




SCP/4472/2024  
ID: 17900300026317

Rada Doskonałości Naukowej  
00-901 Warszawa, pl. Defilad 1  
Dział Kancelaryjny  
WPLYNĘŁO (RPW)

0 1. 07. 2024

22.400.54.2024

Podpis:  Zai.

Instytut Geodezji i Budownictwa,  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
10-719 Olsztyn, ul. Prawocheńskiego 15

za pośrednictwem:  
**Rady Doskonałości Naukowej**  
pl. Defilad 1  
00-901 Warszawa  
(Pałac Kultury i Nauki, p. XXIV, pok. 2401)

Piotr Kosiński  
(imię i nazwisko wnioskodawcy)

Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, Instytut  
Geodezji i Budownictwa, Uniwersytet Warmińsko-  
Mazurski w Olsztynie  
(miejsce pracy/jednostka naukowa)



RPW/6100/2024  
Data:2024-07-01

## Wniosek

z dnia 24.06.2024

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego  
w dziedzinie nauk inżynieryjno – technicznych w dyscyplinie<sup>1</sup>  
inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Określenie osiągnięcia naukowego będącego podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego stanowią dwa cykle recenzowanych publikacji powiązanych tematycznie.

Osiągnięcie pierwsze: *określenie strat cieplnych wynikających z filtracji powietrza w lekkich przegrodach szkieletowych wypełnionych luźnym materiałem termoizolacyjnym*

Osiągnięcie drugie: *rozpoznanie właściwości cieplno-wilgotnościowych materiałów pochodzenia naturalnego jako termoizolacji w postaci luźnej.*

Wnoszę – na podstawie art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 zm.) – aby komisja habilitacyjna podejmowała uchwałę w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w głosowaniu **tajnym/jawnym**\*<sup>2</sup>

Zostałem poinformowany, że:

*Administratorem w odniesieniu do danych osobowych pozyskanych w ramach postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego jest Przewodniczący Rady Doskonałości Naukowej z siedzibą w Warszawie (pl. Defilad 1, XXIV piętro, 00-901 Warszawa).*

*Kontakt za pośrednictwem e-mail: [kancelaria@rdn.gov.pl](mailto:kancelaria@rdn.gov.pl), tel. 22 656 60 98 lub w siedzibie organu.*

*Dane osobowe będą przetwarzane w oparciu o przesłankę wskazaną w art. 6 ust. 1 lit. c)*

*Rozporządzenia UE 2016/679 z dnia z dnia 27 kwietnia 2016 r. w związku z art. 220 - 221 oraz art. 232 – 240 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w celu*

<sup>1</sup> Klasyfikacja dziedzin i dyscyplin wg. rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin w zakresie sztuki (Dz. U. z 2018 r. poz. 1818).

<sup>2</sup> \* Niepotrzebne skreślić.

*przeprowadzenie postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz realizacji praw i obowiązków oraz środków odwoławczych przewidzianych w tym postępowaniu.*

*Szczegółowa informacja na temat przetwarzania danych osobowych w postępowaniu dostępna jest na stronie [www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html](http://www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html)*

*P. J. Kosinowski*

(podpis wnioskodawcy)

Załączniki:

1. Dane wnioskodawcy.
2. Kopia dokumentu potwierdzającego stopień doktora inżyniera.
3. Autoreferat.
4. Wykaz osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój dyscypliny.
5. Oświadczenia współautorów o udziale w powstaniu publikacji naukowych wchodzących w skład cyklu I.
6. Oświadczenia współautorów o udziale w powstaniu publikacji naukowych wchodzących w skład cyklu II.
7. Kopia publikacji naukowych B1-B7 wchodzących w skład cyklu I.
8. Kopia publikacji naukowych C1-C9 wchodzących w skład cyklu II.
9. Oświadczenia współautorów o udziale w powstaniu wybranych publikacji nie wchodzących do cykli.
10. Wykaz wykonanych ekspertyz lub innych opracowań wykonanych na zamówienie instytucji publicznych lub przedsiębiorców przed uzyskaniem stopnia doktora.
11. Wykaz wykonanych ekspertyz lub innych opracowań wykonanych na zamówienie instytucji publicznych lub przedsiębiorców po uzyskaniu stopnia doktora.
12. Kopia niniejszego wniosku oraz załączniki zapisane na informatycznym nośniku danych w 2 egzemplarzach.

# Autoreferat

## 1 Imię i nazwisko

Piotr Kosiński

## 2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- 2015 **stopień doktora w dziedzinie nauk technicznych**, dyscyplinie budownictwo, specjalności fizyka budowli nadany 15.04.2015 roku przez Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej za rozprawę doktorską pt. „*Wpływ infiltracji powietrza na przenikanie ciepła przez lekkie przegrody izolowane wełną mineralną luzem*”. Promotor rozprawy dr hab. inż. Robert Wójcik, prof. UWM.
- 2010 **tytuł magistra inżyniera budownictwa** nadany przez Wydział Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko – Mazurskiego w Olsztynie (nagroda Budimex dla najlepszej pracy dyplomowej).
- 2008 **tytuł magistra informatyki** nadany przez Wydział Matematyki i Informatyki Uniwersytetu Warmińsko – Mazurskiego w Olsztynie
- 2008 **tytuł inżyniera budownictwa** nadany przez Wydział Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko – Mazurskiego w Olsztynie
- 2006 **tytuł licencjata informatyki** nadany przez Wydział Matematyki i Informatyki Uniwersytetu Warmińsko – Mazurskiego w Olsztynie.

## 3 Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

Od 1.03.2009 pracownik naukowo-dydaktyczny Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, najpierw jako asystent, a od 2017 roku adiunkt:

- w latach 2009-2014 Wydział Nauk Technicznych Zakład Rewitalizacji i Fizyki Budowli, przemianowany następnie w Katedrę Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli,
- w latach 2015-2019 Wydział Geodezji, Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa, Instytut Budownictwa,
- od 2020 Wydział Geoinżynierii, Instytut Geodezji i Budownictwa, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli.

**4 Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.**

**4.1 Wprowadzenie**

Zmniejszenie energochłonności sektora budowlanego jest aktualnym tematem badawczym w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. Mimo, że na przestrzeni ostatnich lat wielokrotnie zmieniane były wymagania stawiane nowym budynkom, uruchamiano programy dotujące podnoszenie efektywności energetycznej istniejących obiektów, wciąż wiele jest do zrobienia w tym zakresie. W dobie kryzysu klimatycznego oraz powtarzających się kryzysów paliwowo-energetycznych rozwiązania techniczne przynoszące oszczędność energii są kluczowe dla wielu sektorów gospodarki. Realizowane przeze mnie badania, które dotyczą strat ciepłych wywołanych filtracją powietrza (pierwsze osiągnięcie), a także wykorzystania materiałów organicznych jako izolacji ciepłych (drugie osiągnięcie) wpisują się w aktualne trendy zrównoważonego rozwoju, ochrony środowiska naturalnego oraz dekarbonizacji budownictwa. W dalszej perspektywie mogą również przyczynić się do rozwoju ekonomiczno-gospodarczego Polski.

Celem naukowym podjętych przeze mnie badań było wyjaśnienie wpływu filtracji powietrza na przenikanie ciepła przez lekkie przegrody izolowane materiałami włóknistymi. Wpływ ten był wstępnie rozpoznany na etapie przygotowania mojej pracy doktorskiej, w której badanym materiałem włóknistym była luźna wełna mineralna. Realizacja pracy doktorskiej przyniosła odpowiedź na wiele pytań, ale też zainspirowała do rozwiązywania kolejnych problemów.

Filtracja powietrza bierze udział w procesie wymiany powietrza w budynku. W większości przypadków, przy przepływie niekontrolowanym, jest jednak zjawiskiem niepożądanym z punktu widzenia ochrony ciepłno-wilgotnościowej, a także biologicznej przegród. Powietrze przepływając przez przegrody budowlane przejmuje od nich ciepło, przyczyniając się często do kondensacji pary wodnej.

Rosnące wymagania stawiane nowym budynkom oraz potrzeba termomodernizacji istniejących stają się wyzwaniem w zakresie doboru materiałów termoizolacyjnych oraz ich ochrony przed wpływami klimatycznymi. W budynkach oddzielonych od środowiska zewnętrznego przegrodami o wysokim oporze cieplnym, filtracja powietrza odgrywa ważną rolę w bilansie cieplnym. Niekontrolowany napływ powietrza wiąże się z koniecznością podgrzania go. Również filtracja skrośna lub jednostronna powoduje wychłodzenie przegrody i wzmożone przenikanie ciepła. Minęły czasy uznawania grubości termoizolacji jako głównego kryterium dotyczącego ochrony cieplnej budynków. Świadomość inwestorów w tym zakresie wzrasta, czego doświadczam wykonując zlecenia i usługi doradcze na etapie przygotowywania inwestycji. Jednocześnie zauważam potrzebę przeprowadzenia prac doświadczalnych i naukowych

związanych z opracowaniem metodyki skutecznego zabezpieczenia izolacji cieplnych od filtracji powietrza, a także napraw obiektów istniejących w zakresie ograniczenia strat ciepła przez filtrację.

Moja rozprawa doktorska miała charakter nowatorski, ponieważ brakowało rozpoznania strat cieplnych wywołanych filtracją powietrza w ścianach izolowanych materiałami włóknistymi w stanie luźnym. Na potrzeby realizacji doktoratu zbudowano pod nadzorem mojego promotora, dr hab. inż. Roberta Wójcika, prof. UWM, i moim, unikalne w skali Polski stanowisko – nieizotermiczną komorę klimatyczną z możliwością generowania oddziaływania wiatru. Mając takie możliwości rozpocząłem cykl badań dotyczących wpływu filtracji na przenikanie ciepła przez lekkie przegrody izolowane luźnymi materiałami włóknistymi.

Obserwując działalność wiodących ośrodków akademickich zajmujących się materiałami izolacyjnymi zauważyłem niszę w postaci braku rozpoznania właściwości cieplno-wilgotnościowych materiałów izolacyjnych w postaci luźnej. Często albo pomijano takie materiały albo traktowano wyłącznie w postaci uzupełnienia dla izolacji formowanych fabrycznie. Co istotne, właściwości luźnych materiałów przyjmowano przez analogię do materiałów formowanych na etapie produkcji, co na podstawie własnych badań uważam za działania błędne. Ponadto zauważyłem, że brakuje rozpoznania właściwości higrotermicznych materiałów pochodzenia organicznego, które moim zdaniem mają potencjał do stosowania ich jako termoizolacji budynków. Wypracowane podczas realizacji pracy doktorskiej, metody badawcze dla luźnej wełny mineralnej, zacząłem modyfikować i wdrażać badając włókniste materiały pochodzenia organicznego w postaci luźnej. Drugim celem naukowym było rozpoznanie właściwości higrotermicznych materiałów organicznych i ocena ich przydatności jako materiałów termoizolacyjnych w budownictwie.

Zaletą materiałów pochodzenia organicznego jest ich niewielki wpływ na środowisko, a w większości przypadków nawet ujemny ślad węglowy. Mogą stanowić alternatywę dla konwencjonalnych wysoko przetworzonych materiałów termoizolacyjnych. Produkcja popularnych materiałów termoizolacyjnych pochłania duże ilości energii. Ponadto, ich odpady są trwałe, a recykling obecnie nieekonomiczny. Dlatego też materiały te są powszechnie spalane lub składowane na wysypiskach po zakończeniu ich cyklu życia. Alternatywnie, materiały pochodzenia naturalnego w łatwy sposób wpisują się w gospodarkę obiegu zamkniętego. Nisko przetworzone surowce mogą zostać poddane taniej utylizacji albo wręcz biodegradacji pozostawiając niewielki ślad dla środowiska.

Poza niewielkim wpływem na środowisko naturalne, materiały pochodzenia naturalnego mają też wiele zalet wynikających z ich struktury. Transport wilgoci i powietrza w materiałach zbudowanych z naturalnych włókien odbywa się inaczej niż w przypadku polistyrenów, wełny mineralnej lub wyrobów poliuretanowych. Transport powietrza jest w nich bardziej uzależniony od gęstości niż np. w przypadku wełny mineralnej. Wilgoć jest w nich magazynowana zarówno wewnątrz kapilar jak i na ich powierzchni. Materiały naturalne charakteryzują się zdolnością do pochłaniania wilgoci i magazynowania jej, a następnie oddawania do otoczenia.

Trendy tzw. budownictwa ekologicznego obecne są od dziesięcioleci. Niemniej, w większości przypadków opierają się o przypuszczenia lub analogie. Realizacja badań, których opis stanowi moje drugie osiągnięcie może przynieść rozwój tej tendencji. Na rynku widoczne jest zapotrzebowanie na tego typu badania. Ceny energii drożeją, drożeją również materiały budowlane, a inwestorzy szukają oszczędności. Zainteresowanie stosowaniem materiałów pochodzenia naturalnego w budownictwie wyraźnie wzrasta w ostatnich latach. Coraz powszechniejsze są analizy (np. typu Life Cycle Assessment) wykazujące, że popularne izolacje termiczne mają duży wpływ na środowisko naturalne. Tymczasem sektor budowlany oczekuje transformacji w celu zwiększenia efektywności energetycznej i jednocześnie zmniejszenia emisji. Niestety, jest to często błędnie postrzegane jako otwarcie nieograniczonego rynku na drogie technologie, energochłonne w wytwarzaniu (systemy grzewcze, izolacje). Systemy zużywające więcej energii do ich wytworzenia niż mogą jej zaoszczędzić w trakcie eksploatacji nie powinny być uznawane za efektywne. Z tego powodu coraz więcej świadomych inwestorów szuka rozwiązań alternatywnych.

Przesuwanie środka ciężkości w kierunku rozwiązań przyjaznych środowisku jest domeną globalnego rynku budowlanego, w tym również polskiego. Ochrona środowiska i obwarowania klimatyczne skłaniają ku materiałom nisko przetworzonym. Polska jako kraj o dużej tradycji rolniczej i wielkiemu doświadczeniu w uprawach roślin ma szansę stać się potentatem w produkcji izolacji pochodzenia naturalnego.

Część badań, które przeprowadziłem dotychczas prezentowałem podczas realizacji Grantu Wyszehradzkiego pt. *'Adoption of V4 buildings to nZEB standard using natural and bio-based materials'* realizowanego wspólnie z kolegami ze Slovak University of Technology in Bratislava, Brno University of Technology, oraz Budapest University of Technology and Economics. Pełniłem funkcję kierownika tego projektu. W latach 2021-2022 przeprowadziliśmy z kolegami cykl spotkań dla środowiska naukowego, zawodowego, studentów oraz przedstawicieli organizacji pozarządowych w trakcie których prezentowaliśmy możliwość wykorzystania surowców pochodzenia naturalnego do izolowania budynków. Prezentacje odbyły się w Olsztynie, Budapeszcie, Bratysławie oraz Brnie. Zostały przyjęte z dużym zainteresowaniem. W moim przypadku zaowocowały również uczestnictwem w kolejnych projektach oraz pracach zleconych – rozpoznawaniu właściwości higrotermicznych surowców pochodzenia roślinnego pod kątem wykorzystania ich w budownictwie.

