

Wrocław, 23.10.2018r.

Prof. dr hab. inż. Henryk Nowak  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
Politechnika Wrocławska  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

mgr inż. Beaty Łobody

**pt.: ”Uściślony sposób oceny przewodności cieplnej materiałów termoizolacyjnych”**

### **1. Podstawa formalna opracowania recenzji**

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi uchwała Rady Naukowej Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie nr 6/3/2018 z dnia 28 czerwca 2018 roku oraz zlecenie Sekretarza Rady Naukowej ITB, Pani dr hab. inż. Jadwigi Fangrat, prof. ITB, z dnia 30 sierpnia 2018 roku na wykonanie recenzji.

### **2. Przedmiot i zawartość rozprawy**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Beaty Łobody pt.: ” *Uściślony sposób oceny przewodności cieplnej materiałów termoizolacyjnych*”. Praca ma charakter teoretyczno-badawczy i składa się z 9 rozdziałów głównych i z 10-ego rozdziału ze spisem literatury, obejmującego 69 pozycji piśmiennictwa (w tym 1 pozycja autorska Doktorantki) oraz z 4 dodatkowych pozycji (normy i dokumenty związane). Do pracy dołączono 2 załączniki. Tekst rozprawy liczy łącznie 127 stron, w tym 71 rysunków, 28 tabel w tekście zasadniczym i 2 tabele w załącznikach oraz 48 wzorów w tekście zasadniczym i 44 wzory w załącznikach. W ramach realizacji głównych celów pracy wykonano obszerne badania laboratoryjne oraz modelowanie neuronowe.

W krótkim wprowadzeniu przedstawiono podstawowe informacje z zakresu cieplnego izolowania przegród budowlanych, stanowiących termiczną obudowę budynków, podział stosowanych izolacji cieplnych oraz wskazano na znaczenie wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła wybranych materiałów termoizolacyjnych.

W rozdziale 1 Doktorantka omówiła podstawy teoretyczne transportu ciepła w materiałach termoizolacyjnych, podstawy teoretyczne transportu wilgoci, równania bilansowe oraz modele efektywnej przewodności cieplnej materiałów porowatych.

W rozdziale 2 przedstawiono wpływ różnych czynników na wartość współczynnika przewodzenia ciepła izolacji – wpływ ciężaru objętościowego, kształtu porów, temperatury i zawilgocenia materiałów. Dokonano również przeglądu literatury w tym zakresie.

Rozdział 3 zawiera przegląd metod badawczych przewodności cieplnej, a w tym metody pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła izolacji w stanie ustalonym (metoda pomiaru za pomocą aparatu płytowego, aparatu rurowego i metoda ścianki pomocniczej) oraz w stanie nieustalonym (metoda sondowa i stanu uporządkowanego).

W rozdziale 4 przedstawiono główny cel naukowy i zakres rozprawy.

Rozdział 5 zawiera informacje o badaniach wstępnych wybranych materiałów termoizolacyjnych i o analizie tych wyników. Przedstawiono porównanie wyników pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła próbek cylindrycznych i płaskich, pomiar współczynnika przewodzenia ciepła próbek cylindrycznych o różnej średnicy wewnętrznej oraz wpływ różnych czynników na wynik pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła. Podano również wnioski wynikające z badań wstępnych.

W rozdziale 6 omówiono przeprowadzone badania zasadnicze – pomiar współczynnika przewodzenia ciepła wybranych materiałów termoizolacyjnych w różnych średnich temperaturach oraz analizę wyników pomiarów dla materiałów termoizolacyjnych o różnej gęstości. Przebadano: styropian biały i grafitowy, styropian hydrofobowy, polistyren ekstrudowany XPS, wełnę mineralną, aerożel, i piankę poliuretanową PUR.

Rozdział 7 zawiera opis proponowanego modelu matematycznego do obliczania przewodności cieplnej materiałów termoizolacyjnych, a w tym ogólną charakterystykę sztucznych sieci neuronowych, ich zastosowanie, charakterystykę problemu badawczego, a także opis zaproponowanych 4 modeli sieci neuronowych do obliczania współczynników przewodzenia ciepła wybranych materiałów termoizolacyjnych oraz opis testowania modeli.

