



# Instytut Techniki Budowlanej

Badania naukowe | Akredytowany Zespół Laboratoriów | Jednostka notyfikowana nr 1488 |  
Członek EOTA | Certyfikowane systemy zarządzania ISO 9001, ISO 27001

dr hab. inż. Wojciech Węgrzyński  
Profesor Instytutu

Warszawa, 02.02.2024

Zakład Badań Ogniwych  
Instytut Techniki Budowlanej  
ul. Ksawerów 21, 02-656 Warszawa

## Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza Urzędowskiego

### „Wpływ mikrostruktury powierzchni na kontaktowy opór cieplny styku betonu z termoizolacją”

#### 1 Podstawa formalna wykonania recenzji

Recenzja została wykonana na zlecenie Zastępcy Przewodniczącego ds. postępowań naukowych Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Lubelskiej, dr hab. inż. Tomasza Lipeckiego, prof. Uczelni, na podstawie Umowy o dzieło nr 182/RR-2/22 z dnia 6 listopada 2023 roku, oraz w odniesieniu do zapisów Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz. U. z 2022 r., poz. 574, z późn. zm., nazywana dalej *Ustawą*).

#### 2 Przedmiot i cel recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Arkadiusza Urzędowskiego pt. „Wpływ mikrostruktury powierzchni na kontaktowy opór cieplny styku betonów z termoizolacją”. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Dorota Wójcicka-Migasiuk. Ocena rozprawy jest prowadzona w odniesieniu do wymagań Ustawy, w tym przede wszystkim:

*Art. 187. 1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.*

*2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne*

### 3 Charakterystyka pracy

Główna część rozprawy została zawarta na 225 stronach i podzielona na 10 rozdziałów, zawierających wprowadzenie oraz podsumowanie wraz z wnioskami. Zasadnicza część pracy poprzedzona jest spisem treści, oznaczeniem skrótów i symboli oraz streszczeniem, zaś zakończona spisem cytowanej literatury (145 pozycji, z czego 61 powstałych w okresie ostatnich 10 lat), powołanych norm (27 pozycji), stron internetowych (13 pozycji) oraz spisami tabel i rysunków. Do pracy dołączonych jest jedenaście załączników zawierających szczegółowe wyniki pomiarów przeprowadzonych przez Doktoranta.

Tematyka pracy dotyczy aspektów związanych z efektywnością energetyczną obiektów budowlanych, poprzez zapewnienie odpowiednich oporów cieplnych obudowie obiektu, a w przypadku niniejszej pracy poprzez wpływ na styk kontaktowy ściany budynku z warstwą termoizolacji ETICS (*External Insulation and Cladding System*). Tematyka pracy w mojej ocenie mieści się w obszarze fizyki budowlanej, oraz wpisuje się w dyscyplinę naukową *inżynieria lądowa, geodezja i transport*, w której prowadzone jest niniejsze postępowanie doktorskie.

Problem naukowy nie został wskazany wprost, lecz opisowo na stronie 47: „*Problem naukowy pracy wynika z potrzeby ograniczenia zapotrzebowania na ciepło na cele ogrzewania budynków wskutek strat ciepła przez przegrody warstwowe. Sposobem ograniczenia zużycia energii może być (...) zwiększenie oporu kontaktowego powierzchni betonu po stronie kontaktu z termoizolacją*”.

Doktorant stawia dalej cel główny pracy: „*wyznaczenie, opisanie i ocena wpływu modyfikacji mikrostruktury powierzchni betonu biorącej udział w wymianie ciepła po stronie kontaktu z termoizolacją, na składowe oporu cieplnego w budowlanej przegrodzie warstwowe*”, oraz trzy cele szczegółowe:

- Opracowanie metodyki badań pomiarowych;
- Badanie charakterystyki powierzchni;
- Opracowanie modelu numerycznego i symulacje wymiany ciepła.

Praca posiada także cel użyteczny, którym jest opracowanie metody modyfikacji mikrostruktury powierzchni w sposób poprawiający izolacyjność przegród.