## **4.2 Osiągnięcie pierwsze**

### **4.2.1 Tytuł osiągnięcia**

**Określenie strat cieplnych wynikających z filtracji powietrza w lekkich przegrodach szkieletowych wypełnionych luźnym materiałem termoizolacyjnym.**

### **4.2.2 Monotematyczny cykl publikacji składający się na osiągnięcie w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport**

Poza oznaczonymi B1-B7 recenzowanymi publikacjami lista zawiera również moją rozprawę doktorską [D], która była pierwszym opracowaniem dotyczącym rozwiązania problemu

określenia strat cieplnych wynikających z filtracji powietrza w lekkich przegrodach szkieletowych wypełnionych luźnymi materiałami termoizolacyjnymi.

- [D] Kosiński P. 2015. *Wpływ infiltracji powietrza na przenikanie ciepła przez lekkie przegrody izolowane wełną mineralną luzem*. Praca doktorska obroniona w Politechnice Białostockiej, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska.
- [B1] Wójcik R., Kosiński P. 2015. *Seeming air tightness of construction partitions*. Energy Procedia 78. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Building Physics Conference 14<sup>th</sup>-17<sup>th</sup> June, Torino, Italy. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.181>
- [B2] Krstić H., Otković I., Kosiński P., Wójcik R. 2016. *Validation of neural network model for predicting airtightness of residential and non-residential units in Poland*. Energy and Buildings 133, 423-432. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.011>
- [B3] Kosiński P., Brzyski P., Skoratko A., Motacki W. 2018. *Thermal properties of raw hemp fiber as a loose-fill insulation material*. Journal of Natural Fibers 15(5), 717-730. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1361371>
- [B4] Kosiński P., Wójcik R., Semen B. 2019. *Experimental study on the deterioration of thermal insulation performance due to wind washing of the cavity insulation in leaky walls*. Science and Technology for the Built Environment 25, 1164-1177. <https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1634420>
- [B5] Kosiński P., Brzyski P., Suchorab Z., Łagód G. 2020. *Heat losses caused by the temporary influence of wind in timber frame walls insulated with fibrous materials*. Materials 13(23), 1-14. <https://doi.org/10.3390/ma13235514>
- [B6] Kosiński P., Wójcik R., Skoratko D., Attia S. 2021. *An impact of moisture content on the air permeability of the fibrous insulation materials*. Journal of Physics: Conference Series 2069. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Building Physics Conference (IBPC 2021) 25-27 August 2021, Copenhagen, Denmark <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012205>
- [B7] Kosiński P., Brzyski P., Tunkiewicz M., Suchorab Z., Wiśniewski D., Palczyński P. 2022. *Thermal Properties of Hemp Shives Used as Insulation Material in Construction Industry*. Energies 15(7). <https://doi.org/10.3390/en15072461>

#### 4.2.3 Najważniejsze elementy osiągnięcia

1. Rozpoznanie problemu filtracji nieskrośnej w budynkach [D, B1, B2].
2. Adaptacja i modyfikacja stanowiska do pomiarów filtracji powietrza przez nieściśliwe porowate złoża do pomiarów przepuszczalności powietrznej luźnych materiałów włókniстых [D].
3. Określenie zakresu zmienności współczynnika filtracji  $\kappa$  dla luźnej wełny mineralnej [D], włókien konopnych [B3], wełny drzewnej [B5], celulozy [B6] i paździerzy konopnych [B7] w zależności od gęstości nasypowej materiału.

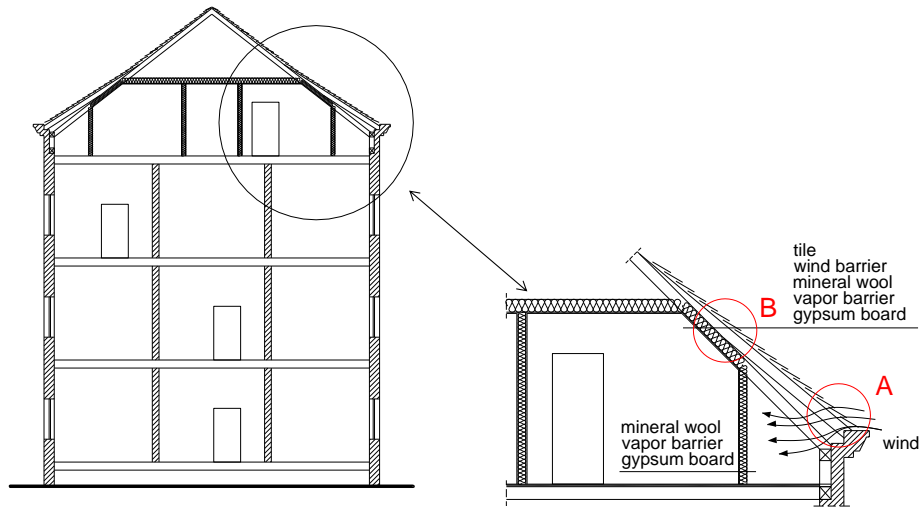
4. Wyznaczenie współczynników konwersji z uwagi na filtrację powietrza w izolacji cieplnej wykonanej z luźnej wełny mineralnej [D].
5. Wyznaczenie maksymalnych wartości ciśnienia które powodowały zgniatanie próbek [D, B3, B7] oraz niepublikowane.
6. Rozpoznanie wpływu zawilgocenia na przepuszczalność powietrzną wełny mineralnej, wełny drzewnej i celulozy [B6].
7. Budowa modelu obliczeniowego do wyznaczania wpływu infiltracji oraz nieskrośnej filtracji powietrza na straty ciepłe w przegrodach szkieletowych wypełnionych luźnymi materiałami izolacyjnymi, walidacja modelu z rezultatami badań laboratoryjnych na modelach testowanych w nieizotermicznej komorze klimatycznej [D, B1, B3, B5, B7].
8. Obliczenie wpływu infiltracji na przenikanie ciepła przez przegrody wypełnione luźną wełną mineralną [D, B1, B5], wełną drzewną [B5] i paździerzami konopnymi [B7].
9. Wyznaczenie maksymalnych strat ciepłych wywołanych oddziaływaniem wiatru w przegrodach wypełnionych luźną wełną mineralną [D] oraz wyznaczenie czasu powrotu do równowagi termodynamicznej po zakończonym oddziaływaniu wiatru, w zależności od sposobu zabezpieczenia od filtracji powietrza [B4].

#### **4.2.4 Motywacja i uzasadnienie podjęcia badań**

Od 15 lat mam możliwość łączenia badań szczelności powietrznej budynków z pracą naukową w zakresie strat ciepłych wywołanych filtracją powietrza i efektywnego wykorzystania izolacji cieplnych. Dotychczas badania wykonywałem w obiektach mieszkalnych, usługowych, produkcyjnych oraz użyteczności publicznej. Badaniom podlegały budynki o różnorodnej konstrukcji oraz wieku. Większość pomiarów prowadzono w obiektach, w których ze względu na wadliwą ochronę termiczną, eksploatacja była bardzo uciążliwa. Faktyczne zużycie ciepła w tych budynkach było dużo większe od obliczeniowego. W wielu badanych przypadkach stwierdzano, że kryterium szczelności powietrznej przegród oraz połączeń między nimi oraz innymi elementami budowlanymi nie było spełnione. Występowały również i takie przypadki, w których przegroda pozornie spełniała wymóg szczelności powietrznej, jednak rzeczywisty przepływ ciepła przez nią był zdecydowanie większy niż wynikało to z obliczeń normowych.

Dokładna analiza wyników badań szczelności powietrznej pozwoliła stwierdzić, że w budynkach obok przepływów skrośnych powietrza przez przegrody, występują także przepływy jednostronne, nieskrośne wywoływane strugą powietrza przedostającą się do zewnętrznych partii materiałów porowatych. Zjawisko to szczególnie dotyczy termoizolacji włóknistych narażonych na przewiewanie. Okazywało się, że przegroda może spełniać wymóg szczelności podczas ciśnieniowego pomiaru szczelności powietrznej, jeżeli jednak nie jest zabezpieczona przed działaniem wiatru, występuje w niej wada, którą określono jako szczelność pozorną. Tak było np. w przypadku budynku użyteczności publicznej, który pokazano na rysunku 1 [B1].





Rys. 1. Przykład budynku w którym stwierdziłem szczelność pozorną, z zaznaczeniem miejsc newralgicznych [B1]

Odkrytki wykonane w budynkach ujawniały skalę problemów związanych z brakiem ochrony wbudowanej izolacji cieplnej wykonanej z wełny mineralnej przed filtracją powietrza. Co istotne, obecność paroizolacji po stronie wewnętrznej utrudniała identyfikację problemu, ponieważ blokowała skrośną filtrację przez przegrody poddasza.

Problem szczelności pozornej dotyka przede wszystkim lekkich konstrukcji szkieletowych izolowanych włóknistymi materiałami termoizolacyjnymi. Dało to asumpt do powstania mojej pracy doktorskiej, w której skupiłem się na stratach cieplnych wywoływanych nieskrośną filtracją powietrza w warstwie izolacji termicznej wykonanej z luźnej wełny mineralnej. W roku 2015 gdy broniłem pracę doktorską najpopularniejszymi materiałami izolacyjnymi stosowanymi w tego typu konstrukcjach były wełna mineralna i granulaty celulozowy. Od tego czasu inne materiały zaczęły odgrywać istotną rolę na rynku termoizolacji budownictwa szkieletowego, należą do nich np. wełna drzewna, albo inne materiały pochodzenia roślinnego, np. włókna i paździerze lniane i konopne. Materiałom tym poświęciłem opis drugiego osiągnięcia.

Im dłużej zajmuję się badaniem zjawisk ciepłno-wilgotnościowych zachodzących w budynkach tym bardziej przekonuję się do słuszności sentencji, którą przekazał mi Prof. Mark Bomberg „*przepływ powietrza jest kluczem do zrozumienia procesów cieplnych w elementach budowlanych*”. Szczelność powietrzna budynków, a raczej straty ciepłe wywołane jej brakiem przez wiele lat były marginalizowane w środowisku budowlanym. Nawet współcześnie pokułuje pogląd o „oddychających budynkach”, tłumacząc tym brak staranności wykonawczej lub zaniedbania nadzoru budowlanego. Problem powietrznych strat ciepła w budynkach dotyczy też obiektów istniejących i w dużej mierze moje badania są ukierunkowane właśnie na nie. Pozytywny odbiór badań, które wykonałem na potrzeby realizacji pracy doktorskiej zmotywował mnie do kontynuowania tematu i rozwijania warsztatu naukowego. Po obronie pracy doktorskiej rozbudowałem stanowisko badawcze, przeprowadziłem także analizy jakościowe i ilościowe strat cieplnych wywołanych filtracją powietrza w przegrodach wypełnianych różnymi materiałami w stanie luźnym.

Od czasu obrony mojej pracy doktorskiej dwa razy zmieniały się wymagania cieplne w zakresie współczynników przenikania ciepła przegród oraz wskaźnika EP, a problem szczelności powietrznej nie zyskał na znaczeniu. Wskazuje to na konieczność kontynuacji prac badawczych w obszarze filtracji powietrza. Jest to jeden z czynników motywujących mnie do prowadzenia pracy naukowej poświęconej stratom cieplnym wywołanym przez filtrację powietrza.

#### 4.2.5 Omówienie wyników i wskazanie możliwości wykorzystania ich w praktyce

Celem podjętej pracy doktorskiej było określenie ilościowej zależności przenikania ciepła przez przegrodę od infiltracji powietrza na przykładzie lekkiej ściany izolowanej wełną mineralną w stanie luźnym [D]. Przystępując do realizacji pracy postawiłem następujące tezy:

- w warstwach izolacyjnych przegród zewnętrznych formowanych z wełny mineralnej luzem, poddanych oddziaływaniu wiatru, decydującą rolę odgrywa przekazywanie ciepła na drodze konwekcji scharakteryzowanej liczbą podobieństwa Rayleigha,
- przenikanie ciepła przez przegrody budowlane izolowane wełną mineralną zależy głównie od ochrony przed oddziaływaniem wiatru; przy oddziaływaniu wiatru, w przypadku braku izolacji przeciwwietrznej, zanikają właściwości termoizolacyjne wełny.

W celu weryfikacji postawionych tez pracy doktorskiej wykonałem badania eksperymentalne wpływu infiltracji powietrza na przenikanie ciepła przez lekkie przegrody wypełnione luźną wełną mineralną. Badania ująłem w cztery odrębne zadania:

1. Określenie zakresu zmienności współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  luźnej wełny mineralnej przy zerowym przepływie powietrza w zależności od gęstości nasypowej.
2. Określenie zakresu zmienności współczynnika filtracji  $\kappa$  luźnej wełny mineralnej w zależności od gęstości nasypowej.
3. Określenie oporu cieplnego  $R$  modelowej ściany szkieletowej wypełnionej luźną wełną mineralną w warunkach bezwietrznych.
4. Określenie zakresu zmienności oporu cieplnego  $R$  modelowej ściany szkieletowej wypełnionej luźną wełną mineralną w zależności od ekspozycji na działanie wiatru i jego prędkości.

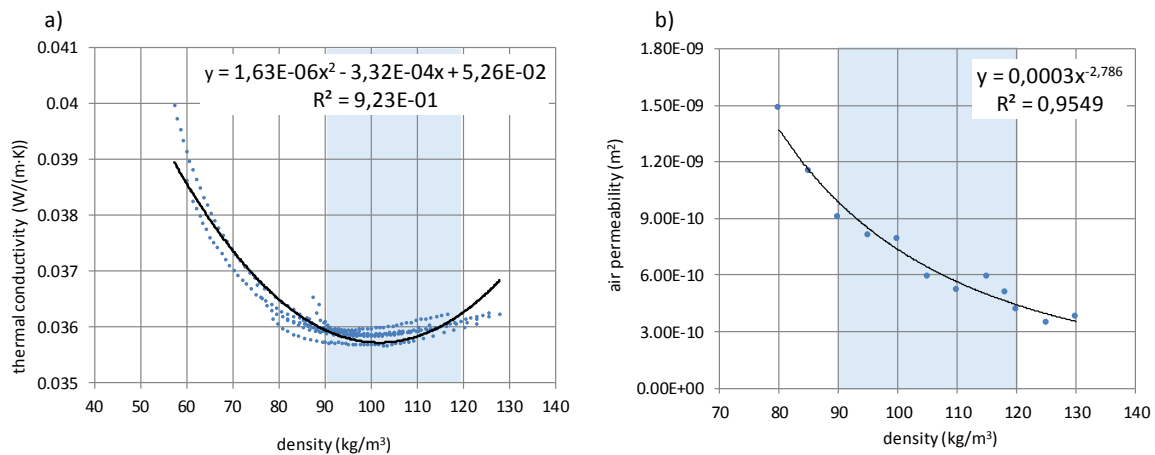
Ponadto przeprowadziłem analizę obliczeniową strat cieplnych wywołanych jednostronną filtracją powietrza w ścianie izolowanej luźną wełną mineralną na podstawie modelu obliczeniowego zdefiniowanego w programie Delphin 5.8. Efektem końcowym pracy było określenie współczynników konwersji przewodności właściwej wełny mineralnej w funkcji infiltracji powietrza. Część rezultatów oraz opis stanowisk badawczych znajduje się m.in. w publikacji [B1].

