

Prof. dr hab. inż. Dawid Taler
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Procesów Ciepłych,
Ochrony Powietrza i Utylizacji Odpadów
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków
tel. 0048 12 628 30 26
e-mail: dawid.taler@pk.edu.pl

Kraków, 15.08.2025 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Wasika
pt. „Rozwój i przykłady zastosowania nierównowagowego modelu wymiany ciepła,
powietrza i wilgoci w porowatych materiałach budowlanych“**

Recenzowana rozprawa o objętości 65 stron składa się z 7 rozdziałów. Na początku rozprawy znajdują się streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń oraz spis treści.

Spis cytowanej literatury zawiera 60 prac. Do rozprawy dołączone zostały 4 artykuły naukowe opublikowane w czasopiśmie znajdujących się w bazie JCR (Journal Citation Reports): Energies – 1 artykuł, Energy – 2 artykuły oraz International Communications in Heat and Mass Transfer – 1 artykuł. Na bazie tych artykułów opracowana została recenzowana rozprawa doktorska.

Promotorem pracy doktorskiej jest dr hab. inż. Piotr Łapka, prof. uczelni.

Przedmiotem rozprawy jest modelowanie komputerowe i badania eksperymentalne procesu osuszania ścian budynków. W rozprawie zaproponowany został oryginalny nierównowagowy model wymiany ciepła i wilgoci w porowatych materiałach budowlanych. Model nierównowagowy transportu ciepła, powietrza i wilgoci w materiale budowlanym uwzględnia transport powietrza przez ośrodek porowaty oraz nierównowagę pomiędzy wilgocią ciekłą oraz parą wodną. Model ten może być dokładniejszy od modelu równowagowego w obszarze, w którym występują duże gradienty temperatury i wilgotności, np. w pobliżu powierzchni ściany, z której następuje odparowanie. Wyniki modelowania komputerowego porównane zostały z wynikami pomiarów przeprowadzonych na stanowisku pomiarowym zbudowanym przez mgr inż. Michała Wasika.

Tematyka rozprawy jest ważna oraz aktualna i może stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej. Recenzowana rozprawa ma także znaczenie praktyczne.

1. Charakterystyka rozprawy

Rozdział pierwszy stanowi wstęp. Podkreślono, że nadmierne zawilgocenie ścian budynków może prowadzić do pojawienia się mikroorganizmów, co jest szkodliwe dla zdrowia

mieszkańców tych budynków. Problemy związane z nadmierną obecnością wilgoci w ścianach budynków mogą występować zarówno w starych, jak i w nowych budynkach. Przyczynami gromadzenia się wilgoci w ośrodkach porowatych, takich jak ściany zewnętrzne oraz przegrody wewnętrzne mogą być następujące:

- kondensacja pary z powietrza, która może zachodzić na powierzchni ściany słabo izolowanej cieplnie lub zachodzić z powodu wysokiej wilgotności powietrza w pomieszczeniu,
- wilgoć przenikająca z gruntu ze względu na brak właściwej hydroizolacji,
- podciąganie kapilarne spowodowane niewłaściwą izolacją wilgotnościową fundamentu; woda z gruntu może przedostawać się do porowatych ścian i poprzez siły kapilarne może być transportowana powyżej powierzchni gruntu,
- awarie i przecieki przez rury i rynny doprowadzające lub odprowadzające wodę; również nieszczelności w dachu budynku lub w elewacji zewnętrznej mogą prowadzić do zawilgocenia ścian,
- gwałtowne i ulewne deszcze w połączeniu z silnym wiatrem mogą doprowadzić do przedostania się wody przez zewnętrzne warstwy wodoodporne do wnętrza przegrody,
- wilgoć reszkowa; problem ten dotyczy zarówno budynków nowych, jak i budynków po renowacji; wilgoć reszkowa związana jest z wodą technologiczną zawartą w nowych materiałach budowlanych lub z wodą zgromadzoną podczas prac budowlanych i remontowych.

Sposób usuwania wilgoci z zawilgoconej ściany zależy głównie od źródła wilgoci i od mechanizmu procesu zawilgocenia ściany.