W Rozdziale 1 Autor przedstawia wprowadzenie do pracy, rozpoczynając od omówienia problematyki zapotrzebowania budynków na ciepło na cele ogrzewania. W Rozdziale 2 (*uwaga: na skutek prawdopodobnie błędu edytora tekstu, numeracja rozdziałów rozpoczyna się ponownie od 1. Przyjmując to za ewidentny błąd edytorski, będę odnosił się do numeracji rozdziałów jak wg. spisu treści i kolejności ich prezentacji w tekście*) przedstawiono przegląd literatury w zakresie mechanizmów transportu ciepła w przegrodach budowlanych (przewodzenie, konwekcja, promieniowanie), kontaktowych oporów cieplnych, ciał chropowatych oraz modelowania procesów wymiany ciepła z wykorzystaniem metody CFD. Rozdział 3 zawiera tezy, cel i zakres pracy, jak również definicję (choć nie wprost) problemu naukowego.

Rozdziały 4 i 5 stanowią obszerny opis badań eksperymentalnych i numerycznych przeprowadzonych przez Doktoranta. W rozdziale 4 zgromadzono opis materiałów a w rozdziale 5 metodykę badawczą. Na podkreślenie zasługuje mnogość metod badawczych zastosowanych przez Doktoranta, w tym: analiza termiczna za pomocą trzech metod (laboratoryjna, symulacji numerycznych oraz metodą doświadczalną – poligonową) oraz analiza geometryczna za pomocą dwóch metod (skaningu i modelowania 3D). Wykonano także badania numeryczne w skali mikro i makro. W opisie metod dużo miejsca poświęcono metodzie CFD, przedstawiając także w mojej ocenie dość innowacyjne podejście do generacji modeli 3D na potrzeby analiz numerycznych w mikroskali. Zwięźle opisano metody statystyczne oraz sieci neuronowe, które wykorzystano w ocenie wyników.

Przedmiotem badań były dwa układy przegród warstwowych, jeden oddający rzeczywiste warunki istniejące w ścianach pionowych z betonowych elementów prefabrykowanych, ze szczeliną powstałą w wyniku klejenia termoizolacji do powierzchni ściany, oraz drugi ustawiony w poziomie, gdzie termoizolacja jest w bezpośrednim kontakcie z powierzchnią. Zmiennymi był sposób modyfikacji

powierzchni, tj. próba referencyjna, próbka z domieszkowaniem betonu, próbka wypełniona zaprawą klejącą oraz pokryta powłoką refleksyjno-wyglądającą. W przypadku próbek z keramzytobetonu wprowadzono także modyfikację mechaniczną poprzez szlifowanie powierzchni. Odległość pomiędzy betonem a termoizolacją zmieniano w zakresie 10 – 20 mm.

W obszernym rozdziale 6 przedstawiono wyniki badań, odnosząc się do każdej z wykorzystanych metod badawczych, z zachowaniem logicznego ciągu prowadzonych badań opisanego na rys. 4.1 w rozdziale 5. Doktorant opisuje wyniki przeprowadzonych badań w dużych szczegółach, omawiając kolejne kroki procesu badawczego. Wyniki przykładowo pomiarów mikrostruktury wykorzystuje w kolejnych badaniach numerycznych, a uzyskane wyniki badań właściwości fizycznych materiałów są podstawą wszystkich późniejszych rozważań związanych z efektywnością energetyczną. W tytule rozdziału zapowiedziano dyskusję nad wynikami, ale Doktorant przy większości opisywanych metod ogranicza się do podsumowania uzyskanych wyników, bez osadzenia ich w literaturze czy polemiki nad uzyskanymi wartościami. Formę dyskusji wprowadzono w rozdziałach 6.2.3 i 6.2.4.