W celu zbadania zakresu zmienności współczynnika przewodzenia ciepła luźnej wełny mineralnej w zależności od gęstości nasypowej opracowałem autorską metodę zagęszczania

próbek. Wykorzystałem do tego precyzyjny mechanizm pozycjonowania płyty w aparacie Heat Flow Meter, Fox 602, w którym wykonano badania.

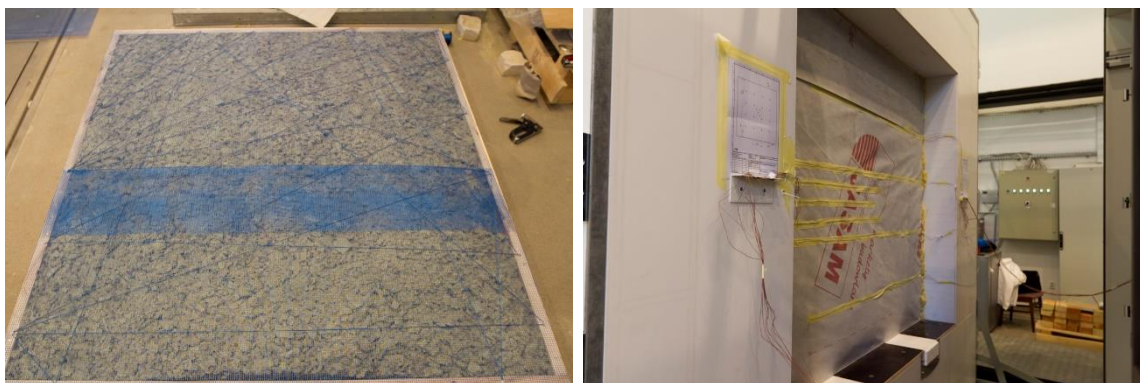
W celu zbadania zakresu zmienności współczynnika filtracji luźnej wełny mineralnej w zależności od gęstości nasypowej wykonałem autorskie stanowisko badawcze. Inspirację do budowy stanowiska czerpałem z prac Skotnicznego [1] oraz Sobieskiego i Trykozko [2] którzy badali filtracje płynów przez ośrodki nieściśliwe.

Na rysunku 2 zaprezentowane są wyniki badań zakresu zmienności współczynnika przewodzenia ciepła oraz przepuszczalności powietrznej w zależności od gęstości nasypowej materiału. Metody badawcze które opracowałem na potrzeby badań luźnej wełny mineralnej wykorzystuję nadal testując inne materiały w stanie luźnym. Przedstawione na rysunku 2 rezultaty traktuję jako referencyjne, często sięgam do nich porównując właściwości materiałów włóknistych w stanie luźnym.



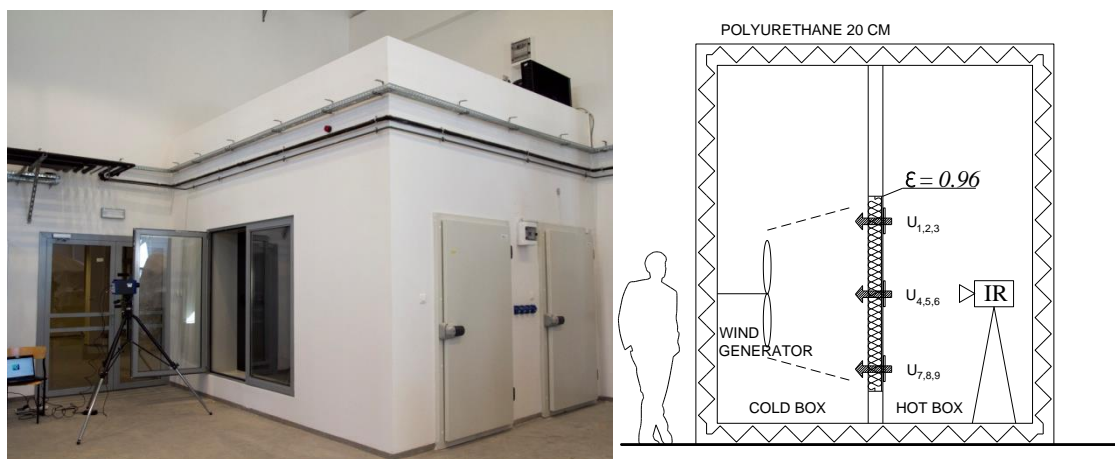
Rys. 2. Wyniki badań przewodności cieplnej (a) i przepuszczalności powietrznej (b) luźnej wełny mineralnej w zależności od gęstości nasypowej, na niebiesko zaznaczono zakres gęstości, który był wykorzystany do budowy modeli badanych w komorach klimatycznych [D]

Na potrzeby badań oporu cieplnego modelowej ściany szkieletowej wypełnionej luźną wełną mineralną w warunkach bezwietrznych wykonałem modele ścian szkieletowych wypełnione luźną wełną mineralną o wymiarach 150,0x150,0 cm. Następnie modele badano w komorze klimatycznej typu Hot Box. Rezultatem badań był opór cieplny zmierzony w warunkach bezwietrznych. Budowaną ścianę modelową oraz umieszczony model w komorze Hot Box z naklejonymi czujnikami temperatury pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Model ściany szkieletowej wypełnionej luźną wełną mineralną w trakcie budowy (po lewej), po prawej model pokryty membraną wiatroizolacyjną z naklejonymi czujnikami temperatury po stronie chłodnej komory Hot Box [materiały własne]

Badania wpływu infiltracji powietrza na przenikalność cieplną przegrody wykonano w nieizotermicznej komorze klimatycznej zaprojektowanej i wykonanej w tym celu. W komorze badałem modele ścian szkieletowych, analogicznie do badanych w komorze typu Hot Box. Komorę wykonaną z płyt warstwowych z rdzeniem PIR przedzielono na część ciepłą odwzorowującą warunki wewnętrzne i zimną odwzorowującą warunki zewnętrzne. Przegrody zewnętrzne komory starannie uszczelniono zapewniając ich szczelność na przenikanie powietrza. W trakcie budowy komory wielokrotnie wykonałem ciśnieniowe próby szczelności powietrznej w celu uzyskania jak najwyższej jakości robót. Miejsca przepuszczające powietrze uszczelniono masą poliuretanową oraz taśmami. W zimnej części komory zainstalowano zespół wentylatorów odwzorowujących wiatr, ostatecznie po próbach dymowych i analizach CFD pozostawiono jeden wentylator wyposażony w system regulacji obrotów oraz przesłony kierunków. Precyzyjne sterowanie prędkością obrotową wentylatora było możliwe za pomocą sprzężonego z potencjometrem ciśnieniomierza różnicowego. Widok komory oraz jej przekrój pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Po lewej widok nieizotermicznej komory klimatycznej, po prawej przekrój ideowy [D, B1]

W komorze zbadano modele ścian różniących się gęstością luźnej wełny mineralnej oraz sposobem osłonięcia od oddziaływania wiatru. Celem badania było określenie wpływu infiltracji na przenikanie ciepła przez przegrody w różnym stopniu zabezpieczone od wiatru.

Przypadki dobrano w taki sposób, aby każdy następny powstawał z poprzedniego poprzez stopniowe zmniejszanie ryzyka przewiewania warstwy termoizolacji. Metodyka badań polegała na rejestracji zmian gęstości strumienia ciepła oraz temperatury na skutek oddziaływania wiatru, który był generowany przez wentylator. Zmiany gęstości strumienia ciepła przeliczano na zmiany oporu cieplnego. Równoległe z pomiarami gęstości strumienia ciepła na powierzchni przegrody, rejestrowano promieniowanie podczerwone emitowane przez badaną przegrodę. Do pomiarów wykorzystano naukową kamerę termowizyjną FLIR SC7200.

Metody stacjonarnego pomiaru właściwości cieplnych przegrody nie obejmują całego problematycznego obszaru, a jedynie wybrane obszary. Diagnostyka w zakresie detekcji promieniowania podczerwonego okazała się jedyną skuteczną metodą identyfikacji obszarów wychłodzonych na skutek filtracji powietrza. Zmiany temperatury zarejestrowane czułą i szybką kamerą termowizyjną pozwalały ocenić skalę wychłodzenia przewiewanej przegrody.

Przepływ powietrza skośny i nieskośny przez przegrody przepuszczalne dla powietrza zachodzący równocześnie z przepływami ciepła wpływa na pole temperatury oraz proces przemian ciepła na powierzchni przegrody. Równoczesny przepływ ciepła wywołany gradientem temperatury i przepływ powietrza wymuszony gradientem ciśnienia występującego po obu stronach przegrody prowadzą do termofiltracji. Bilans energii wewnętrznej ośrodka, w którym występuje termo filtracja można zapisać w postaci różniczkowej (1):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) dV = \nabla \cdot \left( \lambda \nabla T + \kappa \frac{c_p \Delta T}{\nu} (\nabla p + \rho_g g) \right) + \rho r, \quad (1)$$

gdzie:

$\rho U$  – gęstość energii wewnętrznej ( $J/m^3$ ),

$\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła ( $W/(m \cdot K)$ ),

$\kappa$  – współczynnik przepuszczalności powietrznej materiału ( $m^2$ ),

$c_p$  – ciepło właściwe suchego powietrza ( $J/(kg \cdot K)$ ),

$\Delta T$  – różnica temperatury między ośrodkami między którymi następuje przepływ (K),

$\nu$  – współczynnik lepkości kinematycznej płynu ( $m^2/s$ ),

$\nabla p$  – gradient ciśnienia (Pa/m),

$\rho_g$  – gęstość suchego powietrza ( $kg/m^3$ ),

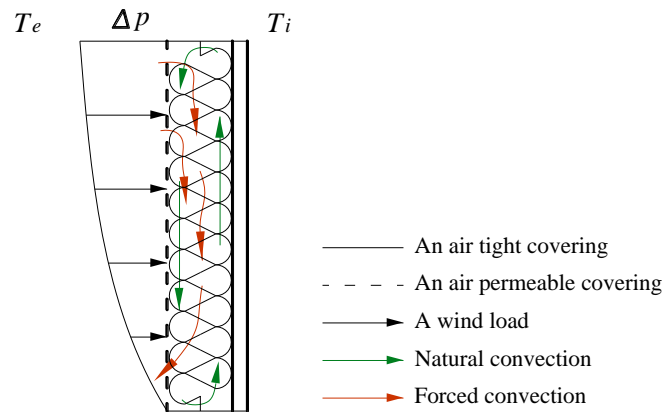
$g$  – przyspieszenie ziemskie ( $m/s^2$ ),

$\rho r$  – gęstość źródła energii ( $W/m^3$ ).

### Model symulacyjny i analiza porównawcza z wynikami badań laboratoryjnych

Symulacje cieplne przeprowadzono w warunkach stanu ustalonego, bez oddziaływania wiatru oraz dla przegród poddanych jednostronnej filtracji powietrza w warstwie termoizolacji

(rysunek 5). Symulacje wykonano przy użyciu metody objętości kontrolnych w programie Delphin 5.8. Układ temperatury i różnicę ciśnienia przyjęto zgodnie z warunkami brzegowymi doświadczenia w komorze klimatycznej. Dane do symulacji przyjęto na podstawie pomiarów laboratoryjnych. Symulacje polegały na osiągnięciu przez model stanu równowagi termodynamicznej, a następnie obciążenie go nieskrośną filtracją powietrza po stronie chłodniejszej.



Rys. 5. Model symulacyjny [B1]

Rezultaty uzyskane dla analizowanego modelu odbiegały od wyników eksperymentalnych. Uzyskana redukcja oporu cieplnego była mniejsza niż w badaniach laboratoryjnych. Wynikało to z braku uwzględnienia w modelu miejscowej nieciągłości w przyleganiu do siebie włókien termoizolacji. Programy do symulacji ciepłno-wilgotnościowych zwyczajowo operują na współczynnikach transportowych o stałym rozkładzie w obrębie analizowanego materiału. Dopiero po modyfikacji modelu, polegającej na celowo wprowadzonych wgłębnych szczelinach odwzorowujących miejscowy brak przylegania do siebie włókien luźnych materiałów włóknistych, rezultaty były podobne do laboratoryjnych

#### Konwersja przewodności właściwej wełny mineralnej w funkcji infiltracji powietrza

Analizę zmienności właściwości ciepłochronnych luźnej wełny mineralnej przeprowadzono dla obszarów pomiarowych różniących się między sobą indywidualnymi cechami geometryczno-materiałowymi. Umożliwiło to wskazanie tych cech przegrody, które są istotne przy opisie wpływu infiltracji na przenikanie ciepła przez badane przegrody. W tym celu utworzono macierz kowariancji, która zawierała cztery analizowane przypadki przegrody lekkiej wypełnionej luźną wełną mineralną. Analiza wykazała wpływ kilku czynników na zmiany właściwości termoizolacyjnych przegrody poddanej działaniu wiatru. Do czynników tych należą m.in.: rodzaj konstrukcji przegrody, w tym ukształtowanie warstwy termoizolacji wraz z osłonięciem jej od wiatru, naturalna komprymacja wbudowanej wełny mineralnej w przegrodzie, miejscowe odchyłki od przyjętej gęstości termoizolacji, obecność szczelin powietrznych. Opracowana konwersja przewodności właściwej wełny mineralnej w funkcji infiltracji powietrza zależna jest od współczynników liczbowych odpowiadających zidentyfikowanym czynnikom.

## Zastosowanie liczby podobieństwa Rayleigha przy ocenie wpływu konwekcji na przekazywanie ciepła w materiałach włóknistych

Międzynarodowy standard ISO 10456 *Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno – wilgotnościowe. Tabelaaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych* [3] zaleca uwzględnianie efektu konwekcji, jeżeli wartość liczby Rayleigha przekracza w kierunku poziomym 2,5, w kierunku pionowym do góry 15 i kierunku pionowym do dołu 30. Poza tymi przypadkami, wg standardu, konwekcja nie musi być uwzględniana w obliczeniach przepływu ciepła przez izolację. ISO 10456 zawiera również zapis: „*Nie ma dostępnych procedur uwzględniających konwekcję wymuszoną w materiale*”.

Mogłoby się wydawać, że konwekcja bierze udział w wymianie ciepła w porowatych izolacjach o wysokiej przepuszczalności powietrznej, ułożonych w grubych warstwach i dodatkowo przy wysokiej różnicy temperatury. W rzeczywistości udział konwekcji wymuszonej w procesie przekazywania ciepła, w termoizolacji włóknistej zależy przede wszystkim od przepuszczalności powietrznej materiału oraz od ekspozycji materiału na działanie strumienia powietrza.