Paragraf 1.2 zawiera przegląd literatury.

W punkcie 1.2.1 opisane zostały pośrednie i bezpośrednie metody osuszania budynków.

W metodach pośrednich stosuje się ogrzewanie i osuszanie powietrza oraz zwiększa się krotność wymiany powietrza w celu intensyfikacji wymiany ciepła pomiędzy powierzchnią ściany a otaczającym powietrzem.

W metodach bezpośrednich oddziałuje się na ścianę i zawartą w niej wilgoć, np. stosuje się ogrzewanie ściany zdalne lub bezpośrednio w celu usunięcia wilgoci. Opisane są między innymi badania przeprowadzone przez profesora Łapkę i jego zespół na murkach testowych wykonanych z czerwonej cegły i zaprawy cementowo-wapiennej. Do osuszania murków zastosowane zostały nagrzewane sondy osuszające oraz zostało zastosowano przepływające powietrze.

Modelowanie wymiany ciepła i wilgoci w materiałach budowlanych omówione zostało w punkcie 1.2.2.

Jednym z najpopularniejszych modeli transportu ciepła i wilgoci w materiałach budowlanych jest model Künzela o parametrach rozłożonych z 1995 roku. Model ten bazuje na równaniu zachowania masy sformułowanym dla wilgoci i równaniu zachowania energii. W wyniku rozwiązania tych równań otrzymuje się rozkład temperatury i wilgotności względnej w analizowanym ośrodku.

Drugi popularny model transportu powietrza, wilgoci i ciepła w porowatym materiale budowlanym opracowany został w ramach projektu europejskiego o akronimie HAMSTAD. Jest to model o parametrach rozłożonych opisany równaniami cząstkowymi obejmującymi: równanie zachowania masy wilgoci, równanie zachowania masy powietrza wilgotnego oraz równanie zachowania energii.

Na bazie obydwu tych modeli, Künzela oraz modelu opracowanego w projekcie HAMSTAD, powstały następne ulepszone modele równowagowe. Pierwsze modele nierównowagowe opracowane zostały przez N. Reuge i innych w latach 2020-2023.

W modelach nierównowagowych uwzględnia się nieustalony proces przemiany cieczy w parę i na odwrót. W modelu nierównowagowym oprócz równania zachowania energii

uwzględnia się dwa równania, transportu pary wodnej i wilgoci ciekłej, sprzężone członem źródłowym opisującym strumień wilgoci zmieniający fazę.

Analiza literatury związanej z tematyką rozprawy przeprowadzona została w punkcie 1.2.3. Układy cząstkowych równań różniczkowych stosowane w modelowaniu matematycznym transportu wilgoci i ciepła w materiałach budowlanych zestawione zostały w Tablicy 1.

Z przeglądu dotychczas opublikowanych prac wynika, że modelowanie transportu wilgoci i ciepła w materiałach budowlanych bazuje głównie na modelach równowagowych, w szczególności na modelu Künzela i jego modyfikacjach. Ponadto, brakuje badań wpływu temperatury i wilgotności powietrza osuszającego na przebieg procesu suszenia materiałów budowlanych. Brakuje również porównania różnych strategii suszenia, np. porównania przebiegu procesu suszenia przy różnych zmianach w czasie temperatury powietrza osuszającego. Oryginalne elementy rozprawy doktorskiej zostały wyszczególnione i krótko omówione w punkcie 1.3.

Przedmiotem rozdziału drugiego jest cel i zakres pracy. Cel pracy sformułowany został następująco: „Celem pracy jest sformułowanie nierównowagowego modelu wymiany ciepła i wilgoci w materiałach budowlanych oraz zastosowanie tego modelu do analizy energochłonności procesu osuszania ścian”. Zakres pracy doktorskiej mgr inż. Michała Wasika obejmuje: wybór modelu geometrycznego analizowanego fragmentu ściany i siatki obliczeniowej fragmentu ściany oraz opracowanie modelu numerycznego w programie ANSYS Fluent, przeprowadzenie analizy procesu osuszania dla różnych temperatur prowadzenia procesu z przedziału 20-60°C oraz różnych zawartości wilgoci w powietrzu dla odpowiednich pór roku w Polsce a także zaproponowanie nowych warunków prowadzenia procesu, tak aby zmniejszyć energochłonność procesu osuszania ścian.