W rozdziale 8 przedstawiono opis aplikacji Lambda NN (Neural Network), która oblicza współczynnik przewodzenia ciepła materiału izolacyjnego i która powstała na bazie zaproponowanej sieci neuronowej SN\_1. Podano również zakres stosowalności aplikacji odnośnie rodzaju materiału, zakresu jego gęstości oraz zakresu temperatury.

Rozdział 9 zawiera podsumowanie oraz wnioski końcowe z przeprowadzonych badań.

Końcowy rozdział zawiera wykaz piśmiennictwa. Do pracy dołączone są również dwa załączniki oraz wykaz ważniejszych oznaczeń.

Stwierdzam, że przyjęty przez Doktorantkę układ pracy jest poprawny i nie budzi zastrzeżeń. Stwierdzam również, że tytuł rozprawy jest sformułowany poprawnie i w pełni odzwierciedla merytoryczną zawartość rozprawy.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy**

#### **3.1. Ocena doboru tematu i postawionych celów rozprawy**

Oszczędność energii cieplnej i efektywność energetyczna budynków o różnym przeznaczeniu w wielu krajach, w tym również w Polsce, jest w dalszym ciągu istotnym problemem ekonomicznym, ekologicznym i środowiskowym. W ostatnich latach coraz większego znaczenia nabiera obniżenie energochłonności i zwiększenie efektywności energetycznej budynków zarówno istniejących jak i nowoprojektowanych oraz ich realizacja w standardzie energooszczędnym, niskoenergetycznym czy pasywnym, a w niedalekiej przyszłości również w standardzie prawie zero-energetycznym. Zaostrzające się przepisy odnośnie projektowania termicznej obudowy budynków (kolejna zmiana wymagań nastąpi w roku 2021) powodują konieczność, między innymi, stosowania coraz to bardziej

efektywnych izolacji cieplnych oraz precyzyjnego określania ich właściwości termoizolacyjnych.

Jedną z podstawowych cech materiałów termoizolacyjnych w zakresie analizy i obliczeń cieplnych jest współczynnik przewodzenia ciepła ( $\lambda$  [W/(m K)]), który również decyduje o przydatności tych materiałów do wykonywania przegród ograniczających ogrzewaną kubaturę budynków o różnym przeznaczeniu. Wartość tego współczynnika określa się doświadczalnie metodami znormalizowanymi. W literaturze tematu można spotkać analityczne modele efektywnej przewodności cieplnej materiałów termoizolacyjnych, do zastosowania których niezbędna jest znajomość współczynnika przewodzenia ciepła gazu wypełniającego pory, współczynnika przewodzenia ciepła szkieletu i wody oraz udziału poszczególnych faz w materiale.

Z punktu widzenia zastosowań praktycznych zdecydowanie bardziej uniwersalną mogłaby być metoda wyznaczania współczynnika przewodności cieplnej materiałów termoizolacyjnych oparta na bazie dużych zbiorów danych pomiarowych, dla różnych materiałów i różnych temperatur stosowania bez konieczności przeprowadzania badań.

I to właśnie taki zakres badań i analizy został podjęty w opiniowanej rozprawie.

Recenzowana rozprawa doktorska bardzo dobrze wpisuje się w ten aktualny problem badawczy, ważny przede wszystkim z punktu widzenia zastosowań praktycznych w zakresie cieplnych obliczeń przegród budowlanych i budynków oraz uzupełnia wiedzę w zakresie określenia wpływu różnych czynników na przewodność cieplną materiałów termoizolacyjnych.

Uwzględniając powyższe, za pozytywną cechę rozprawy należy uznać postawienie przez Doktorantkę ambitnego głównego celu badawczego do rozwiązania na drodze badań laboratoryjnych i obliczeń z wykorzystaniem sieci neuronowych. Założony główny cel pracy jest osadzony w problematyce naukowej i równocześnie w realiach praktyki budowlanej. Ponadto, bardzo dobrze wpisuje się w problematykę badań materiałowych, a także w problematykę oszczędności energii w budynkach i budownictwa energooszczędnego. Klarowność postawionego głównego celu badawczego i metodyczne dążenie do jego zrealizowania świadczą o dobrym rozpoznaniu przez Autorkę tematyki badawczej i o odpowiednim przygotowaniu do prowadzenia badań i analiz teoretycznych.

