

Dr hab. inż. Marian Hopkowicz, prof. PK
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska
Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza

Kraków 29.03. 2016r

Administracja
Wydziału Inżynierii Środowiska
30 MAR. 2016
Wpłynęło dn.
Nr. 643 szt.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa WĄSA

pt. „Wpływ konstrukcji ściany lekkiej szkieletowej na zjawiska ciepło-
wilgotnościowe w budynku pasywnym”

Promotor: dr hab. inż. Jan RADON, prof. UR

1. Podstawa opracowania recenzji.

Recenzję opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej prof. dr hab. inż. Elżbiety NACHLIK, zgodnie z uchwałą Rady Wydziału z dnia 16.12. 2015r.

2. Ogólna charakterystyka pracy.

Praca doktorska „Wpływ konstrukcji ściany lekkiej szkieletowej na zjawiska ciepło-wilgotnościowe w budynku pasywnym” zawiera 145 stron maszynopisu, spośród których 8 stron zajmują: spis treści, spis rysunków i tabel. Zajmujący 13 stron wykaz cytowanej literatury obejmuje 152 pozycje, spośród których większość stanowią publikacje obcojęzyczne, głównie opracowane w języku angielskim i niemieckim. Wśród cytowanych pozycji ponad jedną trzecią stanowią artykuły naukowe opublikowane w zagranicznych i polskich czasopismach naukowych. Powołania bibliograficzne odnoszą się również do: kilku doktoratów, 45 monografii i książek oraz 20 publikacji w materiałach konferencyjnych i opisów programów komputerowych. Tekst pracy podzielono na 7 rozdziałów. Część wstępna pracy obejmuje: wprowadzenie, omówienie stanu wiedzy w zakresie budownictwa pasywnego oraz zjawisk ciepło-wilgotnościowych w przegrodach. Część badawcza zawiera opis budynku pasywnego przyjętego do badań, omówienie metody i zakresu przeprowadzonych badań eksperymentalnych w budynku o konstrukcji lekkiej oraz sposobu gromadzenia i przygotowania do opracowania ich wyników. Następnie omówiono założenia, model obliczeniowy i narzędzie do analizy przebiegu zjawisk ciepło-wilgotnościowych w postaci programu WUFI@plus, sposób przygotowania i przeprowadzenia symulacji tych procesów dla warunków odpowiadających występującym podczas pomiarów. W części końcowej pracy wyznaczono statystyczne miary błędów dla oceny zgodności uzyskanych rezultatów obliczeń symulacyjnych z wynikami pomiarów, pod kątem przydatności użytego narzędzia komputerowego do przewidywania przebiegu procesów w przegrodach. Wykonano także tzw. obliczenia uogólniające, które służyły analizie zachowania się przegród o identycznej konstrukcji jak w badanym budynku, lecz w odniesieniu do obiektu znajdującego się w innych warunkach klimatycznych (Portugalii i Norwegii). Ostatecznie przeprowadzono analizę wyników pomiarów i obliczeń 8 badanych rozwiązań konstrukcji przegrody. Analiza ta obejmowała ocenę dokładności symulacji względem pomiarów, wyznaczenie korelacji przebiegów czasowych temperatury i zawartości

wilgoci uzyskanych w pomiarach i symulacjach prowadzonych dla analogicznych warunków brzegowych oraz ustalenie maksymalnych wielkości zawilgocenia materiału przegrody w procesach wewnątrzwarstwowej kondensacji pary wodnej, w celu oceny zagrożeń związanych z rozwojem pleśni.

Tematyka badań podjętych w pracy należy do dyscypliny „inżynieria środowiska” oraz w pewnym zakresie mieści się w problematyce rozwijanej w ramach ciepłej fizyki budowli. Głównym celem modelowania procesów wymiany ciepła i transportu wilgoci w analizowanych lekkich przegrodach była ocena stanu wilgotnościowego warstw tworzących przegrodę pod kątem zagrożeń spowodowanych możliwością rozwoju pleśni.

Chociaż powołania literaturowe w pracy są bardzo liczne, między innymi szereg fragmentów pracy zawiera odniesienia do wyników badań uzyskanych w ramach projektu Międzynarodowej Agencji Energii IEA – ECBCS Annex 41 – „Whole building heat, air and moisture response”, to zaprezentowane w pracy omówienie stanu badań przegród budowlanych jest dosyć skromne (str. 34 i 35 pracy).