Rozdział 3 rozprawy przygotowany został na podstawie artykułu „Analysis of non-equilibrium and equilibrium models of heat and moisture transfer in a wet porous building material”. Artykuł opublikowany został w czasopiśmie międzynarodowym *Energies*, a udział mgr inż. Michała Wasika w przygotowaniu tego artykułu wynosi 40%.

W artykule sformułowany został nierównowagowy model wymiany ciepła i wilgoci w porowatym materiale budowlanym. Następnie przeprowadzone zostały symulacje za pomocą programu ANSYS Fluent przy wykorzystaniu funkcji użytkownika, takich jak: User-Defined Function (UDF), User-Defined Scalar (UDS) i User-Defined Memory (UDM). Oprogramowanie posłużyło więc jako platforma do tworzenia geometrii, siatki obliczeniowej oraz rozwiązywania własnych zaimplementowanych równań transportowych. Implementacja modelu wymagała utworzenia plików zawierających funkcję i zmienne napisane w języku programowania C. Kandydat przeprowadził symulacje procesu suszenia materiału budowlanego. Otrzymane wyniki porównał z wynikami otrzymanymi za pomocą dwóch modeli równowagowych. Do weryfikacji przeprowadzonych symulacji komputerowych zostały wykorzystane dane prezentowane w rozprawie doktorskiej van Belleghema obronionej w 2013 roku na Uniwersytecie Ghent w Belgii.

Przedmiotem rozdziału czwartego jest omówienie artykułu „Analysis of seasonal energy consumption during drying of highly saturated moist masonry walls in Polish climatic conditions”, opublikowanego w czasopiśmie *Energy*. Udział mgr inż. Michała Wasika w przygotowaniu tego artykułu wynosi 85%.

Kandydat zastosował wcześniej opracowany przez Niego model transportu ciepła i wilgoci do przeprowadzenia symulacji procesu osuszania fragmentu ściany. Model przetestowany został na danych literaturowych. Kandydat zmodyfikował także warunki brzegowe, aby wyeliminować z poprzedniego modelu gwałtowne zakończenie procesu parowania na powierzchni materiału. W czasie przygotowywania artykułu Kandydat nie dysponował własnymi danymi eksperymentalnymi umożliwiającymi weryfikację wyników symulacji komputerowej, jednak model został wcześniej zweryfikowany za pomocą modelu równowagowego przedstawionego w artykule I oraz porównany z danymi

eksperymentalnymi, przedstawionymi we wspomnianej już wcześniej pracy doktorskiej van Belleghema. Modelowane było osuszanie fragmentu ściany za pomocą ciepłego powietrza przepływającego przez otwory wywiercone w ścianie. Przyjęto, że modelowany fragment muru ma kontakt z gruntem, z którego woda przenika do wnętrza muru.

W rozdziale 5 omówiony został trzeci artykuł pt. „Numerical analysis on the energy efficiency improvement of thermo-injection method of masonry walls drying by applying the variable temperature profiles of drying air”. Jest on częścią recenzowanej pracy doktorskiej. Artykuł III opublikowany został w czasopiśmie Energy, a udział Kandydata w jego opracowaniu wynosi 85%.

Kandydat przeprowadził modelowanie komputerowe osuszania fragmentu ściany poprzez zastosowanie zmiennej w czasie temperatury powietrza osuszającego. Kandydat zaproponował trzy sposoby osuszania porowatego materiału budowlanego:

- strategia dwupoziomowa – początkowo osuszanie jest prowadzone przy niskiej temperaturze powietrza suszącego (20°C), a następnie, po upływie pewnego przedziału czasu temperatura powietrza wzrasta do 60°C ,
- strategia schodkowa – początkowa temperatura powietrza wynosi 20°C , po upływie pewnego przedziału czasu temperatura wzrasta o 10K , aż do osiągnięcia temperatury 60°C ,
- wielokrotna strategia dwupoziomowa – początkowo temperatura powietrza wynosi 20°C . Po upływie pewnego przedziału czasu temperatura wzrasta do 60°C . Następnie po upływie kolejnego takiego samego przedziału czasu temperatura powietrza obniżana jest do wartości 20°C . Opisany sposób zmiany temperatury powietrza suszącego jest wielokrotnie powtarzany.