Rozdział 7 zawiera opis metod wyników badań statystycznych, którymi Doktorant posłużył się w celu określenia wpływu poszczególnych zmiennych badanych na opór cieplny przegrody. Zastosowano testy ANOVA i Shapiro-Wilka oraz sztuczne sieci neuronowe.

Rozdział 8 jest krótkim podsumowaniem wpływu modyfikacji powierzchni na efektywność energetyczną budynku, wskazując na redukcję zapotrzebowania na energię przyjętego referencyjnego domu o 4,7% dla rozważanego układu Z1+PR+P/KL20+S. Analiza ekonomiczna wskazała na oszczędności roczne w wysokości 149,61 zł, przy założonej cenie jednostkowej gazu 3,60 zł/m<sup>3</sup>.

Rozdział 9 zawiera wyniki eksperymentu polowego przeprowadzonego w dniach 12.04.2022 – 30.04.2022, w którym w warunkach rzeczywistych porównano dwie wytypowane wcześniej modyfikacje powierzchni. Uzyskano redukcję wsp.  $U$  z 0,167 do 0,148 W/m<sup>2</sup>K.

W rozdziale 10 podsumowano pracę formułując 12 wniosków oraz wskazując 5 kierunków kolejnych badań. Najważniejszym wnioskiem jest potwierdzenie wpływu ukształtowania powierzchni na wartość oporu kontaktowego na styku betonu i termoizolacji, wraz z demonstracją jak zmiana właściwości powierzchni może poprawić (lub pogorszyć) właściwości cieplne przegrody.

#### **4 Ocena pracy**

W mojej ocenie Doktorant osiągnął postawione cele pracy, w szczególności w zakresie szerokiego wykorzystania metod badawczych oraz wytypowania rozwiązania techniczno-budowlanego w istotny sposób wpływającego na właściwości cieplne przegród.

Doktorant biegle posługuje się literaturą naukową tematu, w tym literaturą odnoszącą się do badań nad wymianą ciepła przez przegrody budowlane. Zaplanował i zrealizował ambitny program badań uwidaczniający właściwości badanych konfiguracji materiałów w skali mikro-, makro i rzeczywistej. Połączył badania fizyczne z symulacjami numerycznymi, wykorzystując narzędzia CFD do głębszego zrozumienia podstaw procesów fizycznych wpływających na właściwości cieplne przegród. W końcu, przeprowadził analizę statystyczną i formalną wykonanych badań. Pozwala to ocenić, że Doktorant jest osobą będącą w stanie prowadzić samodzielną pracę naukową oraz posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie. Nie mam wątpliwości, że Doktorant rozwiązał oryginalny problem naukowy, jednocześnie przedstawiając zastosowanie rozwiązania w gospodarce, spełniając wymagania Ustawy.

Chcę także podkreślić dobry warsztat badacza w zakresie prowadzonych badań eksperymentalnych i numerycznych.

Po zapoznaniu się z treścią Rozprawy mam kilka uwag o charakterze ogólnym. Poniższe uwagi nie wpływają zasadniczo na moją pozytywną ocenę przedstawionej Rozprawy.

Zapoznając się z treścią rozprawy odniosłem wrażenie, że Doktorant dość dowolnie (być może nawet zamiennie) stosuje pojęcia „oporu kontaktowego” i „oporu cieplnego”. W pracy użyto także sformułowań „kontaktowy opór cieplny” czy „kontaktowy opór cieplny styku materiałów”. Pomimo definicji właściwości przegród, oporu cieplnego i kontaktowego oporu cieplnego, wielokrotnie odnosiłem wrażenie że Doktorant używa jednego terminu mając na myśli drugi z nich (lub być ja błędnie traktuje je jako różne pojęcia, podczas gdy są one tożsame). Źródłem niejasności może być rozdzielność terminów używanych do całej przegrody budowlanej, bądź do samego kontaktu materiałów. Uważam, że Doktorant powinien w sposób bardziej precyzyjny zdefiniować te pojęcia, również odnosząc ich do układu mikro- lub makro- skali, co znacząco ułatwiło by analizę rozprawy.