Jak wykazała część eksperymentalna i obliczeniowa mojej pracy doktorskiej, wpływ konwekcji na przekazywanie ciepła był duży, chociaż wartość krytyczna liczby Rayleigha podana w ISO 10456 nie była osiągnięta.

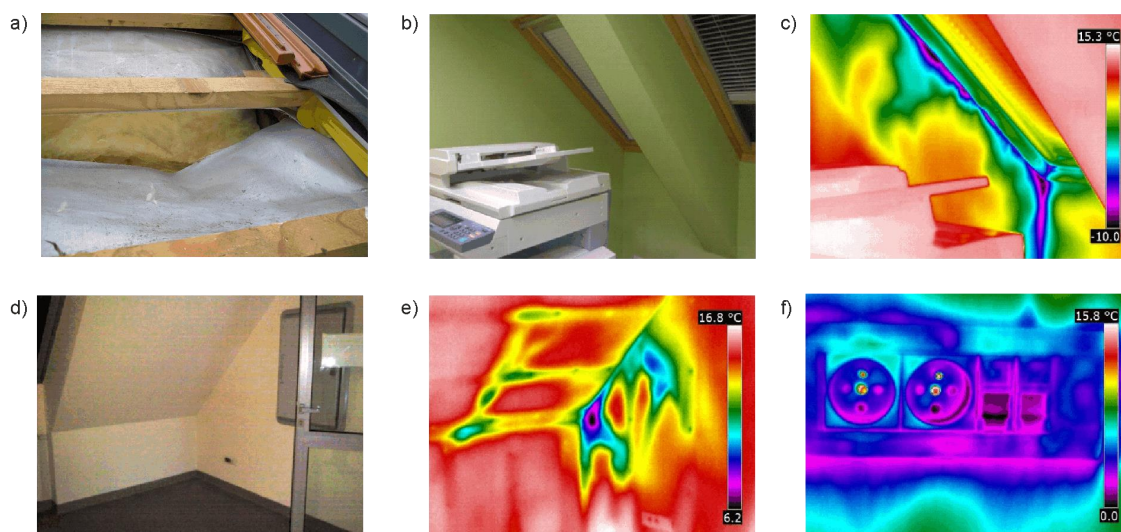
### Realizacja badań prowadzonych na etapie pracy doktorskiej pozwoliła postawić następujące wnioski ukierunkowane na dalsze badania:

1. Przy oddziaływaniu wiatru, w przypadku braku izolacji przeciwwietrznej, zanikają właściwości termoizolacyjne wełny mineralnej.
2. Redukcja oporu cieplnego badanych przegród wzrastała wraz z prędkością wiatru, a malała wraz ze spadkiem przepuszczalności powietrznej warstwy izolacji (zagęszczanie). Jednak jedynym skutecznym zabezpieczeniem od filtracji było stosowanie izolacji przeciwwiatrowych ułożonych w sposób ciągły.
3. Przyjmowanie kryterium stosowania liczby Rayleigha jako wyznacznika udziału konwekcji w procesie przekazywania ciepła w przegrodzie izolowanej materiałem włóknistym po stronie zewnętrznej przegrody jest zasadne. Z uwagi na wysoką przepuszczalność powietrzną izolacji włóknistych, zaleca się obniżyć krytyczną wartość liczby Rayleigha do 0,090.
4. W celu określenia rzeczywistego wpływu jednostronnej filtracji na przenikanie ciepła przez przegrody wypełnione luźną wełną mineralną należy podczas wyznaczania wartości oporu cieplnego warstwy termoizolacji przeprowadzić konwersję przewodności właściwej termoizolacji.
5. Zaproponowana metodologia znajduje zastosowanie przy obliczeniach cieplno – wilgotnościowych przegród budowlanych, w których nie występuje osłona przeciwwietrzna lub

jest zrealizowane tylko częściowe osłonięcie. Metodologia może być również użyta do szacowania strat ciepłych i możliwości wystąpienia kondensacji pary wodnej w istniejących przegrodach.

6. Programy do symulacji sprzężonego procesu wymiany ciepła i masy w przegrodach nie uwzględniają braku ciągłości na styku między włóknami luźnego materiału termoizolacyjnego. Prowadziło to do rozbieżności między wynikami symulacji, a wartościami wykazanymi w badaniach laboratoryjnych. Zaproponowany kierunek modyfikacji modelu cieplnego poprzez wprowadzenie dodatkowego czynnika – np. współczynnika separacji włókien materiału wydaje się celowy.

Realizacja badań nad właściwościami luźnej wełny mineralnej umożliwiła mi dalsze rozwinięcie warsztatu badawczego. Równoległe z badaniami naukowymi prowadziłem pomiary szczelności powietrznej budynków istniejących oraz nowobudowanych. Przeprowadzałem analizy zapotrzebowania na energię i szukałem obszarów w których realne straty ciepłe przewyższały wartości obliczeniowe. W ten sposób identyfikowałem obszary nadmiernie przewiewane, a często jak opisałem to we wprowadzeniu, pozornie szczelne. Przykład budynku (opisany w B1), w którym przeprowadzałem szczegółowe analizy związane z nieskrośną filtracją powietrza przedstawiłem na rysunku 1. Widoczne na termogramach 6c i 6e straty ciepłe wywołane są nieskrośną filtracją powietrza. Ten rodzaj strat ciepłych do dnia dzisiejszego nie ma przyjętego standardu uwzględniania go w bilansie cieplnym, stąd opracowana konwersja przewodności cieplnej izolacji włóknistych poddawanych filtracji ma znaczenie użytkowe. Jest to jeden z budynków, w których zmierzona szczelność powietrzna nie przekraczała dopuszczalnej wartości. Dopiero szczegółowa identyfikacja szczelin umożliwiła ujawnienie problemu infiltracji.



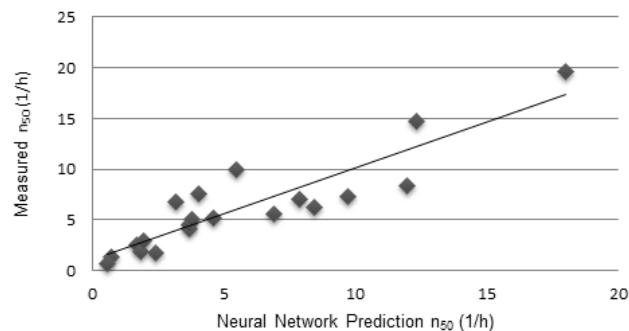
Rys. 6. Poddasze budynku szczelnego pozornie, a) brak szczelności warstwy wiatroszczelnej, b, c) połączenie ściany działowej i połaci dachowej i odpowiadający mu termogram, d, e) połączenie ściany kolankowej, działowej i połaci dachowej i odpowiadający mu termogram, f) termogram strefy instalacji elektrycznych [B4]

W roku 2015 nawiązałem współpracę z naukowcami z Josip Juraj Strossmayer University of Osijek w Chorwacji, którzy badali szczelność powietrzną chorwackich budynków. Propozycja współpracy oznaczała konieczność skatalogowania budynków, w których do tego czasu



wykonałem badania szczelności powietrznej. Opracowanie katalogu polskich budynków wiązało się z koniecznością ilościowego i jakościowego scharakteryzowania obudowy budynków, stwierdzonych wad i usterek. Dysponując wiedzą z realizacji pracy doktorskiej mogłem ocenić jakiego typu straty ciepłe występują w analizowanych budynkach. W wielu z nich występował problem szczelności pozornej. Na podstawie katalogu przygotowano dane wejściowe do estymacji szczelności powietrznej przy wykorzystaniu sieci neuronowych.

Wyniki uzyskane w trakcie estymacji, zaprezentowane na rysunku 7, wskazują, że najtrafniejszą prognozę uzyskano w przypadku konstrukcji murowych o bardzo wysokiej lub skrajnie niskiej szczelności stolarki budowlanej [B2].

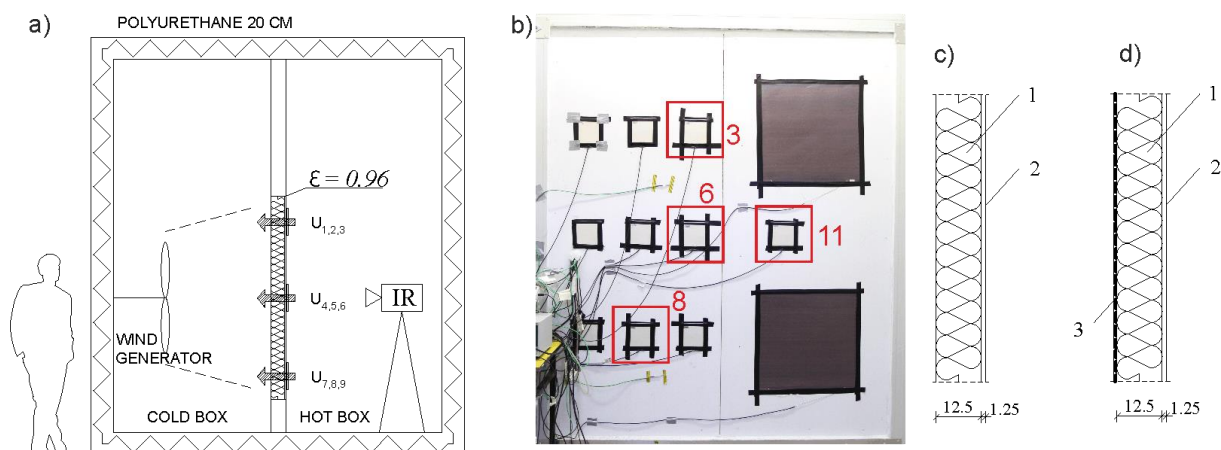


Rys. 7. Zestawienie zmierzonych wartości szczelności powietrznej z wartościami obliczonymi w modelu sieci neuronowych [B2]

Przewidywana szczelność budynków o konstrukcji szkieletowej, która nie została wcześniej zaimplementowana w modelu, była przeważnie zawyżona. Może to dawać wskazanie na dodatkowe straty ciepłe wynikające z jednostronnej filtracji powietrza. Na uwagę zasługuje fakt, że była to pierwsza opublikowana praca naukowa dotycząca oszacowania szczelności powietrznej polskich zasobów budowlanych na podstawie danych o budynkach.

Kolejnym zadaniem, które podjąłem w zakresie oceny strat ciepłych wynikających z filtracji powietrza było wyznaczenie czasu powrotu przedmuchiwanego przegród do równowagi termicznej po zakończonym oddziaływaniu wiatru w zależności od sposobu zabezpieczenia od filtracji powietrza. Szczegółowo opisane w publikacjach [B4]. W tym celu zmodyfikowałem model laboratoryjny zwiększając gęstość luźnej wełny mineralnej, zagęszczając sieć czujników temperatury i przepływu ciepła (rysunek 8). Dodatkowo modele po stronie chłodnej zostały usztywnione, co miało zapobiegać deformacjom warstwy termoizolacyjnej.

Badania przeprowadziłem dla dwóch przypadków – braku osłony od wiatru oraz z częściową osłoną, tzn. membraną której łączenia nie były klejone, a materiał ledwo na siebie nachodził. Miało to odwzorowywać często spotykane (rysunek 6a) przypadki w istniejących budynkach.



Rys. 8. Schemat badań, a) komora klimatyczna, b) ciepła strona badanej przegrody z rozmieszczeniem czujników, c) pierwszy model – pozbawiony ochrony przeciwwietrznej, d) drugi model – z częściową ochroną przeciwwietrzna, 1 – luźna wełna mineralna o gęstości  $120 \text{ kg/m}^3$ , 2 – płyta gipsowo-kartonowa, 3 – częściowa ochrona przeciwwietrzna [B4]

W analizowanym eksperymencie, podobnie jak w [D, B1] redukcja oporu cieplnego jest proporcjonalna do prędkości wiatru. Widoczna jest różnica w zachowaniu obu modeli podczas oddziaływania wiatru. Model drugi, w którym zastosowano częściową ochronę przed wiatrem, wolniej reagował na jego działanie. W tym przypadku redukcja oporu cieplnego była mniejsza i postępowała wolniej. Wyjątkiem jest obszar obejmujący nieszczelne połączenie membran wiatroizolacyjnych. W tym obszarze zmiany były szybsze i większe niż w obszarach chronionych osłoną wiatrową. Co istotne, maksymalna redukcja oporu cieplnego w tym obszarze, dla modelu drugiego była porównywalna z modelem pierwszym, z tą różnicą, że następowała gwałtowniej i niezależnie od prędkości wiatru osiągała zbliżoną wartość. W pozostałych przypadkach największe zmiany oporu cieplnego w modelu drugim zmierzono dla jednej z niższych wytwarzanych prędkości wiatru. Podczas silnego parcia wiatru na skutek deformacji, membrany wykonane z elastycznych materiałów dociskały do modeli powodując zmniejszanie obszaru przez który może wpływać powietrze do materiału termoizolacyjnego. Mniejsza prędkość powietrza nie deformuje membran znacząco, przez co więcej powietrza dostaje się do termoizolacji powodując większe straty ciepłe.

Analizy zmian oporu cieplnego na skutek oddziałującego wiatru umożliwiły wyznaczenie czasu jaki upływał od rozpoczęcia oddziaływania wiatru do osiągnięcia maksymalnej redukcji oporu cieplnego, oracz czasu powrotu badanych modeli do stanu równowagi termicznej po ustaniu oddziaływania wiatru. Dla obszarów, które znajdowały się w połowie wysokości modelu, we wszystkich analizowanych przypadkach, najkrótszy czas do maksymalnej redukcji oporu cieplnego występował dla największej prędkości powietrza. Najszybciej redukcja następowała w dolnych obszarach modelu i dla maksymalnej prędkości powietrza była niemal dwukrotnie szybsza niż dla pozostałych obszarów. Za wyjątkiem obszaru obejmującego nieszczelne łączenie membrany wiatroizolacyjnej, w modelu drugim czas powrotu do równowagi termicznej był krótszy niż w modelu pierwszym. Dla obu modeli dla maksymalnej prędkości powietrza czas powrotu w obszarach środkowych jest zbliżony. Nie zaobserwowano bezpośredniej zależności między mierzonymi czasami a prędkością powietrza, jednak poza przypadkiem drugiego

modelu i obszaru obejmującego łączenie membran, czasy powrotu dla średnich wartości prędkości były większe niż dla wartości skrajnych.

Tak, jak przedstawiono to w równaniu 1, współczynnik przepuszczalności powietrznej materiału jest kluczowym składnikiem równania bilansu cieplnego ośrodka w którym zachodzi termo filtracja. Praktycznie nie istnieje możliwość obliczenia strat cieplnych wywołanych filtracją powietrza bez znajomości tego współczynnika transportu. W literaturze jest on sporadycznie wymieniany i przede wszystkim dla różnych gęstości fabrycznie formowanej wełny mineralnej. Również programy do symulacji cieplno-wilgotnościowych mają dosyć skromną bazę tych wartości. Współczynników dla materiałów w postaci luźnej praktycznie nie było dostępnych. W prezentowanym przeze mnie cyklu publikacji zamieszczone są wyznaczone współczynniki przepuszczalności powietrznej dla luźnej wełny mineralnej [D, B5], włókien konopnych [B3], wełny drzewnej [B5], celulozy [B6] i paździerzy konopnych [B7] w zależności od gęstości nasypowej materiału.