W przypadku każdej strategii przyjęto trzy długości przedziału czasowego – 12, 24 i 48 godzin. Wyniki symulacji komputerowej procesu suszenia materiału przy opisanych wyżej sposobach zmiany temperatury powietrza suszącego w czasie porównane zostały z wynikami suszenia próbki materiału budowlanego przy stałej temperaturze powietrza wynoszącej 60°C . Przeprowadzone symulacje pokazały, że zastosowanie zmiennej w czasie temperatury powietrza suszącego może poprawić efektywność energetyczną procesu suszenia ścian budynków.

W rozdziale szóstym streszczony jest czwarty artykuł pt. „Credibility assessment of a new heat, air, and moisture transfer model with hygric non-equilibrium for drying of porous building materials”, stanowiący część pracy doktorskiej. Udział mgr inż. Michała Wasika w tym artykule, opublikowanym w International Communications in Heat and Mass Transfer, wynosi 85%. W tym artykule został udoskonalony model matematyczny prezentowany we wcześniejszych artykułach. Kandydat dodał równanie zachowania masy dla powietrza i zmienił sposób modelowania transportu kapilarnego oraz ujednolicił model zmiany fazy. Zaprojektował i wykonał stanowisko doświadczalne, które umożliwiło przeprowadzenie walidacji zaproponowanego modelu komputerowego.

Udoskonalony, nierównowagowy model transportu ciepła i wilgoci w materiałach budowlanych został zwalidowany z wykorzystaniem zbudowanego stanowiska badawczego. Wyniki symulacji dobrze odwzorowują zmierzony przebieg temperatury w pierwszym etapie procesu suszenia. Po około 12 godzinach suszenia zgodność obliczonych i zmierzonych temperatur próbki nie jest już tak dobra jak w początkowej fazie suszenia.

2. Charakterystyka najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych przedstawionych w rozprawie

Do najważniejszych osiągnięć naukowych mgr inż. Michała Wasika można zaliczyć:

- oryginalny model nierównowagowy transportu ciepła i wilgoci w porowatych materiałach budowlanych. Zaproponowany w rozprawie model wymiany ciepła, powietrza i wilgoci w materiale budowlanym uwzględnia transport powietrza przez ośrodek porowaty a także uwzględnia nierównowagę pomiędzy wilgocią ciekłą oraz parą wodną. Modele wykorzystane do tej pory w celu symulacji procesu osuszania zakładały równowagę pomiędzy fazami wilgoci oraz pomijały transport powietrza,
- walidację zaproponowanego nierównowagowego modelu suszenia porowatych materiałów budowlanych na autorskim stanowisku eksperymentalnym,
- wykorzystanie opracowanego modelu nierównowagowego do przeprowadzenia symulacji numerycznych procesu osuszania ściany. Model numeryczny wykorzystany został do poprawy efektywności energetycznej procesu poprzez zmianę parametrów powietrza użytego do osuszania ściany,
- zastosowanie opracowanego modelu matematycznego suszenia materiału porowatego do analizy przebiegu procesu suszenia ściany budynku i jego energochłonności. W literaturze brak jest prac związanych z porównaniem metod prowadzenia procesu ze stałą lub zmienną w czasie temperaturą powietrza suszącego, przepływającego przez otwory w ścianie,
- ocenę wpływu sposobu zmian temperatury powietrza suszącego w funkcji czasu na energochłonność osuszania porowatego materiału budowlanego bez konieczności przeprowadzania kosztownych i czasochłonnych prac eksperymentalnych.

3. Uwagi krytyczne

Pomimo pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej Kandydata mam również pewne uwagi krytyczne.