Podsumowując tę część recenzji stwierdzam, że podjęty przez Doktorantkę temat rozprawy jest aktualny, a zdefiniowany główny cel i zakres pracy jest jasny, zasadny i ważny tak z naukowego jak i z praktycznego punktu widzenia.

### **3.2. Cel i zakres pracy**

Na podstawie przeglądu literatury z zakresu podstaw transportu ciepła i wilgoci w materiałach porowatych, z zakresu wpływu różnych czynników na wartość współczynnika przewodzenia ciepła materiałów termoizolacyjnych (w tym wpływu ciężaru objętościowego, kształtu porów, temperatury i zawilgocenia) oraz z zakresu metod badawczych przewodności cieplnej (w stanie ustalonym i nieustalonym) sformułowano główny naukowy cel rozprawy. Celem tym było opracowanie modelu matematycznego do wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła materiałów termoizolacyjnych z zastosowaniem sieci neuronowych.

Założono, że model neuronowy pozwoli na obliczanie współczynnika przewodzenia ciepła materiałów o różnej gęstości i dla różnych temperatur stosowania bez konieczności przeprowadzania badań.

Zakres pracy obejmował analizę literatury tematu z zakresu przepływu ciepła przez izolacje termiczne, z zakresu stosowania sztucznych sieci neuronowych w zastosowaniach technicznych, analizę wpływu różnych czynników na wyniki pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła (wpływ geometrii próbki, gęstości pozornej, temperatury, warunków klimatyzowania próbek, wpływ zawilgocenia próbek oraz wpływ obecności szczeliny powietrznej między rurą badawczą a próbką), opracowanie modeli sieci neuronowych do obliczania współczynnika przewodzenia ciepła materiałów termoizolacyjnych oraz wykonanie aplikacji do obliczania współczynnika przewodzenia ciepła na bazie modelu neuronowego.

Główny cel pracy sformułowano poprawnie, a przyjęty zakres badań doświadczalnych, opracowanie statystyczne wyników tych badań, zaprojektowanie czterech sieci neuronowych oraz uzyskane wnioski końcowe potwierdziły słuszność jego sformułowania. Przyjęty cel pracy ma znaczenie poznawcze i praktyczne, a jego sformułowanie świadczy o oryginalności podjętego tematu. Na podstawie przeprowadzonych analiz i badań sformułowano wnioski zamieszczone w rozdziale 9, które stanowią odpowiedzi na przyjęty główny cel oraz zakres rozprawy. Wnioski te mogą również stanowić ważny przyczynek w sensie poznawczym w problematyce naukowej podjętej w rozprawie.

### **3.3. Ocena naukowej wartości rozprawy**

Za najważniejsze oryginalne osiągnięcia naukowe Autorki uznają:

- 1) Krytyczne przeanalizowanie dostępnych pozycji literatury naukowo-badawczej krajowej i zagranicznej, Z przeprowadzonego studium literaturowego wyniknęła potrzeba sformułowania własnego problemu badawczego oraz głównego celu i zakresu rozprawy.
- 2) Opracowanie i przeprowadzenie oryginalnego programu pomiarów laboratoryjnych współczynnika przewodzenia ciepła dla siedmiu materiałów termoizolacyjnych. Były to: styropian biały i grafitowy, styropian hydrofobowy, polistyren ekstrudowany XPS, wełna mineralna, aerożel, i pianka poliuretanowa PUR.
- 3) Opracowanie i przeprowadzenie oryginalnego programu pomiarów i analizy wpływu geometrii próbki, gęstości pozornej, temperatury, warunków klimatyzowania próbek, zawilgocenia próbek oraz wpływu obecności szczeliny powietrznej między rurą badawczą a próbką na wyniki pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła materiałów termoizolacyjnych wymienionych w punkcie 2.
- 4) Zaprojektowanie czterech sieci neuronowych (oznaczonych symbolami SN\_1, SN\_2, SN\_3 i SN\_4) w programie Matlab do obliczania współczynnika przewodzenia ciepła w określonym zakresie gęstości i średnich temperatur oraz aplikacji, opartej na tych modelach, która umożliwia obliczanie współczynnika przewodzenia ciepła siedmiu materiałów termoizolacyjnych.

