Kandydata stanu wiedzy, decyzja o napisaniu niniejszej monografii i przeprowadzeniu badań była przemyślana i słuszna, główne tezy pracy zostały udowodnione, a postawiony cel rozprawy został osiągnięty.**

### 3. Wniosek Końcowy

**Rozprawa doktorska pana mgr inż. Arkadiusza Urzędowskiego wnosi widoczny wkład w rozwój nauk technicznych, w szczególności badań z zakresu budownictwa, w tym przegród budowlanych o zwiększonej oporności cieplnej.** Przeprowadzone przez Kandydata badania naukowe dotyczące modyfikacji mikrostruktury powierzchni na styku warstw przegrody budowlanej (betonu i termoizolacji) udokumentowały ograniczenie transportu ciepła pomiędzy tymi warstwami. Kandydat wykazał w pracy, jak w celu osiągnięcia realizacji postawionego celu można efektywnie wykorzystywać i łączyć różne metody badawcze, laboratoryjne, polowe i symulacji numerycznej, dzięki odpowiednio przygotowanej i realizowanej zintegrowanej metodyce badawczej. Kandydat w sposób konsekwentny i bardzo przejrzysty opisał podstawy fizyczne rozważanych zjawisk, przyjęte metody badań doświadczalnych, symulacyjnych i polowych, sprawnie przeprowadził analizę otrzymanych wyników, co pozwoliło mu odpowiednio sformułować wnioski o charakterze poznawczym i aplikacyjnym, udowodnić tezy pracy i zrealizować postawiony cel. **Zaproponowane przez Kandydata metody zwiększenia kontaktowego oporu cieplnego między betonem a termoizolacją stanowią innowacyjną metodę poprawy parametrów cieplnych budynków.**

Przeprowadzone przez Kandydata prace stanowią bardzo widoczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport. W szczególności wnoszą one wartość dodaną w odniesieniu do badań dotyczących efektywnego zmniejszania transportu ciepła przez wielowarstwową obudowę budynku. **Problematyka pracy opiera się na podstawach fizyki budowlanej, nowoczesnych metodach pomiarowych laboratoryjnych i zaawansowanych metodach modelowania matematycznego oraz symulacjach numerycznych.** Kandydat wykorzystuje wszystkie te metody badawcze w sposób przemyślany wykazując się bardzo dużą wiedzą teoretyczną, praktyczną i intuicją badawczą. Rozprawa jest przykładem współczesnego nowatorskiego podejścia do badań naukowych, które wymagają wszechstronnej wiedzy i umiejętności kompleksowego podejścia do rozważanych problemów badawczych, a dzięki temu pozwalają na wyciągnięcie istotnych wniosków zarówno naukowych, jak i aplikacyjnych. **W związku z powyższym wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza Urzędowskiego.**

**Wartość merytoryczna rozprawy i oryginalne osiągnięcia Kandydata spełniają wymagania** wymienione w **przepisach Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** z dnia 20 lipca 2018r. (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668) z późniejszymi zmianami, tj. *Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 10 marca 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, Dz. U. 2023 poz. 742, szczególnie Dział V *Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki*, Rozdział 2 *Stopień doktora*, Oddział 1 *Nadawanie stopnia doktora*, Art.187, i wobec powyższego **wnoszę do Wysokiej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Lubelskiej o przyjęcie rozprawy doktorskiej *Wpływ Mikrostruktury Powierzchni na Kontaktowy Opór Ciepły Styku Betonów z Termoizolacją* mgr inż. Arkadiusza Urzędowskiego do dalszego etapu w postępowaniu o nadanie stopnia doktora nauk technicznych.**