3. Problematyka badań i cele naukowe pracy

Problemem naukowym podjętym w pracy jest według jej Autora znalezienie zależności pomiędzy budową lekkich przegród o przyjętym typie konstrukcyjnym, a przebiegiem zjawisk ciepłno-wilgotnościowych w nich zachodzących, w przekroju całego roku. Tak sformułowane zadanie jest bardzo wartościowe z naukowego i aplikacyjnego punktu widzenia, gdyż najczęściej projektanci przegród opracowujący ich konstrukcję biorą pod uwagę tylko sytuacje odpowiadające pełnym obciążeniom hydrotermicznym, pochodzącym od środowiska zewnętrznego i wewnętrznego. Przyjęte przez Doktoranta założenie, że procesy te będą obserwowane w warunkach rzeczywistych zmian klimatu zewnętrznego oraz przy normalnej eksploatacji budynku mieszkalnego, posiadającego przegrody o badanej konstrukcji stanowi ważny punkt wyjściowy dla podjętych badań. Do rozwiązania tak sformułowanego problemu mgr inż. Krzysztof Wąs stosuje eksperymentalno-analityczną metodę badań, uznając, że długoterminowe, badania stanu przegród, tj. rozkładów temperatury i wilgotności w nich występujących, pozwolą uzyskać dane, które można będzie później użyć do symulacji przebiegu tych procesów stosując odpowiednie narzędzia analityczne. Oczekiwano, że symulacje takie realizowane przy użyciu zaawansowanego modelu matematyczno-fizycznego niestacjonarnej wymiany ciepła i ruchu wilgoci, traktowanych jako procesy sprzężone, pozwolą na precyzyjne przewidywanie przebiegu zmian warunków ciepłno-wilgotnościowych w przegrodach, jako odpowiedzi na wymuszenia klimatu zewnętrznego i warunki wewnętrzne występujące w tzw. budynkach pasywnych.

Tylko wysoko wyspecjalizowane narzędzia obliczeniowe, dedykowane modelowaniu mikroklimatu w budynkach, pozwalają na analizę przepływu ciepła i wilgoci przy uwzględnieniu sprzężenia tych procesów oraz umożliwiają modelowanie dyfuzji pary wodnej i ruchu wody w przegrodzie, która może przechodzić z jednego stanu skupienia w drugi. Niektóre z nich pozwalają także na uwzględnienie szeregu innych wymuszeń dla ruchu wilgoci takich jak: wspomagany wiatrem ruch wilgoci, penetracja wody opadowej, zawilgocenie wstępne przegród, sorpcja i desorpcja oraz magazynowanie wilgoci (buforowanie) w warstwach pokrycia przegród i wyposażenia pomieszczeń. Posiadają też często bloki obliczeniowe, które dają możliwość ilościowej oceny konsekwencji związanych z wykraplaniem się wilgoci i jej tolerancją pod względem rozwoju pleśni, korozji oraz zniszczeń związanych z zamarzaniem wykroplonej wilgoci. Do grupy kilku takich, najpowszechniej używanych w Europie

programów należy WUFI®plus. Chociaż przy użyciu tego programu, opracowanego w Instytucie Fizyki Budowli Fraunhofera (Niemcy), można obliczać parametry klimatu wewnętrznego na podstawie chwilowych bilansów ciepła i wilgoci, to jednak prawdopodobnie z uwagi na znaczne trudności w ocenie wszystkich wielkości potrzebnych do przeprowadzenia takich symulacji, w pracy przyjęto, że procesy w przegrodach będą analizowane przy założeniu „sztywno” zadanych warunków brzegowych, opisywanych przez temperaturę i wilgotność powietrza wewnętrznego. Przyjęcie takiego założenia dla obliczeń symulacyjnych było możliwe gdyż dostępne były dane, potrzebne do postawienia w taki sposób warunku brzegowego w wyróżnionych strefach budynku. Można było także w oparciu o pozyskane w eksperymencie dane korelować wyniki pomiarów temperatury i wilgotności w przekrojach przegród z kształtującymi je parametrami powietrza wewnętrznego i klimatu zewnętrznego. Symulacje prowadzone przy narzuconych w ten sposób warunkach brzegowych nie wymagały bilansowania stref. Z drugiej strony jednak podejście takie spowodowało, że obiecywana w tytule pracy „ocena wpływu konstrukcji ściany na zjawiska ciepłno-wilgotnościowe w budynku pasywnym” została w znacznej mierze zawężona do „oceny wpływu konstrukcji przegrody na zjawiska ciepłno-wilgotnościowe w niej zachodzące”. Nic nie ujmując znaczeniu procesów dyfuzji pary wodnej do środowiska zewnętrznego przez przegrodę i uwalniania wilgoci skondensowanej w przegrodzie do wnętrza budynku, trzeba podkreślić, że kształtującą się samoistnie wilgotność równowagowa wnętrza budynku w znacznie większym stopniu jest zdeterminowana przez inne czynniki. Należy do nich wentylacyjna wymiana powietrza, działanie systemu ogrzewania, procesy absorpcji i desorpcji wilgoci zmagazynowanej w materiałach wykończeniowych przegród i wyposażenia oraz obecność innych, poza badaną przegrodą powierzchni, które mają niższą niż ona temperaturę powierzchni.