1. Na stronie 16 Autor pisze:

„Transport powietrza uwzględniony jest w modelu opracowanym w ramach projektu HAMSTAD, ale jest ograniczony do statycznego przepływu, bez uwzględnienia akumulacji w porach.”

Co Autor rozumie pod pojęciem przepływu statycznego ?

Czy przepływ statyczny i stacjonarny oznaczają to samo ?

2. We wzorach (34), (37) i (60) uwzględniona jest radiacyjna wymiana ciepła między powierzchnią próbki i otoczeniem. We wzorach (34) i (37) przed członem $(1/\varepsilon_{amb})$ powinien być znak „+”. Radiacyjna składowa gęstości strumienia ciepła na powierzchni próbki obliczana jest za pomocą wzoru

$$\dot{q}_{w,rad} = \frac{\dot{Q}_{amb,rad-w}}{A_w} = \frac{\sigma(T_{amb,rad}^4 - T_w^4)}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_{amb}} - 1}$$

który jest szczególnym przypadkiem wzoru Christiansena, dla przypadku gdy powierzchnie wymieniające ciepło są płaskie i równoległe oraz nieskończenie duże.

Przyjmując, że próbka o polu powierzchni A_w wymieniającą ciepło z otoczeniem (np. ścianami pomieszczenia) o polu powierzchni $A_{amb,rad}$, gęstość strumienia ciepła $\dot{q}_w$ na powierzchni próbki, można obliczyć za pomocą wzoru Christiansena

$$\dot{q}_{w,rad} = \frac{\dot{Q}_{amb,rad-w}}{A_w} = \frac{\sigma(T_{amb,rad}^4 - T_w^4)}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{amb}} - 1\right) \frac{A_w}{A_{amb}}}$$

gdzie: ε_w -emisyjność powierzchni próbki, ε_{amb} -emisyjność otoczenia próbki, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$ – stała Stefana-Boltzmannna.

Uwzględniając, że pole powierzchni próbki A_w jest znacznie mniejsze od pola powierzchni otoczenia A_{amb} , tj. $\frac{A_w}{A_{amb}} \rightarrow 0$, ostatni wzór upraszcza się do postaci

$$\dot{q}_{w,rad} = \frac{\dot{Q}_{amb,rad-w}}{A_w} = \varepsilon_w \sigma (T_{amb,rad}^4 - T_w^4)$$

Ten przedostatni lub ostatni (uproszczony) wzór powinny być stosowane we wzorach (34), (37) i (60) do obliczania radiacyjnej składowej gęstości strumienia ciepła na powierzchni próbki. Ponadto należy zwrócić uwagę, że przy obliczaniu konwekcyjnej i radiacyjnej składowej gęstości strumienia ciepła temperatury otoczenia są różne. We wzorze (60) powinno być $T_{amb,rad}^4$ zamiast T_{amb}^4 . We wzorze (60) symbol T_{amb} oznacza bowiem średnio-masową temperaturę płynu wykorzystywaną do obliczania konwekcyjnej składowej gęstości strumienia ciepła, a symbol $T_{amb,rad}$ temperaturę otoczenia, z którym powierzchnia próbki wymienia ciepło na drodze promieniowania. W przypadku przezroczystego otoczenia, np. powietrza, może to być temperatura powierzchni ścian w pomieszczeniu, w którym znajduje się próbka.

Zauważone usterki nie zmniejszają merytorycznej wartości rozprawy. Mogą być poprawione w przyszłych publikacjach.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Wasika spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim (art.187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. z 2024 r. poz. 1571).

Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój metod numerycznego modelowania transportu ciepła i wilgoci w budowlanych materiałach porowatych. Oryginalny dorobek doktoranta stanowi również stanowisko laboratoryjne do badań eksperymentalnych wymiany ciepła i masy w ośrodkach porowatych oraz zaproponowane technologie suszenia zawilgoconych ścian budynków podgrzanym powietrzem o temperaturze zmieniającej się w czasie.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Michała Wasika do publicznej obrony swojej rozprawy i o nadanie Mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Stawiam również wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Wasika.

David Faler