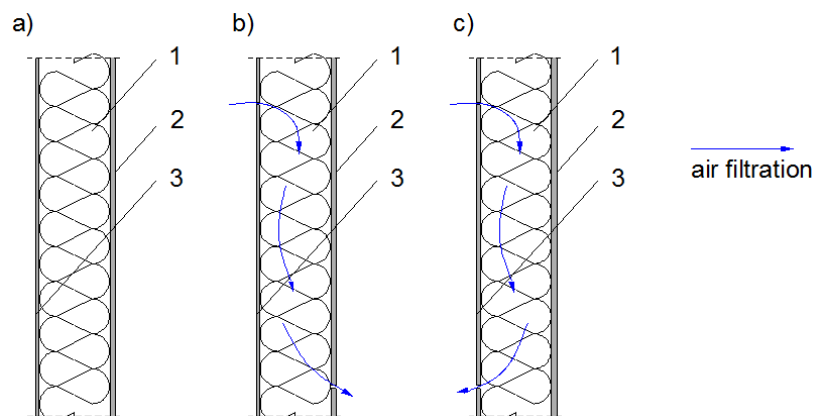
Każdy z analizowanych materiałów cechował się zmniejszaniem przepuszczalności powietrznej wraz z przyrostem gęstości. Jednak, każdy materiał charakteryzował się innym kształtem krzywych oddających tą zależność. W zależności m.in. od rozmiarów i sztywności włókien, zawartości frakcji pylastej spadek funkcji miał charakter łagodny lub gwałtowny. Rezultaty badań mają charakter pionierski.

Elementem osiągnięcia jest także wykazanie wpływu zawilgocenia na przepuszczalność powietrzną luźnych materiałów włóknistych: wełny mineralnej, celulozy i wełny drzewnej [B6]. Dla każdego materiału przeprowadzono jedną serię pomiarową z materiałem suchym i dwie serie z materiałem mokrym. W każdej z serii zastosowano co najmniej pięć różnych gęstości materiału. Badane materiały były kondycjonowane nad wodą destylowaną w celu osiągnięcia stanu wysokiej wilgotności sorpcyjnej. Wełna mineralna charakteryzuje się małą skłonnością do sorpcyjnego zawilgocenia, natomiast materiały pochodzenia naturalnego, zwłaszcza włókna celulozowe, zostały zawilgocone w wysokim stopniu.

Obszerne badania wykazały, że tendencja do zmniejszania przepuszczalności powietrza wraz z gęstością występuje niezależnie od tego, czy materiał jest suchy, czy mokry. Obecność wilgoci w wełnie mineralnej zmniejsza przepuszczalność powietrzną materiału, dlatego funkcja malejąca spada gwałtownie wraz z gęstością. Wilgoć występująca w próbkach wełny drzewnej również zmniejsza przepuszczalność powietrza z widoczną tendencją, że im bardziej wilgotna jest próbka, tym bardziej zmniejszona jest przepuszczalność powietrza. Włókna celulozowe osiągnęły najwyższy poziom wilgoci spośród badanych materiałów, jednak ich wpływ na przepuszczalność powietrza nie jest widoczny. Mokre włókna celulozowe nie reagują w przewidywalny sposób na przepływ powietrza. Wiele próbek celulozowych odbiega od trendu. Włókna celulozowe podczas przepływu powietrza w najmniejszym stopniu uległy wysuszeniu. Badanie struktury włókien suchych i mokrych pod mikroskopem wykazało, że w przypadku wełny mineralnej wilgoć pozostaje jedynie na powierzchni włókien, natomiast w materiałach naturalnych wilgoć pozostaje zarówno na powierzchni włókien, jak i w ich wnętrzu.

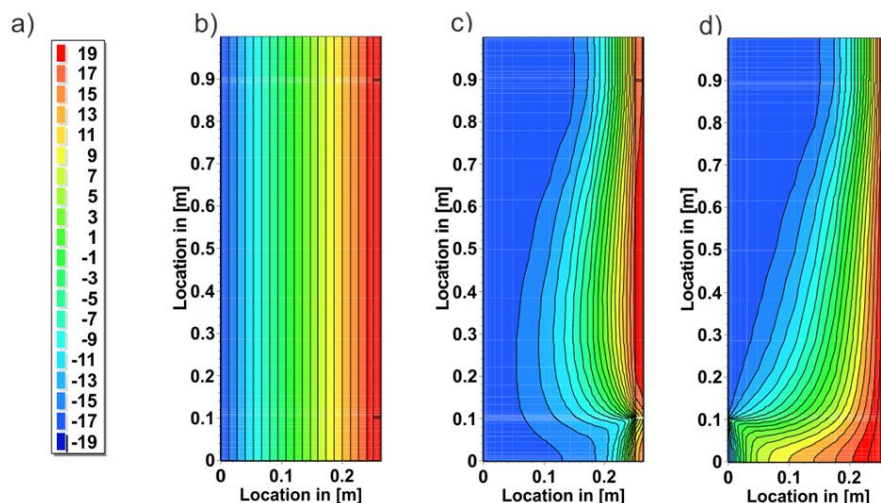
Elementem osiągnięcia są także wyniki symulacji cieplnych wykonane na modelach utworzonych w programie Delphin 5.8. W symulacjach obliczałem wpływ filtracji powietrza na przenikanie ciepła przez ściany szkieletowe wypełnione luznymi, zbadanymi przez mnie, materiałami włóknistymi. Badania obejmowały parametryczne obliczenia w zależności od zagęszczenia, grubości izolacji cieplnej, charakteru przepływu powietrza (infiltracja skrośna, nieskrośna). Wyniki obliczeń i ich szczegółowe omówienie zawarte jest w pracach [B1, B3, B4, B5, B7].

Przykładowy model obliczeniowy, ściany wypełnionej luznymi włóknami konopnymi jest pokazany na rysunku 9. Do symulacji przyjęto grubość warstwy termoizolacji 25 cm, dane materiałowe do modeli symulacyjnych na podstawie wartości zmierzonych laboratoryjnie. Warunki brzegowe, temperatura wewnętrzna  $t_i=20,0^{\circ}\text{C}$ , zewnętrzna  $t_e=-20,0^{\circ}\text{C}$ , różnica ciśnienia  $\Delta P=5,0$  Pa.



Rys. 9. Przekrój poprzeczny badanej ściany szkieletowej wypełnionej luznymi włóknami konopnymi: a) warunki braku filtracji powietrza, b) infiltracja powietrza, c) nieskrośna filtracja, 1 – luzne włókna konopne (35 lub 70  $\text{kg/m}^3$ ), 2 – płyta gipsowo-kartonowa, 3 – membrana wiatroizolacyjna [B3]

Rozkład temperatury w analizowanych modelach dla przyjętej gęstości włókien konopnych  $35 \text{ kg/m}^3$  zaprezentowano na rysunku 10. Analiza strumieni ciepła i rozkładu temperatury wskazują, że włókna konopne charakteryzują się wysoką przepuszczalnością powietrza. Spowodowało to, że symulowana ściana została w bardzo krótkim czasie schłodzona pod wpływem infiltracji powietrza lub jednostronnej filtracji. Dla odmiany, włókna celulozowe uzyskują dużą odporność na filtrację powietrza wraz ze wzrostem gęstości.



Rys. 10. Rozkład temperatury w modelowanych przypadkach, a) legenda temperatury, b) stan równowagi bez filtracji powietrza, c) efekt infiltracji powietrza, d) efekt nieskrośnej filtracji powietrza [B3]

#### 4.2.6 Podsumowanie

Przeprowadzone badania i analizy wykazują duży wpływ filtracji powietrza na przenikanie ciepła przez przegrody izolowane luźnymi materiałami termoizolacyjnymi. Straty wywołane filtracją zależą od wielu czynników, którymi są m.in. sposób zabezpieczenia izolacji cieplnej przed przepływem powietrza, jej gęstość, prędkość oddziałującego podmuchu i jego długość. Ponadto przegrody poddawane stałym oddziaływaniom powietrza mogą znajdować się w stanie trwałego wychłodzenia. Jest to spowodowane niemożnością powrotu do równowagi termicznej, który trwa kilkakrotnie dłużej niż oddziaływanie np. wiatru.

Opisane przeze mnie badania zawierają opis problemu filtracji nieskrośnej w budynkach, który może przyczyniać się do znacznych strat ciepłych w przegrodach izolowanych materiałami włóknistymi. Z przytoczonych przeze mnie przykładów może to być nawet do ok. 80% redukcji oporu cieplnego.

Konwekcyjne straty ciepła w luźnych materiałach izolacyjnych zależą od ich gęstości. Wyzaczyłem współczynniki przepuszczalności powietrznej dla luźnej wełny mineralnej, włókien konopnych, celulozy, wełny drzewnej i paździerzy konopnych w zależności od gęstości nasypowej materiału. W przypadku wełny mineralnej, wełny drzewnej i celulozy rozpoznałem także wpływ zawilgocenia na przepuszczalność powietrzną.

Wyznaczenie współczynników przepuszczalności powietrznej oraz innych danych materiałowych (opisane w osiągnięciu drugim) umożliwiło mi zbudowanie modelu obliczeniowego w programie Delphin do wyznaczania wpływu infiltracji oraz jednostronnej filtracji powietrza na straty ciepłe w przegrodach szkieletowych wypełnionych luźnymi materiałami izolacyjnymi. Programy do symulacji sprzężonego procesu wymiany ciepła i masy w przegrodach nie uwzględniają braku ciągłości na styku między włóknami luźnego materiału termoizolacyjnego. Prowadziło to do rozbieżności między wynikami symulacji, a wartościami wykazanymi w badaniach laboratoryjnych. Zaproponowany przeze mnie kierunek modyfikacji modelu cieplnego

poprzez wprowadzanie separacji włókien przybliżył rezultaty obliczeń do wyników laboratoryjnych.

Badania zaprezentowane przeze mnie wyraźnie wskazują na celowość uwzględniania w bilansie cieplnym budynku mostków cieplnych utworzonych w miejscach infiltracji powietrza. Do dnia dzisiejszego nie ma opracowanych procedur uwzględniających te anomalie w obliczeniach strat cieplnych budynków.

Głównym czynnikiem decydującym o pełnej ochronie przed przewiewaniem wiatrem jest dokładność i szczelność połączeń arkuszy wiatroizolacji pomiędzy sobą oraz z elementami budynku. Obszary sąsiadujące z nieszczelnym połączeniem membran wiatroizolacyjnych są jeszcze bardziej wychłodzone niż w przypadku braku membran. Dodatkowo, pomiary długoterminowe wskazują na problem osiadania luźnego materiału włóknistego w konstrukcji. Może to prowadzić do powstania szczelin w warstwie ochrony termicznej, a tym samym do zwiększenia wymiany ciepła na drodze konwekcji. Przy obliczaniu strat cieplnych w konstrukcjach szkieletowych bez pełnej ochrony od wiatru należy uwzględnić straty ciepła spowodowane filtracją powietrza. Warto przeprowadzić konwersję przewodności właściwej termoizolacji z uwagi na filtrację powietrza w izolacji cieplnej. Szczególnie w przypadku obliczeń strat cieplnych na potrzeby sporządzenia audytu energetycznego może to skutkować większą opłacalnością planowanych prac modernizacyjnych.

Chociaż problem szczelności powietrznej jest stosunkowo rzadko analizowany przez projektantów, wykonawców, a nade wszystko inwestorów, za pozytywny przejaw świadomości należy uznać rozpropagowanie w Polsce badań metodą Blower Door. W przeciągu ostatnich kilkunastu lat rynek usług w badaniu szczelności powietrznej znacząco się powiększył. Należy jednak zaznaczyć, że pełna szczelność budynków, która dziś jest proponowana nie jest rozwiązaniem bezbłędnym. Trwałość materiałów powietrzno-szczelnych nie jest wieczna. Wraz z upływem czasu starzejący się materiał zaczyna przepuszczać powietrze. Dehermetyzacja przegród jest więc nieunikniona. Z międzynarodowej nomenklatury powoli znika określenie *vapor barrier* na rzecz *vapor retarder*. Budynek powinien sam reagować na podwyższony poziom wilgotności i umożliwić jej odpływ w kierunku zewnętrznym. Wentylowanie mechaniczne, które staje się wymogiem eksploatacyjnym w zbyt szczelnych budynkach nie jest rozwiązaniem przyjaznym środowisku. W myśl polityki zrównoważonego rozwoju proces osuszania nie powinien być wspomagany dostarczaniem energii. Tymczasem, wentylowanie mechaniczne pomieszczeń pochłania ogromne ilości energii.

Zapoczątkowane w trakcie realizacji pracy doktorskiej badania nad filtracją nieskrośną ukierunkowały mój warsztat pracy na dogłębne analizowanie wpływu dehermetyzacji przegród na jej stan cieplny i wilgotnościowy. Z jednej strony filtracja powietrza wychładza przegródę, z drugiej osusza. Sytuacją pożądaną jest aby materiały będąc odporne na przepływ powietrza miały możliwość buforowania i oddawania wilgoci do otoczenia. Aktualnie prowadzę w nieizotermicznej komorze klimatycznej prace nad częściową dehermetyzacją przegród i jej wpływem na stan cieplno-wilgotnościowy wbudowanych materiałów. Opisane w drugim osiągnięciu materiały włókniste organiczne mają zdolność magazynowania wilgoci i jej uwalniania

do otoczenia. Sterując ich gęstością można doprowadzić do znacznego ograniczenia przepuszczalności powietrznej, a przez to zmniejszenia filtracyjnych strat cieplnych, jednocześnie umożliwiając dyfuzyjny przepływ pary wodnej.

### 4.3 Osiągnięcie drugie

#### 4.3.1 Tytuł osiągnięcia

##### **Rozpoznanie właściwości ciepłno-wilgotnościowych materiałów pochodzenia naturalnego jako termoizolacji w postaci luźnej**

#### 4.3.2 Wprowadzenie

#### 4.3.3 Monotematyczny cykl publikacji składający się na osiągnięcie w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport

Wymienione poniżej pozycje są to publikacje recenzowane.