Moją drugą uwagą ogólną jest osadzenie pracy w problematyce „zrównoważonego rozwoju”. W moim osobistym odczuciu jest to hasło rzadko będące rzeczywistym celem badań, a często jedynie słowo kluczowe wpisujące się w bieżące trendy nauki. Doktorant w rozdziale 9 rzeczywiście udowadnia praktyczne skutki zastosowania postulowanej metody, co jest dowodem że rzeczywiście chodziło tu o poprawę efektywności energetycznej budynków. Jednocześnie, zrównoważony rozwój wymaga holistycznego spojrzenia na problem techniczno-budowlany. W pracy zabrakło mi jakiegokolwiek dyskusji na temat wpływu modyfikacji powierzchni na właściwości wykonywanych systemów ETICS w zakresie zmiany przyczepności kleju, trwałości, oddziaływania wilgoci, właściwości akustycznych czy pożarowych przegrody. Doktorant przedstawił wyłącznie rozważania w zakresie wymiany ciepła. Czy znany jest jakikolwiek negatywny wpływ rozwiązań na inne, równie ważne właściwości systemu ETICS bądź zużycie materiału? W mojej ocenie zrównoważony rozwój wymaga takiego spojrzenia.

Mam też uwagę o charakterze edycyjnym i wizualnym. Praca dużo traci przez warstwę graficzną obróbki danych zgromadzonych przez Doktoranta. O ile obrazy ze skanów 3D, zdjęcia czy modele numeryczne są przedstawione czytelnie, dane liczbowe pokazano w trudnych do analizy tabelach czy podstawowych wykresach MS Excell. Wielokrotnie przedstawiając obok siebie kilka wykresów skala na osi Y jest różna, co uniemożliwia ich bezpośrednie porównanie. Wyniki zawarte w rozdziale 9 są niemal niemożliwe do interpretacji. Sam opis punktów pomiarowych jako surowe kanały analizatora („CH20X”) jest barierą wymagającą od czytelnika niezwykle wytężonej uwagi aby dojść która wartość jest którą, a nakładające się na siebie linie oraz skala X prezentująca kolejny numer pomiaru, niemal uniemożliwiają interpretację. W przypadku prezentacji wyników badań CFD pozwolono oprogramowaniu ANSYS każdorazowo na dowolny wybór skali, przez co znów porównanie dwóch rysunków wymaga dość głębokiej analizy. Nie zmniejszono także liczby wektorów, przez co chmura wektorów nakłada się na siebie. W mojej ocenie umiejętność przetworzenia wyników badań do prostych grafik ilustrujących esencję rozważanego problemu stanowi o głębokim zrozumieniu badanego zagadnienia. Ilustracje w niniejszej pracy pozwoliły mi na jej przysposobienie, ale wymagało to dużo pracy. W mojej ocenie przy większym wkładzie pracy w analizę danych przez Doktoranta, praca była by „łatwiejsza” w przysposobieniu, a być może i Autor mógłby spojrzeć na wyniki z większą głębią.

Błąd edycyjny związany z numeracją rozdziałów nie wpłynął na mój odbiór pracy, w odniesieniu do tego błędu mogę jedynie skierować wyrazy sympatii w kierunku Doktoranta, bo jest to złośliwość rzeczy martwych która dosięgnie kiedyś każdego naukowca.

Mam także kilka uwag szczegółowych, o komentarz do których chciałbym poprosić Doktoranta:

- Proszę o podanie zwięzłej definicji oporu cieplnego i kontaktowego oporu cieplnego w rozumieniu Doktoranta;
- Wartości wzrostu oporu przedstawione w pkt. 1 wniosków końcowych, w streszczeniu oraz w pkt. 6 wniosków są różne. Prośba o komentarz i potwierdzenie, czy wnioski w pkt. 1 należy traktować jako ostateczne, podsumowujące pracę;
- Wykonano zaawansowane skany 3D, ale później w ocenie chropowatości powierzchni Doktorant wytycza płaszczyzny 2D w których dokonuje oceny. Czy przesunięcie tej płaszczyzny nie poda nam zupełnie innego wyniku dot. chropowatości? Jak duża jest

wrażliwość metody na lokalizację płaszczyzn, i czy w tym kierunku wykonano analizę tej wrażliwości? Czy istnieją metody pozwalające w pełni wykorzystać skanning 3D (poza CFD gdzie to zostało dokonane)?