## 4. Uwagi krytyczne

### 4.1. Uwagi merytoryczne

Poniżej wskazano na dyskusyjne lub ujemne strony rozprawy. Uwagi natury ogólnej o charakterze dyskusyjnym są następujące:

1. Jak było kryterium/kryteria zatrzymania uczenia się sieci neuronowych?
2. Szkoda, że Doktorantka nie dołączyła do pracy doktorskiej albo wręcz całego zestawu pogrupowanych danych pomiarowych, stanowiących dane wejściowe przy modelowaniu sieci neuronowej do przewidywania współczynnika przewodzenia ciepła materiałów termoizolacyjnych, albo przynajmniej przykładowych danych wejściowych dla poszczególnych analizowanych materiałów termoizolacyjnych.
3. Praktycznie w całej rozprawie Doktorantka przesadziła, moim zdaniem, z podawaniem wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiałów z dokładnością do 5 miejsc po przecinku. W wielu miejscach wartości te podawane są do 4 miejsc po przecinku, a w wielu do 3 miejsc po przecinku. Moim zdaniem, wartości współczynników przewodzenia ciepła w tabelach i na wykresach powinny być podawane z dokładnością do 3 miejsc po przecinku, nawet gdy w obliczeniach pośrednich są przyjmowane z dokładnością do 5 miejsc po przecinku.
4. Jak podawanie wartości współczynnika przewodzenia ciepła z dokładnością do 5 miejsc po przecinku ma się do dokładności pomiarowej zastosowanej aparatury badawczej?
5. Według recenzenta liczba 69 pozycji literaturowych polskich i zagranicznych (plus 4 rozporządzenia i normy) jest stosunkowo uboga, ale wystarczająca.
6. Z 69 pozycji literaturowych nie zacytowano 5 pozycji. Dlaczego więc zamieszczono je w spisie literatury?
7. W rozdziale 'Bibliografia' Doktorantka powołuje się tylko na jedną swoją publikację. Czyżby dorobek Doktorantki w przedmiotowym zakresie merytorycznym był aż tak ubogi? Dlaczego w międzyczasie nie publikowała artykułów związanych z jej pracą doktorską?
8. Domyślam się, że badania były wykonane za pomocą urządzeń posiadających aktualne świadectwo wzorcowania, co istotnie wpływało na wiarygodność uzyskanych wyników. Jednak nie sprecyzowano z jaką dokładnością mierzono poszczególne parametry. Jakie były błędy pomiarów?
9. W pracy nie ma porównania wyników badań z wynikami otrzymanymi przez innych autorów - o ile takie porównanie było możliwe do wykonania.
10. Doktorantka w dosyć nietypowy sposób przedstawiła wnioski końcowe wynikające z przeprowadzonych badań, a mianowicie przedstawiła opisowo wnioski ogólne jedynie jakościowe a nie ilościowe. Moim zdaniem należało podać wnioski, o ile to możliwe, ilościowe w punktach, co spowodowałoby ujednoczenie i uprządkowanie tekstu. Uważam, że przy tak szerokim zakresie badań laboratoryjnych i dysponowaniu bardzo dużą bazą przekrojowych wyników pomiarów praca zyskałaby, gdyby w podsumowaniu

sformułowano klasyczne wnioski ilościowe, z ewentualnym podziałem na przykład na wnioski ogólne i szczegółowe.

11. W rozprawie przeanalizowano szereg problemów badawczych, ale nie wyczerpano wszystkich zagadnień związanych z tematem rozprawy - w pracy nie wskazano kierunków przyszłych badań. Przykładowo – jaki jest wpływ starzenia się materiałów czy też wpływ pracy materiałów termoizolacyjnych w podwyższonych lub niższych temperaturach w stosunku do tych analizowanych w rozprawie?