- [C1] Kosiński P., Brzyski P., Skoratko A., Motacki W. 2018. *Thermal properties of raw hemp fiber as a loose-fill insulation material*. Journal of Natural Fibers 15(5), 717-730. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1361371>
- [C2] Brzyski P., Kosiński P., Skoratko A., Motacki W. 2019. *Thermal properties of cellulose fiber as insulation material in a loose state*. AIP Conference Proceedings 2133. Proceedings of the Central European Symposium on Thermophysics 2019 (CEST 2019) 16<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> September 2019 Banska Bystrica, Slovakia. <https://doi.org/0.1063/1.5120136>
- [C3] Kosiński P., Brzyski P., Suchorab Z., Łagód G. 2020. *Heat losses caused by the temporary influence of wind in timber frame walls insulated with fibrous materials*. Materials 13(23), 1-14. <https://doi.org/10.3390/ma13235514>
- [C4] Kosiński P., Brzyski P., Duliasz B. 2020. *Moisture and wetting properties of thermal insulation materials based on hemp fiber, cellulose and mineral wool in a loose state*. Journal of Natural Fibers 17(2), 199-213. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1477086>
- [C5] Brzyski P., Kosiński P., Zgliczyńska A., Iwanicki P., Poko J. 2021. *Mass Transport and Thermal Conductivity Properties of Flax Shives for Use in Construction Industry*. Journal of Natural Fibers 18(7), <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1675216>
- [C6] Kosiński P., Brzyski P., Tunkiewicz M., Suchorab Z., Wiśniewski D., Palczyński P. 2022. *Thermal Properties of Hemp Shives Used as Insulation Material in Construction Industry*. Energies 15(7). <https://doi.org/10.3390/en15072461>
- [C7] Kosiński P., Wójcik R., Rosiński A. 2023. *An influence of temperature on thermal conductivity of loose fill insulations of natural origin*. Journal of Physics: Conference Series

2654. Proceedings of the 13<sup>th</sup> Nordic Symposium on Building Physics (NSB-2023) 12-14 June 2023 Aalborg, Denmark. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2654/1/012076>

[C8] Kosiński P. 2023. *Moisture Transport in Loose Fibrous Insulations under Steady-State Boundary Conditions*. Materials 16(24), <https://doi.org/10.3390/ma16247656>

[C9] Kosiński P., Startek A. 2023. Moisture transport in loose fibrous insulations subjected to air filtration. Journal of Physics: Conference Series 2628. Proceedings of the 5<sup>th</sup> Central European Symposium on Thermophysics (CEST 2023) 6-8 September 2023 Poprad, Slovakia. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2628/1/012015>

#### 4.3.4 Najważniejsze elementy osiągnięcia

1. Określenie zakresu zmienności współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  luźnych materiałów pochodzenia naturalnego w zależności od ich gęstości, włókien konopnych odmiany Białobrzeskie [C1], włókien celulozowych [C2], wełny drzewnej [C3], paździerzy lnianych odmiany Modran [C5] i paździerzy konopnych odmiany Białobrzeskie [C6].
2. Określenie zakresu zmienności współczynnika filtracji  $\kappa$  luźnych materiałów pochodzenia naturalnego w zależności od ich gęstości – przedmiot pierwszego cyklu, osiągnięcie nr 1.
3. Wyznaczenie wilgotności sorpcyjnej oraz kąta zwilżania włókien konopnych oraz celulozowych [C4].
4. Wyznaczenie wpływu temperatury na przewodność cieplną włókien konopnych odmiany Białobrzeskie, włókien celulozowych oraz paździerzy lnianych odmiany Modran [C7].
5. Wyznaczenie paroprzepuszczalności paździerzy lnianych odmiany Modran [C5].
6. Zbadanie transportu wilgoci w warunkach stacjonarnych na przykładzie wełny drzewnej i włókien celulozowych [C8].
7. Zbadanie transportu wilgoci w warunkach filtracji powietrza na przykładzie wełny drzewnej [C9].
8. Wykonanie modeli symulacyjnych prezentujących zachowanie materiałów pochodzenia naturalnego jako zasypowych izolacji cieplnych w przegrodach szkieletowych poddanych działaniom czynników atmosferycznych [C1, C2, C3, C5, C6, C7].

#### 4.3.5 Motywacja i uzasadnienie podjęcia badań

W praktyce zawodowej coraz częściej zauważam, że współczesne budynki są przegrzewane, a nadmiar syntetycznych materiałów, z których są wykonywane, uniemożliwia utrzymanie wewnątrz komfortu cieplnego i użytkowego. Wiele współczesnych budynków przypomina termosy. Wysoki opór cieplny przegród zewnętrznych uzyskiwany jest poprzez stosowanie coraz lżejszych materiałów konstrukcyjnych powlekanych po stronie zewnętrznej grubymi warstwami styropianu lub wełny mineralnej. W ten sposób powstaje obudowa budynku pozbawiona możliwości akumulacji ciepła, wilgoci i płynnego pasywnego regulowania mikroklimatu



wnętrza. Podobnie jest w przypadku przegród szkieletowych, w których udział termoizolacji stanowi ponad 80% objętości konstrukcji.

To właśnie przegrody szkieletowe były dla mnie inspiracją zarówno do badań wpływu filtracji powietrza na ich stan cieplny, jak również do poszukiwania alternatywnych materiałów termoizolacyjnych. Ich wybór nie był przypadkowy. Badania luźnej wełny mineralnej, która była przedmiotem mojej pracy doktorskiej uświadomiły mi, że materiały w stanie luźnym są bardzo mało rozpoznane.

W roku 2016 nawiązałem kontakt z Ogólnopolskim Stowarzyszeniem Budownictwa Naturalnego. Z licznych rozmów, które odbyłem ze specjalistami od budownictwa typu *strawbale* oraz *hemcrete*, wynikało, że chociaż surowce takie jak paździerz lub włókna roślinne mają szerokie zastosowanie w tzw. budownictwie naturalnym, to ich właściwości nie są rozpoznane. Był to kolejny czynnik motywujący do przeprowadzenia badań tych materiałów.

W przeciągu ostatnich piętnastu lat wartości dopuszczalnych współczynników przenikania ciepła dla przegród zewnętrznych były już zredukowane cztery razy. Chociaż obowiązek spełnienia tego wymogu jest bezdyskusyjny, dyskusyjne powinno być to jakie materiały należy dobrać. Badania, które opisałem w niżej analizowanych publikacjach, a także liczne wystąpienia w trakcie realizacji Grantu Wyszehradzkiego, konferencji naukowych, mobilności Erasmus+ w uczelniach partnerskich, czy nawet prelekcja, którą wygłosiłem w Ośrodku Doradztwa Rolniczego w Olsztynie mogą przyczynić się do popularyzacji stosowania izolacji pochodzenia naturalnego w budownictwie. Zaletą takich materiałów jest, poza ich niską ceną, naturalna możliwość buforowania wilgoci i oddawania jej do otoczenia, co w przyszłości może zachęcić inwestorów do wykorzystania tej właściwości w pasywnym regulowaniu mikroklimatu wnętrz.

Prezentowany cykl publikacji poświęcony jest rozpoznaniu właściwości cieplno-wilgotnościowych materiałów pochodzenia naturalnego jako termoizolacji w postaci luźnej. Były to wełna drzewna, włókna celulozowe, włókna i paździerz konopne oraz paździerz lniane.

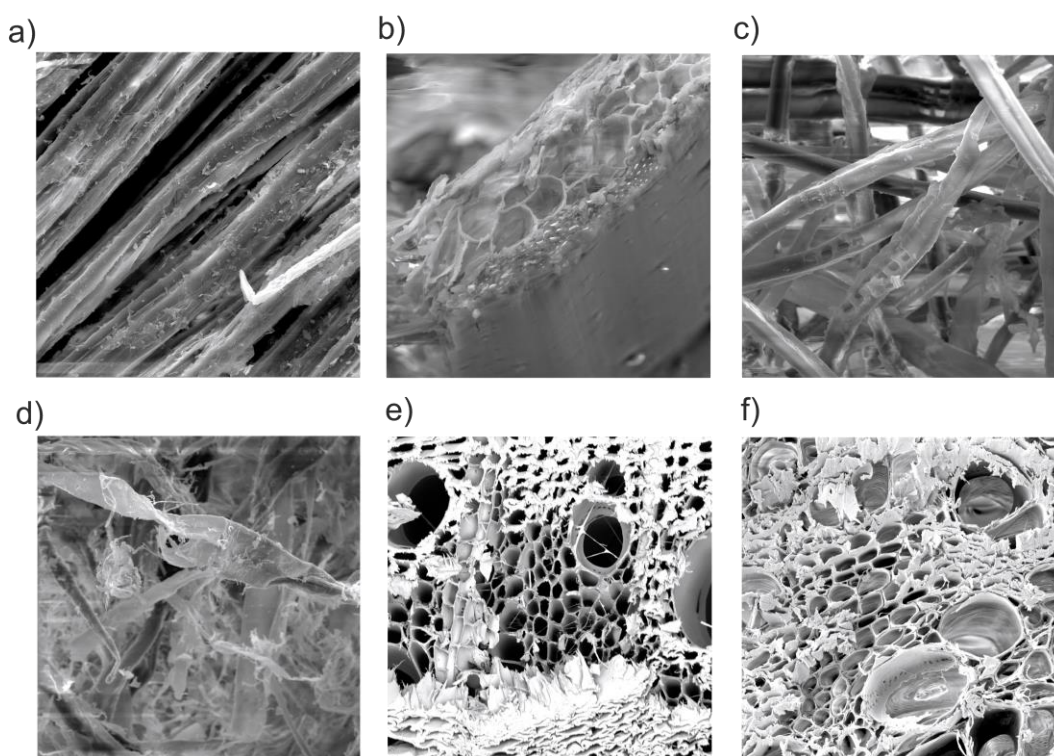
#### **4.3.6 Omówienie wyników i wskazanie możliwości wykorzystania ich w praktyce**

Właściwości cieplno-wilgotnościowe materiałów pochodzenia naturalnego wynikają z ich unikatowej budowy włókien. Uwidacznia się ona w obserwacjach przy użyciu mikroskopu elektronowego. Takie zobrazowanie jest zaprezentowane na rysunku 11. W odróżnieniu od wysoko przetworzonych materiałów włóknistych stosowanych w budownictwie, np. wełny mineralnej, materiały organiczne cechują się otwartością kapilarną, i stosunkowo dużymi średnicami włókien. W pracach nad rozpoznaniem właściwości cieplno-wilgotnościowych materiałów pochodzenia naturalnego, obserwacja mikroskopowa była istotnym elementem procesu badawczego.

Liczne cechy podobieństwa można zaobserwować w przypadku włókien celulozowych oraz wełny drzewnej. Cechą charakterystyczną włókien obu materiałów jest kapilarna budowa wewnętrzna. Włókna te rozdzielają się włoskowato w wielu kierunkach, tworząc większe struktury, co podkreśla ich roślinne pochodzenie. Powierzchnie włókien są chropowate, z licznymi

wypukłościami, zwężeniami i dziurami. Pojedyncze włókna są puste w środku tworząc w ten sposób układ kapilarny. Średnice włókien celulozowych mieszczą się w przedziale 1–50  $\mu\text{m}$ , a odstępy pomiędzy włóknami mieszczą się w przedziale 1–150  $\mu\text{m}$ . Średnice włókien wełny drzewnej mieszczą się w przedziale 20–35  $\mu\text{m}$ , a odstępy między nimi 10–45  $\mu\text{m}$ . Taka budowa wskazuje na wysoką porowatość materiału, a co więcej, podatność na filtrację powietrza. W trakcie przygotowywania próbek obu materiałów do badań pod mikroskopem elektronowym, budowa włókien uniemożliwiła ich pełne pokrycie jednolitą warstwą przewodzącego złota. Wskazuje to na niską sztywność, urozmaiconą powierzchnię, a także nasiąkliwość włókien. Więcej na ten temat w pracy [C8].

Odmierna jest budowa włókien konopnych. Włókna te charakteryzują się prostą budową, otwarto-kapilarną, na powierzchni włókien nie zaobserwowano zapylenia, widoczne są ślady pozostałości materiałów nie celulozowych, takich jak pektyny, tworzących wiązania między pojedynczymi włóknami. Włókna są uporządkowane równoległe do siebie bez wyraźnych rozgałęzień, przekrój poprzeczny jest wypełniony licznymi kanalikami i wypustkami. Średnica włókien w zakresie 24–50  $\mu\text{m}$ . Włókna konopne łatwiej można było pokryć złotem niż omawiane wcześniej celulozowe i drzewne. Świadczy to o ich większej sztywności. Więcej na ten temat w pracy [C4].



Rys. 11. Mikroskopowe powiększenie materiałów pochodzenia organicznego, a) włókna konopne (754x), b) słoma zbożowa (766x), c) wełna drzewna (784x), d) włókna celulozowe (732x), e) paździerz konopne (1000x), f) paździerz lniane (1000x)

Struktura paździerzy konopnych i lnianych jest gąbczasta, cienkie ścianki o grubościach ok. 1  $\mu\text{m}$ , oddzielają pory. Pory są przeważnie podłużne, tworzące elipsę. Pory o zmiennej wielkości, zależne od materiału, nie większe niż 40x95  $\mu\text{m}$ . Komórki powietrzne ograniczone

ściankami w paździerzach konopnych mają mniej regularny kształt niż w lnianych. W obu materiałach, struktura oddalona od dużych porów jest uporządkowana, a ścianki oddzielające pory wewnętrzne są do siebie równoległe w jednym z kierunków. Badania paździerzy opisano w [C5 i C6], jednak badania mikroskopowe są elementem manuskryptu znajdującego się w recenzji.

Porowata struktura wewnętrzna materiałów pochodzenia organicznego ma znaczenie przy oznaczaniu ich cech dotyczących przewodzenia ciepła, przepuszczalności powietrznej, nasiąkliwości sorpcyjnej lub paroprzepuszczalności. Z uwagi na możliwość domykania porów, wszystkie cechy transportowe materiałów organicznych zależą od ich gęstości nasypowej.

Podstawowym czynnikiem stanowiącym o przydatności materiału jako termoizolacji jest współczynnik przewodzenia ciepła. Za wyjątkiem paździerzy lnianych [C5], w każdym z analizowanych materiałów [C1, C2, C6, C8] zaobserwowano zależność współczynnika przewodzenia ciepła od gęstości nasypowej materiału.

Rezultaty badań przewodności cieplnej analizowanych materiałów wskazują na ich zdolności termoizolacyjne. Spośród analizowanych materiałów najniższą przewodność cieplną wykazuje luźna wełna drzewna. Niewiele większa przewodność cieplna cechuje włókna konopne oraz celulozowe. Należy jednak zaznaczyć, że w miękkich materiałach gęstość odgrywa kluczową rolę w osiągnięciu jak najniższej przewodności cieplnej.

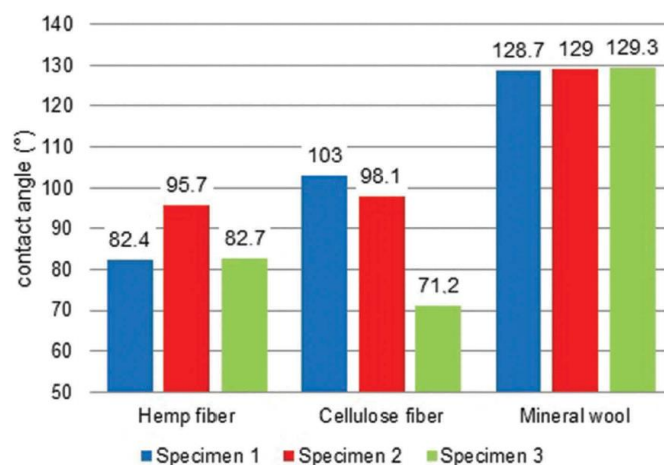
Przewodność cieplna materiałów budowlanych jest zależna od temperatury. Dla wielu materiałów wpływ ten jest znany i np. opisany współczynnikami konwersji. W pracy [C7] przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury na przewodność cieplną luźnych materiałów włóknistych: włókien konopnych odmiany Białobrzeskie, celulozowych, paździerzy lnianych odmiany Modran i dla porównania – wełny mineralnej. Dla każdego materiału przeprowadzono badania dla kilku próbek pobranych z tego samego źródła materiału. Dla każdego z nich przeprowadzono badania dla dwóch zakresów różnicy temperatury, 15°C oraz 20°C. Dla zbadanych materiałów wyznaczyłem współczynniki konwersji na podobiznę współczynników zamieszczonych w EN ISO 10456. Współczynniki dla włókien konopnych i paździerzy lnianych nie były dotychczas publikowane.