Przeprowadzone w pracy modelowanie procesów ciepłno-wilgotnościowych przebiegających w przegrodach budynku prowadzone w oparciu o zaczerpnięte z pomiarów parametry klimatu wewnętrznego w wydzielonych strefach budynku (parteru, piętra oraz łazienki na piętrze) jest adekwatne pod warunkiem jednoczesnego występowania całego zestawu innych warunków w badanym obiekcie, które miały miejsce w czasie pomiarów. Jak zaznaczyłem wcześniej nie wszystkie z nich zostały w pełni rozpoznane - np. krotność wymian powietrza. Można, z uwagi na długotrwałość pomiarów, uznać otrzymane rezultaty za reprezentatywne dla przyjętej kategorii budynku i sposobu jego użytkowania. Przy takim założeniu uzyskane oceny ilościowe dla badanego budynku można odnosić również do innych obiektów, należących do kategorii „budynków pasywnych” o podobnych cechach.

4. Ocena merytoryczna rozprawy.

Pozytywnie oceniam zaprezentowane w rozprawie doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Wąsa oryginalne rozwiązanie problemu przewidywania zakresu zmian warunków ciepłno-wilgotnościowych w ścianach lekkich szkieletowych budynków pasywnych, występujących w cyklu całorocznej eksploatacji obiektu. Wybrany do analiz model obliczeniowy i narzędzie komputerowe zostały wykorzystane do symulacji stanu higrotermicznego przegród z wykorzystaniem obszernego zestawu danych doświadczalnych uzyskanych w pomiarach, przy zmiennych parametrach klimatu zewnętrznego i w naturalnych warunkach eksploatacji jednorodzinного budynku mieszkalnego, wykonanego w standardzie obiektu pasywnego. Pozwoliło to na ocenę zakresu zagrożeń spowodowanych zawilgoceniem przegród oraz powiązanie ich występowania z cechami konstrukcyjnymi ośmiu badanych przegród w postaci lekkich ścian zewnętrznych. Zróżnicowana budowa badanych przegród, posiadających odmienne rodzaje paroizolacji, izolacji termicznej i elementów usztywniających znalazła swe

odbicie w wynikach pomiarów i symulacji stanu cieplno-wilgotnościowego. Dało to podstawę do sformułowania szeregu wartościowych wniosków jak np. stwierdzenia, że przegrody posiadające izolację termiczną w postaci warstwy styropianu o znacznej grubości i co z tym jest związane o dużym oporze dyfuzyjnym, powinny być wyposażane w izolację przeciwwilgociową o zmiennym oporze dyfuzyjnym, stwarzającą korzystniejsze warunki do wysychania przegrody do wnętrza budynku. Jednak i od tej reguły zostały w badaniach zaobserwowane odstępstwa. Dotyczyły one ściany pomieszczenia o znacznie podwyższonej okresowo wilgotności, tj. łazienki na piętrze. W takim przypadku korzystniejszy stan wilgotnościowy wykazywała przegroda z tradycyjną folią przeciwwilgociową, o stałym oporze dyfuzyjnym. Ten przykład pokazuje jak złożony jest charakter wpływu różnych czynników na procesy determinujące ruch wilgoci i wymianę ciepła oraz obrazuje stopień złożoności zadania jakim jest projektowanie przegród. Potwierdza to zarazem konieczność prowadzenia szczegółowych badań przy użyciu zaawansowanych narzędzi, zwłaszcza w odniesieniu do specyficznych typów przegród, jakimi są ściany budynków pasywnych i energooszczędnych.