#### **4.2. Uwagi dotyczące redakcji rozprawy**

Rozprawa jest napisana poprawnie z prawidłowym układem tekstu, na bardzo dobrym poziomie merytorycznym i edytorskim. W tekście rozprawy recenzent doszukał się nielicznych potknięć i nieścisłości. Ważniejsze uwagi dotyczące redakcji rozprawy są następujące:

1. W rozdziale ‘Wykaz ważniejszych oznaczeń użytych w pracy’ podano jednostki jedynie przy wybranych pozycjach. Dlaczego nie podano jednostek przy opisie wszystkich oznaczeń?
2. Przy prezentacji niektórych wzorów brakuje powołań literaturowych, niektóre powołania podawane są w tekście – utrudnia to czytanie rozprawy oraz stwierdzenie czy dany wzór jest autorstwa Doktorantki, czy też nie (nieliczne przypadki).
3. Wzory, numery rysunków i tabel powinny być numerowane w ramach danego rozdziału, z uwagi na jednorodność i przejrzystość tekstu, np. (2.1), (2.2), (2.3) , ..., w rozdziale 2, (3.1), (3.2), (3.3), ... w rozdziale 3, itd.
4. Występują nieliczne błędy literowe (tzw. literówki).
5. Str. 28, są dwa wzory oznaczone jako (2.2),
6. Str. 27, Tabela 1, dlaczego współczynnik przewodności ma jednostkę, w której jest kcal?
7. Str. 41, Tabela 2 , str. 43, tabela 3 oraz pozostałe strony z tabelami 4, 5 i 6 – w jakich jednostkach jest podany współczynnik przewodzenia ciepła?
8. Str. 101, jest Rys. 73, powinno być: Rys 70,
9. Str. 104, jest Rys. 74, powinno być Rys. 71

Proszę, aby Autorka nie ustosunkowywała się do powyższych uwag w trakcie obrony, lecz ewentualnie uwzględniła je w przyszłych publikacjach.

## 5. Wnioski końcowe

W recenzowanej pracy doktorskiej mgr inż. Beata Łoboda rozwiązała oryginalne zadanie naukowe, dotyczące opracowania modelu matematycznego do wyznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła materiałów termoizolacyjnych na bazie sieci neuronowych. Stwierdzam, że główny cel rozprawy doktorskiej został osiągnięty.

Doktorantka wykazała się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem, umiejętnościami planowania i prowadzenia badań laboratoryjnych oraz rozwiązywania problemów teoretycznych. Przeprowadziła w szerokim zakresie badania doświadczalne oraz analizy obliczeniowe z wykorzystaniem sieci neuronowych, a do rozwiązania postawionego problemu zastosowała poprawne metody badawcze. Uzyskała oryginalne wyniki oraz wykazała, że potrafi analizować i krytycznie oceniać uzyskane rezultaty oraz formułować poprawne wnioski poznawcze. Świadczy to o Jej odpowiednim przygotowaniu i predyspozycjach do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Uwagi krytyczne wymienione w punkcie 4 nie obniżają dobrego, moim zdaniem, poziomu merytorycznego i ogólnej wysokiej oceny dysertacji. Uwagi mają charakter porządkowy lub dyskusyjny i mam nadzieję, że przynajmniej w części będą pomocne Autorce podczas przygotowywania artykułów do czasopism naukowych.

Oceniam, że rozprawa stanowi rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego oraz potwierdza, że Doktorantka ma ogólną wiedzę teoretyczną i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawa jest opracowana na dobrym poziomie naukowym i redakcyjnym oraz wnosi w przedmiotowym zagadnieniu wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie 'budownictwo'. Ma również znaczenie praktyczne.

**Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Beaty Łobody na temat *"Uściślony sposób oceny przewodności cieplnej materiałów termoizolacyjnych"* spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14.03.2003 roku *"O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki"* (tekst jednolity Dz.U. z 2017 roku, poz. 1789) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30.10.2015 roku (Dz.U. z 2015 roku, poz. 1842). W związku z tym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**



Henryk Nowak