Kolejnym elementem osiągnięcia było zbadanie paroprzepuszczalności paździerzy lnianych odmiany Modran. Badania te opisano w pracy [C5]. Badania paroprzepuszczalności przeprowadzono metodą *dry cup*. Z uwagi na wymagania stawiane przez EN ISO 12572 aby dla materiału w stanie luźnym próbka miała co najmniej 10 cm wysokości, a średnica co najmniej dwa razy więcej niż grubość próbki wykonałem autorskie stanowisko do badania paroprzepuszczalności materiałów luźnych.

Ważnym elementem osiągnięcia było rozeznanie właściwości wilgotnościowych luźnych włókien celulozowych i konopnych. Przedstawione w pracy [C4] wyniki mają charakter pionierski. Badania obejmowały wyznaczenie wilgotności sorpcyjnej oraz kąta zwilżania włókien. Krótki czas potrzebny do osiągnięcia bilansu masowego próbek wełny konopnej może być związany z małą powierzchnią właściwą włókien konopnych. Włókna celulozowe mają bardziej zróżnicowaną strukturę i większą powierzchnię właściwą materiału. Stąd czas osiągnięcia

stanu równowagi był dłuższy niż dla włókien konopnych. Dla porównania badania wykonano też dla luźnej wełny mineralnej. Próbki wełny mineralnej potrzebowały najwięcej czasu, aby osiągnąć równowagę masową. Przyczyną może być konstrukcja włókien wełny mineralnej - wypełnionych wewnątrz rurek o słabo rozwiniętej powierzchni właściwej. Rurki te tworzą konstrukcję charakteryzującą się dużymi otwartymi przestrzeniami, częściowo wypełnionymi pyłem. Badania wykazały duży potencjał włókien konopnych i celulozowych do pochłaniania wilgoci.

Badania kąta zwilżania materiałów służyły określeniu ich zdolności do pochłaniania wilgoci na skutek kontaktu z nią. Dla każdego materiału zbadano losowo wybrane próbki. Wyniki pokazano na rysunku 12. Wszystkie próbki wełny mineralnej wykazały cechy hydrofobowe, część próbek celulozy i włókien konopnych wykazały cechy hydrofilowe. Średnie wartości dla włókien konopnych i celulozowych są bliskie 90°. Wskazuje to na skomplikowaną budowę materiałów pochodzenia naturalnego i na dużą losowość ich cech w zależności od pobranej próbki. Nie można ich jednoznacznie scharakteryzować jako hydrofobowe lub hydrofilowe.



Rys. 12. Wyznaczenie kąta zwilżania próbek włókien konopnych, celulozowych i wełny mineralnej [C4]

Transport wilgoci w materiałach organicznych zależy jest od ich budowy. W pracy [C8] przedstawiłem wyniki badań zdolności transportowej zawilgoconych sorpcyjnie: luźnej wełny mineralnej, włókien celulozowych i wełny drzewnej w zakresie przenoszenia wilgoci w warunkach ustalonych. Badania przeprowadzono w aparacie płytowym HFM, Fox 602, który wytworzył stałe pole termiczne ograniczające próbki materiałów zwilżonych sorpcyjnie. Na podstawie zróżnicowania wyników określono dynamikę transportu wilgoci w materiałach. Jako kryterium oceny powtarzalności charakterystyk materiałów zwilżonych umieszczonych w warunkach ustalonych przyjęto czas stabilizacji pomiaru przewodności cieplnej. Zakładając, że powtarzalność czasu potrzebnego na wykonanie pomiaru przewodności cieplnej jest wskaźnikiem stabilności badania materiału, największą stabilnością charakteryzowała się wełna mineralna, a najniższą włókna celulozowe.

Zakładając, że transport wilgoci w materiale izolacyjnym zmienia jego przewodność cieplną, postanowiłem przeprowadzić obszerne badania w celu zbadania dynamiki tych zmian. Wraz ze wzrostem przepływów wilgoci zwiększała się dynamika zmian przewodności cieplnej

badanych materiałów. Jako kryterium oceny dynamiki zmian przyjąłem kąt nachylenia linii trendu do osi X. Im większy kąt nachylenia, tym większa dynamika zmian, a to oznacza większy przepływ wilgoci. Najmniejsza dynamika zmian występuje dla wełny mineralnej. Z analizy nachylenia linii regresji liniowej można stwierdzić, że w materiałach naturalnych występuje większy ruch wilgoci niż w wełnie mineralnej. Dynamika redukcji przewodności cieplnej w próbkach celulozy i wełny drzewnej umieszczonych w warunkach ustalonych jest kilkukrotnie większa niż w wełnie mineralnej. Oznacza to, że w tych materiałach w podobnym czasie jak w wełnie mineralnej przepływa więcej wilgoci, przez co transport ten jest bardziej intensywny. Z analizy 3D wynika, że w próbkach bardziej nawilżonych transport wilgoci jest większy i szybszy. Im więcej wilgoci zawierały próbki, tym szybsza i większa była redukcja przewodności cieplnej. Może to być dobrym wskazaniem do dalszej analizy buforowania wilgoci w materiałach naturalnych.

Transport wilgoci w materiałach włóknistych może być także napędzany filtracją powietrza. Bilans przepływu wilgoci w materiałach porowatych jest złożony. Zależy od sił napędowych i struktury materiału. Masa może być przenoszona poprzez konwekcję wody, konwekcję pary i dyfuzję pary wodnej. Zwykle jest to kombinacja tych składników, a ich udział w przepływie masowym zależy od postaci wilgoci, jej stężenia i sił napędowych. Filtracja powietrza napędza głównie mechanizm wymiany wilgoci poprzez konwekcję pary wodnej. W pracy [C9] przedstawiono badania wykonane na próbkach luźnej wełny mineralnej oraz luźnej wełny drzewnej poddanych filtracji powietrza. Obydwa badane materiały różnią się formą magazynowania wilgoci. Wełna mineralna może gromadzić wilgoć na powierzchni włókien. Wełna drzewna, jako materiał o większych włóknach, pustych w środku może magazynować wilgoć zarówno we włóknach, jak i na ich powierzchni. W przypadku wełny mineralnej niewielka wilgotność silnie zmniejsza przepuszczalność powietrzną materiału. W wełnie drzewnej nie jest to aż tak widoczne. Różnica w postaci gromadzenia się wilgoci sorpcyjnej w materiale wpływa na jej redystrybucję w wyniku przepływu powietrza. Wełna mineralna osiąga niższą wartość wilgotności sorpcyjnej, ale także łatwiej oddaje wilgoć w wyniku konwekcji w materiale. Te same procesy w wełnie drzewnej trwają znacznie dłużej. W wełnie mineralnej im większa gęstość, tym większy opór przepływającego powietrza, ale jednocześnie większe konwekcyjne usuwanie wilgoci z powierzchni włókien. W wełnie drzewnej im większa gęstość, tym wolniejszy konwekcyjny transport wilgoci w materiale.

Istotnym elementem osiągnięcia są także modele symulacyjne prezentujące zachowanie materiałów pochodzenia naturalnego jako zasypowych izolacji cieplnych w przegrodach szkieletowych poddanych działaniom czynników atmosferycznych [C1, C2, C3, C5, C6, C7]. Modele zostały wykonane w programie Delphin. Wartości współczynników transportowych, np. przewodności cieplnej oraz przepuszczalności powietrznej stosowane w modelach odpowiadają wartościom wyznaczanym laboratoryjnie.

W przypadku analizowanych przeze mnie materiałów wpływ ich zagęszczenia na odporność izolacji cieplnych ma duże znaczenie. Dowodzą tego wyniki symulacji przeprowadzonej dla ścian szkieletowych poddanych filtracji powietrza. W przypadku włókien celulozowych [C2], zagęszczenie włókien np. do gęstości  $70 \text{ kg/m}^3$  znacznie ogranicza straty ciepła wywołane

przepływem powietrza. Zalecenia producentów materiałów izolacyjnych celulozowych dotyczące zagęszczenia materiału wydają się być niewystarczające w kontekście ochrony przed nadmierną konwekcyjną wymianą ciepła. Zalecane są np. gęstość w dachach płaskich i poddaszach nieużytkowych – 27-29 kg/m<sup>3</sup>, w dachach – 40-45 kg/m<sup>3</sup>, a w ścianach 50-55 kg/m<sup>3</sup>. Przy takim zakresie gęstości oddziaływania filtracji powietrza powodują duże straty ciepłne. Podobnie duży wpływ gęstości materiału izolacyjnego na redukcję wartości oporu cieplnego na skutek filtracji powietrza zaobserwowano dla wełny drzewnej [C3].

#### 4.3.7 Podsumowanie

Przeprowadzone badania i analizy wykazują, że materiały pochodzenia naturalnego mogą być wykorzystane jako izolacje cieplne w budownictwie. Charakteryzują się stosunkowo niską przewodnością cieplną, co czyni je konkurencyjnymi w stosunku do najpopularniejszych izolacji (EPS, wełna mineralna) jeśli uwzględnić cenę produktów. Przewodność cieplna zbadanych materiałów zależy od ich gęstości. Dla większości z nich widoczna jest tendencja do obniżania przewodności wraz ze wzrostem zagęszczenia (domykanie porów), jednak po osiągnięciu gęstości krytycznej przewodność cieplna wzrasta (większy udział przewodzenia w składniku stałym). Znikomą zależność przewodności cieplnej od gęstości zaobserwowano w przypadku paździerzy lnianych. Jak wykazano w prezentowanych badaniach, przewodność cieplna materiałów pochodzenia naturalnego silnie zależy od temperatury.

Materiały włókniste w postaci luźnej wymagają zagęszczania podczas tworzenia z nich warstw termoizolacyjnych. Doświadczenie ze ścianą wypełnioną luźną wełną drzewną ujawniło, że materiał osiadł rok po zakończeniu badań. Zalecane przez producentów izolacji wdmuchiowanych niewielkie gęstości nasypowe izolacji mogą okazać się niewystarczające z uwagi na ryzyko komprymacji w czasie.

W przypadku zbadanych materiałów funkcją malejącą jest przepuszczalność powietrzna w zależności od gęstości nasypowej. Na podstawie przebiegu funkcji można oceniać budowę materiału. W przypadku materiałów o miękkich włóknach i dużej zawartości pyłu (celuloza, wełna drzewna) funkcja jest gwałtownie malejąca. Dla materiałów o twardszych włóknach (izolacje konopne, paździerze lniane) przebieg funkcji jest łagodniejszy. Z uwagi na porowatą strukturę izolacji wykonanych z materiałów organicznych w stanie luźnym, przy niskim zagęszczeniu materiału, warstwę izolacji cieplnej należy zabezpieczać przed filtracją powietrza.

Przepuszczalność pary wodnej zbadanych materiałów również zależy od ich gęstości. Im większa gęstość tym mniejsza paroprzepuszczalność. Paździerze lniane wykazały wysoką paroprzepuszczalność nawet przy dużym zagęszczeniu (160 kg/m<sup>3</sup>). Luźna wełna drzewna charakteryzowała się również niewielkim oporem dyfuzyjnym, jest więc materiałem o wysokiej paroprzepuszczalności. Wskazuje to na możliwość aplikacji tych materiałów w konstrukcjach wymagających efektywnego przepływu pary wodnej. Wyniki badań paroprzepuszczalności pozostałych materiałów organicznych omawianych w cyklu nie zostały jeszcze opublikowane.

Materiały pochodzenia organicznego mają naturalną cechę magazynowania wilgoci. Obecność dużych włókien, pustych w środku sprzyja gromadzeniu się w nich wilgoci. Prze-

przebieg wilgoci w materiałach pochodzenia organicznego odbywa się zarówno w porach pomiędzy włóknami, jak i wewnątrz włókien. Powierzchnia analizowanych przeze mnie włókien nie jest gładka ani prosta, co w połączeniu z kapilarną budową zwiększa ich zdolność do akumulowania wilgoci w stosunku do materiałów o mniej chropowatych włóknach, takich jak wełna mineralna. Dzięki temu materiały naturalne osiągają wyższą wilgotność sorpcyjną niż materiały syntetyczne. Wskazują na to opublikowane badania sorpcji celulozy i włókien konopnych w porównaniu z wełną mineralną, ale także niepublikowane dotąd badania sorpcji wełny drzewnej oraz paździerzy lnianych i konopnych. Materiały pochodzenia roślinnego mają zdolność do sorpcyjnego zawilgocenia na poziomie ok. 20% w warunkach 95% wilgotności względnej otoczenia. W przypadku 100% wilgotności otoczenia, celuloza może osiągać wilgotność na poziomie 45%, a wełna drzewna nawet ok. 60%. Odpowiednie wykorzystanie tej zdolności może zapewnić możliwość pasywnego sterowania poziomem wilgoci w pomieszczeniach bez konieczności używania systemów klimatyzacyjnych.

Jednocześnie na skutek termodyfuzji w analizowanych materiałach następuje przepływ wilgoci w kierunku brzegu o niższej temperaturze, co wiąże się ze spadkiem przewodności cieplnej w stosunku do materiału jednorodnie zawilgoconego.

Transport wilgoci w materiałach pochodzenia naturalnego nie jest równomierny i zależy od zawartości wilgoci w materiale. Im bardziej wilgotny materiał, tym szybszy przepływ wilgoci. Obecność powietrza w porach wpływa na prędkość i masę przenikającej wilgoci.

Konwekcyjny przepływ wilgoci spowodowany filtracją powietrza w materiałach organicznych zależy od ich gęstości, zawartości wilgoci i różnicy ciśnienia. Analiza porównawcza transportu wilgoci dla wełny mineralnej i drzewnej wykazuje duże różnice zależne od postaci gromadzenia się wilgoci sorpcyjnej w materiale. Wpływa to na redystrybucję wilgoci w wyniku przepływu powietrza. Wełna mineralna osiąga niższą wartość wilgotności sorpcyjnej, ale także łatwiej oddaje wilgoć w wyniku konwekcji w materiale. Te same procesy w wełnie drzewnej trwają znacznie dłużej. W przypadku wełny mineralnej im większa gęstość, tym większy opór przepływającego powietrza, ale jednocześnie większe konwekcyjne usuwanie wilgoci z powierzchni włókien. W przypadku wełny drzewnej im większa gęstość, tym wolniejszy konwekcyjny transport wilgoci w materiale.