Złożoność procesów i wielka liczba warunkujących ich przebieg czynników wymagała zawarcia w tekście pracy szerszego odniesienia się do przyjętych dla potrzeb symulacji założeń. Brak jest w pracy opisu jakie warunki brzegowe były przyjmowane dla chwili początkowej, gdy rozpoczynana była symulacja procesów wymiany ciepła i ruchu wilgoci w badanej przegrodzie. Szkoda, że wyniki pomiarów i modelowania przy użyciu programu WUFI@plus nie zostały porównane z rezultatami uzyskanymi przy użyciu innych, uproszczonych modeli i narzędzi obliczeniowych, które być może nie dawałyby znacząco gorszych wyników.

5. Uwagi krytyczne i wątpliwości.

W trakcie formułowania oceny zastosowanego sposobu rozwiązania sformułowanego problemu naukowego nasunęły mi się następujące uwagi krytyczne i wątpliwości:

- a. Odwzorowanie wszystkich, istotnych czynników przy modelowaniu procesów wymiany ciepła i ruchu wilgoci w przegrodach w sposób ścisły jest praktycznie niemożliwe. Brak jest w pracy odniesienia się do tego, czy właściwości termowilgotnościowe materiałów przegród, zaczerpnięte z bazy danych programu WUFI@plus, były w pełni zgodne z właściwościami materiałów faktycznie użytych do budowy przegród dla budynku w Boruszowicach.
- b. Ustalenie parametrów powietrza wewnętrznego (temperatury, wilgotności), reprezentatywnych dla wyróżnionej strefy, obejmującej różne pomieszczenia i badane przegrody oparto na wynikach pomiarów termohigrometrem, prowadzonych w jednym punkcie. Dla parteru np. taki pomiar miał miejsce w kuchni tworzącej wspólną przestrzeń z salonem, oraz z przegrodą zewnętrzną D2. Tymczasem pozostałe badane w tej strefie przegrody: D1 i D6 stanowiły ściany zewnętrzne w innych pomieszczeniach (wc, gabinet). Czy i pod jakimi warunkami można uznać parametry powietrza zmierzone w jednym pomieszczeniu za reprezentatywne także dla innych, sąsiednich pomieszczeń?
- c. Brak idealnego mieszania powietrza wewnętrznego, wpływ konwekcyjnych ruchów powietrza oraz transport wilgoci w kierunku innych chłodnych powierzchni, poza ścianami, mógł spowodować odstępstwa przyjętych dla symulacji warunków brzegowych od rzeczywistych, przy których badane procesy

przebiegały w czasie pomiarów. Czym wytłumaczyć występującą pomimo tego bardzo dobrą zgodność wyników symulacji i pomiarów (+/- 5% dla wilgotności)?

- d. Autor nie opisał w jaki sposób powiązał warunki początkowe panujące w przegrodzie z odpowiednimi warunkami brzegowymi, dla momentu rozpoczęcia symulacji. Czy przypisał warunkom początkowym panującym w przegrodzie aktualne, w sensie czasowym, warunki brzegowe, czy też np. warunki brzegowe z wcześniejszego kroku czasowego?
- e. Czy można było korygować w ramach symulacji przy użyciu WUFI@plus, lokalne, odniesione do danej przegrody różnice wpływające na warunki wymiany ciepła na powierzchni zewnętrznej? Chodzi między innymi o różnice spowodowane np. osłabieniem wpływu nasłonecznienia w wyniku zacieniania przegrody przez krzewy itp.
- f. Czy rzeczywiście wystarczające jest typowe, statystyczne opracowanie porównania wyników symulacji oraz pomiarów, jako wielkości zmiennych w czasie? Moim zdaniem obliczone, korzystne miary dopasowania uzyskane z użyciem programu Statistica 10 nie usuwają wątpliwości, czy nie dochodzi do przypadkowego znoszenia się błędów częściowych. Analiza wrażliwości, potrzebę przeprowadzenia której Autor poddał w wątpliwość, wskazałaby istotność najważniejszych czynników decydujących o dokładności obliczeń.