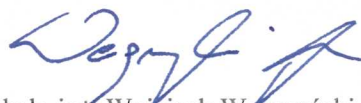
- Promieniowanie cieplne zmienia się w czwartej potęgze temperatury. W pracy odnoszono się do zakresu temperatur 10-30°C, czy na podstawie dostępnych danych da się przewidzieć co działo by się w innym zakresie temperatur użytkowych?
- Na stronie 19 użyto niezrozumiałego dla mnie sformułowania „deficyt gęstości powietrza”.
- W opisanym w rozdziale 2.1. współczynnika  $\lambda$  prawdopodobnie ujęte są zarówno konwekcja jak i promieniowanie w pustkach powietrznych, gdyż metody nie pozwalają na rozdzielne wyznaczenie tych dróg wymiany ciepła. Czy zastosowana modyfikacja może wpłynąć na wartość  $\lambda$  w ścianach warstwowych?
- Konwekcyjna wymiana ciepła w wąskich szczelinach jest trudna do opisu, z uwagi na bardzo trudne wyznaczanie wartości współczynnika przejmowania ciepła. Jak wyznaczano współczynnik w badaniach numerycznych?
- W kontekście rozważań rozdziału 6.3.2.3 (str. 159) promieniowanie cieplne pomiędzy powierzchniami równoległymi nie zależy od odległości pomiędzy nimi, jeżeli medium jest transparentne. Oznacza to, że wymiana na drodze promieniowania nie będzie znacząco zmieniać się przy zwiększaniu szczeliny, podczas gdy konwekcja tak. Czy mogę prosić o dodatkowy komentarz w zakresie udziału dróg wymiany ciepła w oporze cieplnym w szczelinach o różnej grubości?
- Czy jest możliwy do oszacowania koszt pomalowania całego domu dwukrotną powłoką refleksyjną? Czy oszczędności na ogrzewaniu można przeliczyć np. na ekwiwalent emisji CO<sub>2</sub> tak aby oderwać to od wyłącznie ekonomicznej kalkulacji?
- O ile większość aparatury opisano czytelnie i dogłębnie, nie wiem czym są „sondy temperatury” użyte w eksperymencie polowym. Ze zdjęć odnoszę wrażenie że to termopary typu K, ale nie mam pewności. Proszę o pełniejszy opis wykorzystanych narzędzi w eksperymencie polowym.

Pomimo zgłoszonych uwag, przedstawioną pracę oceniam jako bardzo dobrą.

## 5 Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Arkadiusza Urzędowskiego pt. „*Wpływ mikrostruktury powierzchni na kontaktowy opór cieplny styku betonu z termoizolacją*” jest obszernym i spójnym dziełem. Autor zrealizował postawione cele, do czego użył imponująca liczbę metod badawczych (spójnych i wykorzystanych w logicznej kolejności).

W kontekście art. 187 Ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska **prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną** kandydata w dyscyplinie oraz **umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**. Przedmiot pracy można zakwalifikować jako problem naukowy właściwy dla dyscypliny **inżynierii lądowej, geodezja i transport**. Autor **zapropozował jego oryginalne rozwiązanie**. W związku z powyższym, uważam że przedstawiona rozprawa spełnia wymagania Ustawy, **oceniam ją pozytywnie i wnoszę o dopuszczenie Doktoranta do jej publicznej obrony**.



Dr hab. inż. Wojciech Węgrzyński  
Profesor Instytutu Techniki Budowlanej