Materiały pochodzenia naturalnego zyskują na popularności. Od kilku lat można zaobserwować coraz większą liczbę publikacji im poświęconych, liczniejsze wystąpienia na konferencjach, coraz częściej pytają o nie inwestorzy.

Aby należycie używać materiałów roślinnych jako izolacji cieplnych, trzeba znać ich właściwości. Współczynniki transportowe zaprezentowane w cyklu publikacji mogą być pomocne przy projektowaniu nowych lub wtórnych izolacji cieplnych wykonanych z materiałów naturalnych. Liczba cytowań artykułów świadczy o tym, że informacje w nich przedstawione mają charakter użyteczny.

## Bibliografia

- [1] Skotniczny P. 2008. *Model przepływu powietrza w ośrodku porowatym z uwzględnieniem wewnętrznych źródeł ciepła*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, tom 10, nr 1-4: 103–113, Kraków.
- [2] Sobieski W., Trykozko A. 2011. *Sensitivity Aspects of Forchheimer's Approximation*, Transport in Porous Media, tom 89:155–164, Springer.
- [3] PN-EN ISO 10456: 2009 *Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno – wilgotnościowe. Tabelaaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych*, Polski Komitet Normalizacyjny.

### **5 Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.**

Od 2013 roku aktywnie uczestniczę w międzynarodowych stażach, konferencjach, wizytach studyjnych, które zaowocowały moim rozwojem naukowym, dydaktycznym, społecznym. Poniżej opisałem współpracę z trzema uczelniami międzynarodowymi i moją aktywność naukową z nimi związaną.

#### **5.1 Josip Juraj Strossmayer University of Osijek (UNIOS), Chorwacja**

Od roku 2015 aktywnie współpracuję z Faculty of Civil Engineering and Architecture, **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek (UNIOS), Chorwacja**. Byłem inicjatorem podpisania umowy o współpracę z tą uczelnią. Od tego czasu współpraca zaowocowała trzema wspólnymi publikacjami:

- Krstić. H., Ostković I., Kosiński P., Wójcik R. 2016. *Validation of neural Network model for predicting airtightness of residential and non-residential units in Poland*. Energy and Buildings 133, 423-432
- Teni M., Krstić. H., Kosiński P. 2019. *Review and Comparison of Current Experimental Approaches for in situ Measurements of Building Walls Thermal Transmittance*. Energy and Buildings 203.
- Attia S., Kurnitski J., Kosiński P., Borodinecs A., Deme Belafi Z., Kistelegdi I., Krstić H., Moldovan M., Visa I., Mihailov N., Evstatiev B., Banionis K., Cekon M., Vilcekova S., Struhala K., Brzon R., Laurent O. 2022. *Overview and future challenges of nearly zero-energy building (nZEB) design in Eastern Europe*. Energy and Buildings 267, 1-17.

W 2017 roku odbyłem tygodniowy pobyt w ramach programu Erasmus+ obejmujący prowadzenie zajęć oraz prace w laboratoriach wydziału.

W roku 2017 recenzowałem artykuły nadsyłane przez studentów na International Summer Conference of Civil Engineering Students ISUCCES 2017 organizowaną przez UNIOS.



W latach 2017-2018 pełniłem funkcję eksperta zagranicznego w projekcie '*Innovative simulation model for determination of heat losses in buildings due to infiltration*' finansowanym przez UNIOS w ramach programu IZIP-2016.

W roku 2018 pełniłem funkcję opiekuna naukowego podczas wizyty w ramach ww. projektu Mihaeli Teni w Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie. Wspólnie przeprowadzaliśmy badania szczelności powietrznej budynków niskoenergetycznych w regionie. Podobnie w roku 2018 gdy Mihaela Teni odbywała wizytę w ramach Erasmus+ w Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie. W roku 2020 byłem ponownie jej opiekunem naukowym podczas stażu w UWM realizowanym w ramach projektu PROM (Międzynarodowa wymiana stypendialna doktorantów i kadry akademickiej) finansowanym przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej.

W roku 2018 wspólnie z naukowcami z UNIOS przygotowałem projekt Twinning (Horyzont 2020), opisany w następnym punkcie.

Od 2018 roku jestem członkiem kolegium redaktorskiego czasopisma *Advances in Civil and Architectural Engineering* (do 2022 pod nazwą *Electronic Journal of Civil Engineering Osijek, e-GFOS*) wydawanego przez UNIOS.

Od 2018 do 2022 r. pełniłem funkcję promotora pomocniczego rozprawy doktorskiej '*Tehnologija energetske obnove vanjskih zidova primjenom naprijeđene temperature metode*' (ang. '*External walls energy renovation technology based on an improved temperature based method*') zakończonej obroną w 2022 r. Autorka rozprawy Mihaela Domazetović (z domu Teni). Praca obroniona w UNIOS, Faculty of Civil Engineering and Architecture. Promotor Prof. Hrvoje Krstić.

Od 2020 roku jestem polskim koordynatorem sieci CEEPUS zarządzanej przez pracownika UNIOS, Prof. Marijana Hadzima-Nyarko, sieć HR-1302 Research and Education of Environmental Risks.

W 2023 roku odbyłem tygodniowy pobyt w UNIOS w ramach współpracy wewnątrz sieci CEEPUS sieć HR-1302 Research and Education of Environmental Risks obejmujący współpracę naukową i dydaktyczną.

## **5.2 Norwegian University of Science and Technology w Trondheim (NTNU), Norwegia**

Od roku 2014 aktywnie współpracuję z Department of Civil and Transport Engineering (przemianowanym później w Department of Civil and Environmental Engineering), **Norwegian University of Science and Technology w Trondheim (NTNU), Norwegia**. Dotychczasowa współpraca zaowocowała moimi licznymi wizytami w tej uczelni oraz wspólnymi wnioskami w międzynarodowych konkursach.

W 2014 roku uczestniczyłem w tygodniowej wizycie przygotowawczej finansowanej przez Fundusz Stypendialny i Szkoleniowy. Celem wizyty było nawiązanie kontaktów i rozpoczęcie współpracy w dziedzinie fizyki budowli.

W 2016 roku uczestniczyłem w dwutygodniowej wizycie studyjnej finansowanej przez Fundusz Stypendialny i Szkoleniowy. Celem wizyty było rozszerzenie współpracy o nowe kontakty i dziedziny, *Building Energy Performance* oraz *Building Information Modelling*. Ta wizyta zapoczątkowała pracę nad trzema wnioskami Twinning, których byłem redaktorem.

W roku 2017 uczestniczyłem w tygodniowej wizycie studyjnej w ramach Funduszu Współpracy Dwustronnej Programu Polsko-Norweska Współpraca Badawcza. Celem tej wizyty była praca nad wnioskiem Twinning.

Złożyliśmy jako konsorcjum z NTNU oraz innymi partnerami trzy wnioski Twinning:

- WIDESPREAD-05-2017-Twinning, *Increase the scientific potential of UWM scientists in whole building performance simulation*, złożony w konsorcjum UWM (koordynator) oraz partnerzy NTNU i University of Liege, Belgia (ULG). Projekt oceniony na 8,5 punktu.
- WIDESPREAD-2018-03, *Increase the scientific potential of UWM and GrAFOS scientists in whole building performance simulation*, złożony w konsorcjum UWM (koordynator) oraz partnerzy NTNU, ULG i Josip Juraj Strossmayer University of Osijek. Projekt oceniony na 9,5 punktu.
- WIDESPREAD-2020-5, *Increase the scientific potential of UWM scientists in whole building performance simulation*, złożony w konsorcjum UWM (koordynator) oraz partnerzy NTNU i ULG. Projekt oceniony na 8,0 punktów.

Projekty nie uzyskały dofinansowania. Niemniej na kanwie współpracy przy tworzeniu wniosków nawiązałem bliższą współpracę z University of Liege, o czym napisane jest w następnym punkcie.

W roku 2022 odbyłem tygodniową wizytę w ramach realizacji projektu Rozwój kompetencji kadry UWM w zakresie edukacji włączającej, dobrego zarządzania i kultury jakości w sektorze edukacji finansowanego przez Fundusz Rozwoju Systemów Edukacji. Poza merytorycznym – dydaktycznym charakterem wizyty rozpoczęliśmy prace nad kolejnym wspólnym wnioskiem na projekt badawczy.

W roku 2022 złożyliśmy wspólny wniosek *Green Transition - towards Climate-neutral buildings in Poland* w ramach Bilateral initiative proposal within EEA Financial Mechanism and Norwegian Financial Mechanism 2014-2021 Bilateral Fund. Wniosek otrzymał 25 punktów, do finansowania zabrakło 0,67 punktu. Byłem redaktorem wniosku.

W roku 2023 sprawowałem funkcję opiekuna Alireza Norouziasas, doktoranta z NTNU, podczas jego stażu w UWM realizowanego w ramach projektu PROM (Międzynarodowa wymiana stypendialna doktorantów i kadry akademickiej) finansowanego przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej.

### 5.3 University of Liege, Belgia

Współpracę z **University of Liege (ULG), Belgia** nawiązałem podczas wspólnego przygotowywania wniosków Twinning.

W latach 2020-2022 zrealizowaliśmy wspólny projekt *Budownictwo zero energetyczne i niskowęglowe* finansowany przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej i Wallonie-Bruxelles International w ramach wymiany bilateralnej naukowców pomiędzy Rzeczpospolitą Polską a Walią-Brukselą (Belgia). Po stronie polskiej byłem kierownikiem i wykonawcą projektu, po stronie belgijskiej Prof. Shady Attia.

W ramach projektu w roku 2021 zrealizowałem dwie tygodniowe mobilności do ULG. W planach były trzy mobilności, niestety z uwagi na sytuację epidemiczną z lat 2020-2021 część zadań musieliśmy zastąpić formą zdalną.

Współpraca zaowocowała czterema wspólnymi publikacjami:

- Kosiński P., Wójcik R., Skoratko D., Attia S. 2021. *An impact of moisture content on the air permeability of the fibrous insulation materials*. Journal of Physics Conference Series 2069(1):012205.
- Rahif R., Fani A., Kosiński P., Attia S. 2021. *Climate Change Sensitive Overheating Assessment in Dwellings: A Case Study in Belgium*. Proceedings of Building Simulation 2021: 17<sup>th</sup> Conference of IBPSA
- Attia S., Kosiński P., Wójcik R., Węglarz A., Koc D., Laurent O. 2021. *Energy efficiency in the Polish residential building stock: A literature review*. Journal of Building Engineering 45(8): 103461
- Attia S., Kurnitski J., Kosiński P., Borodinecs A., Deme Belafi Z., Kistelegdi I., Krstić H., Moldovan M., Visa I., Mihailov N., Evstatiev B., Banionis K., Cekon M., Vilcekova S., Struhala K., Brzon R., Laurent O. 2022. *Overview and future challenges of nearly zero-energy building (nZEB) design in Eastern Europe*. Energy and Buildings 267, 1-17.

W roku 2020 i 2021 merytorycznie wspierałem doktoranta ULG, Mostafa Kazemi oraz stażystę Islam Boukhelkhal w organizowaniu badań polowych i laboratoryjnych właściwości materiałów budowlanych na potrzeby realizacji ich prac doktorskich dotyczących wykorzystania kruszywa odpadowego w budownictwie. W wyniku tej współpracy powstał raport:

- Kazemi M., Boukhelkhal I., Kosiński P., Attia S. *Heat and moisture transfer measurement protocols for building envelopes*. 2021. Technical Report, Sustainable Building Design Lab, ISBN: 978-2-930909-22-6, Liege, Belgium. DOI: 10.13140/RG.2.2.30642.53445

W roku 2020 brałem udział jako zewnętrzny ekspert w projekcie realizowanym w ULG *Impacts of climate change on the indoor environmental and energy performance of buildings in Belgium during summer.*

Od 2021 roku jestem honorowym współpracownikiem uczelni, o czym co roku dostaję listowne powiadomienie wystawiane w imieniu Rektora ULG.

## **6 Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.**

Od 2009 roku byłem lub jestem nauczycielem następujących przedmiotów:

- budownictwo ogólne 1,
- budownictwo ogólne 2,
- budownictwo tradycyjne,
- budownictwo,
- konstrukcje budowlane,
- podstawy konstrukcji budowlanych,
- fizyka budowli,
- fizyka budowli w budownictwie energooszczędnym,
- diagnostyka ciepłno-wilgotnościowa budynków,
- diagnostyka cieplna budowli,
- projektowanie budynków energooszczędnych,
- certyfikacja energetyczna budynków,
- charakterystyka i świadectwa energetyczne budynków,
- bezpieczeństwo budynków i konstrukcji budowlanych,
- energia odnawialna w budownictwie energooszczędnym.

Jestem również koordynatorem większości z wymienionych przedmiotów.

Do dnia 24.06.2024 wypromowałem 92 inżynierów oraz magistrów inżynierów budownictwa.

W roku 2017 byłem koordynatorem studenckiej akcji Workcamp polegającej na remoncie własnymi siłami i przy pozyskanych środkach i materiałach, Ośrodka Wsparcia dla Matek z Małoletnimi Dziećmi i Kobiet w Cięży w Olsztynie. Remont trwał 6 tygodni, a prace wykonała grupa 41 osób, w większości studentów, absolwentów i pracowników budownictwa UWM.

W latach 2010-2011 byłem egzaminatorem kursów na majstra i mistrza budowlanego w projekcie „Fachowiec z tytułem 2” organizowanym przez Warmińsko-Mazurski Zakład Doskonalenia Zawodowego w Olsztynie.

Jestem aktywnym członkiem Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa, w tym od 2008 członkiem zarządu Olsztyńskiego Oddziału tej organizacji. Za działalność uzyskałem odznaczenia Honorową Srebrną Odznaką PZITB oraz Honorową Złotą Odznaką PZITB.

Za działalność naukową i organizacyjną otrzymałem Nagrody Rektora UWM:

- indywidualna II stopnia za osiągnięcia naukowe w roku akademickim 2014/2015,
- indywidualna II stopnia za osiągnięcia organizacyjne w latach akademickich 2016/2017, 2021/2022,
- indywidualna III stopnia za osiągnięcia organizacyjne w roku akademickim 2022/2023,
- za wysoko punktowane publikacje w 2019, 2020, 2021 i 2022 roku.

**7 Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.**

W roku 2010 otrzymałem nagrodę Budimex dla najlepszej pracy dyplomowej za pracę magisterską „Aspekty pomiarowe składników bilansu cieplnego” wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Roberta Wójcika, prof. UWM, obronioną na kierunku budownictwo, Wydział Nauk Technicznych UWM.

Od 2015 roku pełnię funkcję wydziałowego koordynatora programu Erasmus+.

Od 2020 roku pełnię funkcję polskiego koordynatora sieci CEEPUS HR-1302 Research and Education of Environmental Risks.

Od 2020 roku reprezentuję UWM w sieci ERRIN.

.....  
(podpis wnioskodawcy)