Podniesione wątpliwości i zastrzeżenia nie mają na celu podważenia wartości osiągniętych rezultatów. Podjęte badania dotyczyły bardzo złożonych procesów. Uwzględnienie wszystkich czynników decydujących o ich przebiegu nie było możliwe, a dla przeprowadzenia symulacji badanych procesów konieczne było przyjęcie szeregu założeń upraszczających. Także plan eksperymentu musiał uwzględniać ograniczenia związane zarówno z kosztami badań jak i faktem, że budynek był normalnie funkcjonującym obiektem mieszkalnym, którego właściciele mogli nie akceptować poszerzonego zakresu pomiarów. W moim przekonaniu zastosowana w pracy metodyka i użyty warsztat naukowy są poprawne. Podniesione wątpliwości i zapytania spowodowane są częściowo niepełnym zakresem opisu wszystkich, przyjętych dla obliczeń założeń, po części wynikają z chęci uzyskania odpowiedzi Kandydata na sformułowane zapytania.

6. Uwagi redakcyjne i szczegółowe.

Praca została zredagowana jasno i zwięźle. Układ rozprawy jest przejrzysty, ułatwiający percepcję zawartych w niej treści, w czym pomaga starannie dobrany i opracowany materiał ilustracyjny w postaci: rysunków, schematów i wykresów. Zauważyłem nieliczne drobne błędy literowe (np. str. 1 wiersz 8 od góry; str. 8 wiersz 6 od dołu; i inne) oraz przykłady braku poprawności w przygotowaniu tytułów pozycji literatury (poz.53, poz.55, poz.68, poz. 92, poz. 108), których w całości nie przytaczam. Ogólnie redakcja pracy jest staranna.

7. Wnioski i ocena końcowa

Doktorant sformułował zagadnienie naukowe, które rozwiązał z wykorzystaniem właściwych metod. Wykazał się znajomością stanu wiedzy, nie tylko w obszarze podjętej w pracy problematyki, lecz także wiedzy ogólnej z inżynierii środowiska. Posiadał umiejętności potrzebne do rozwiązywania złożonych problemów badawczych, przy wykorzystaniu nowoczesnych narzędzi jakimi są zawansowane programy komputerowe do symulacji stanów cieplno-wilgotnościowych budynków. Przeprowadził ocenę granicznych wartości zawilgocenia wybranych rodzajów przegród zewnętrznych pod kątem zagrożeń związanych z utratą trwałości właściwości izolacyjnych w czasie eksploatacji oraz wystąpienia warunków sprzyjających znacznemu przyrostowi pleśni. Kandydat wykazuje się dobrym przygotowaniem do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Posiadał umiejętności potrzebne do planowania eksperymentów oraz krytycznej interpretacji wyników badań. Za oryginalny dorobek Autora można uznać:

- przeprowadzenie badań eksperymentalnych „in situ” stanu cieplno-wilgotnościowego przegród wybranego budynku pasywnego, podczas całorocznej jego eksploatacji oraz opracowanie ich wyników;
- przygotowanie założeń i danych do obliczeń symulacyjnych stanu przegród z użyciem programu WUFI®plus, dla warunków identycznych jak w pomiarach;
- statystyczne opracowanie poprawności wyników symulacji oraz przeprowadzenie oceny skorelowania ich wyników z rozkładami uzyskanymi w czasie pomiarów;
- wyprowadzenie wniosków dotyczących wpływu rodzaju: paroizolacji, izolacji termicznej i zastosowanych elementów usztywniających na przebieg zmian stanu higrotermicznego przegrody w cyklu całorocznym.

Osiągnięte w pracy wyniki są wartościowe z naukowego i aplikacyjnego punktu widzenia. Stanowią przyczynek do badań nad modelowaniem stanów cieplno-wilgotnościowych przegród zewnętrznych budynków.

Reasumując uważam, że recenzowana praca doktorska mgr inż. Krzysztofa WĄSA pt. „Wpływ konstrukcji ściany lekkiej szkieletowej na zjawiska cieplno-wilgotnościowe w budynku pasywnym” spełnia wszystkie warunki i wymagania określone w art.13 ust.1 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki - z dnia 14 marca 2003r. Przedstawione w pracy doktorskiej oryginalne rozwiązanie problemu naukowego potwierdza, że Kandydat wykazuje się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie inżynierii środowiska i posiadał umiejętności potrzebne do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wnoszę zatem o dopuszczenie Go do publicznej obrony.

