

Dr hab. inż. Jan Radoń, prof. UR
Katedra Budownictwa Wiejskiego
Wydz. Inżynierii Środowiska i Geodezji
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Al. Mickiewicza 24-28
30-059 Kraków

Kraków, 04.05.2018

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Zastawnej-Rumin
***Analiza efektywności stosowania materiałów fazowo-zmiennych w przegrodach
polskich budynków niskoenergetycznych***

Promotor: dr hab. inż. Tomasz Kisilewicz, prof. PK
Promotor pomocniczy: dr inż. Katarzyna Nowak

Recenzję opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, dr hab. inż. Andrzeja Szarata, prof. PK, zgodnie z decyzją Rady Wydziału z dnia 21.03.2018 r. (pismo W.510.16.2018 z dn. 27.03.2018).

1. Charakterystyka i ocena merytoryczna pracy

Praca doktorska obejmuje łącznie 199 stron wraz z rysunkami i tablicami oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim. Tekst podzielono na 6 rozdziałów i trzy-poziomowe podrozdziały. Wykaz cytowanej literatury zawiera 266 pozycji, w tym 13 w języku polskim, pozostałe głównie w języku angielskim. Większość cytowanych prac opublikowano po dwutysięcznym roku.

Pojawiające się w ostatnich latach fale upałów w Europie Środkowej spowodowały zwiększone zainteresowanie metodami obniżenia wysokich temperatur wewnątrz budynków. Najczęstszym sposobem unikania przegrzewania stało się montowanie aktywnych systemów chłodzących nie tylko w budynkach użyteczności publicznej, ale również mieszkalnych. Coraz powszechniej spotykane jednostki zewnętrzne klimatyzatorów, nie tylko szpecą elewacje budynków, ale także oznaczają

zwiększone zużycie energii dla komfortu. Tymczasem podstawowa zasada budownictwa ekologicznego wymaga, aby w sposób pasywny, a więc możliwie tylko poprzez odpowiednią architekturę i konstrukcję, starać się wytworzyć optymalne warunki mikroklimatyczne. Absorbowanie nadmiaru ciepła poprzez materiały zmieniające stan skupienia, wkomponowane w konstrukcję budynku, jest ważnym i wciąż nie do końca rozwiązany zagadnieniem naukowym o dużym znaczeniu gospodarczym i środowiskowym. Stan ten znalazł adekwatne odzwierciedlenie w opisach bibliograficznych w pracy. Opisy te nie są zebrane w osobnym rozdziale, ale stanowią wstęp do poszczególnych zagadnień, co dobrze wpisuje się w strukturę tematyczną pracy.

Na wstępie Autorka opisała niektóre materiały PCM i ich dotychczasowe zastosowanie w budownictwie. Następnie jasno określiła cele i sformułowała tezy pracy. Teza trzecia, o przeszacowaniu pominięcia wpływu histerezy jest nieprecyzyjna. Nie wiadomo co oznacza 20% korzyści z zastosowania PCM? Ponadto, precyzyjne określenie procentowe przeszacowania sugeruje znajomość wyniku na etapie formułowania tezy.

Bardzo cennym elementem pracy jest przeprowadzenie obszernych badań eksperymentalnych w zespole komór klimatycznych. Modelem przegrody jest warstwa styropianu, pokryta płytą gipsowo-kartonową do której mocowano dodatkowe elementy oraz czujniki. Elementy te poddano badaniom wstępnym w zakresie przewodności cieplnej oraz ciepła przemiany fazowej samego materiału fazowo-zmiennego. Opis badań własnych poprzedzono przeglądem literaturowym podobnych pomiarów i ich najważniejszych wyników.

Zakres i metoda pomiarów własnych, oraz aparatura badawcza są dobrze opisane a wyniki dobrze udokumentowane. Badania eksperymentalne podzielono na trzy etapy; 1 - płyty gipsowo-kartonowe zawierające PCM, 2 - elastyczne maty wypełnione materiałem bioPCM oraz 3 - zestawy materiałów z 1 i 2 etapu. Wartości i czasowa zmienność temperatury powietrza w komorach miały z założenia odzwierciedlać warunki termiczne po obu stronach badanych przegród w czasie upałów. Przebieg temperatury w komorze zimnej jest, jak wynika z rys. 2.3.6, stały w czasie. Podobne warunki założono

we wszystkich cyklach pomiarowych. O ile czasowa zmienność temperatury w komorze cieplej w miarę poprawnie odzwierciedla rzeczywiste procesy to jednak stała temperatura po zewnętrznej stronie przegrody jest założeniem dość teoretycznym. W upalne dni temperatura powietrza zewnętrznego ulega bowiem znacznym wahaniom a wartości maksymalne niewiele się różnią od temperatury wewnątrz. Wysoki opór cieplny przegrody (15 cm styropianu) powoduje, że po wewnętrznej stronie występują niewielkie gradienty temperatury w płycie gipsowej i badanych elementach. Tym samym wpływ warunków zewnętrznych jest zminimalizowany. Tym niemniej należało przyjęte założenia odnośnie temperatury zewnętrznej, wyraźniej uzasadnić.

Rodzaj i lokalizacja czujników umożliwiła bezpośredni pomiar temperatury powierzchni oraz przepływu ciepła w badanych elementach. W konsekwencji można było eksperymentalnie określić wszystkie, istotne dla przedmiotowych badań, parametry systemu. Zastosowanie elementu referencyjnego, pozbawionego PCM, umożliwiło odniesienie wyników do tradycyjnej przegrody. W świetle powyższego bezpośrednio wyniki pomiarów jak temperatura powierzchni oraz strumień ciepła jak i wyniki pośrednie, określające buforowanie ciepła w badanych elementach, należy uznać za wiarygodne. Warto podkreślić, że wyniki badań potwierdziły występowanie histerezy pomiędzy cyklami grzania i chłodzenia we wszystkich materiałach zawierających PCM.

Wyniki pomiarów obszernie opisano oraz poddano stosownej analizie. Opis ten odnosi się m.in. do możliwości i warunków pełnego wykorzystania potencjału magazynowania energii poprzez zmianę fazy w odniesieniu do konstrukcji możliwych do zastosowania w praktyce. Zauważono, że nie zawsze PCM może w pełni ulec przemianie fazowej. Najczęściej przemiana ta jest tylko częściowa, co obniża efektywność stosowania tego typu rozwiązań. Autorka określiła także warunki poprawy, np. dla pełnego zestalenia materiału fazowo-zmiennego konieczne jest znaczne obniżenie temperatury powietrza w dłuższym okresie czasu, co można osiągnąć poprzez intensywne wietrzenie pomieszczeń w nocy.

Z pewnością uzyskane wyniki pomiarów stanowią dużą wartość poznawczą. Ich analiza i dyskusja są znaczącym elementem rozprawy. Autorka nie tylko szczegółowo

opisała same wyniki pomiarów i różnice wynikające ze specyfiki badanych materiałów, ale również odniosła się do możliwości praktycznego wykorzystania analizowanych rozwiązań w rzeczywistych warunkach pogodowych i budowlanych. Pewien niedosyt stanowi jedynie brak odniesienia do wyników badań kalorymetrycznych samego materiału fazowo-zmiennego (rys. 2.3.3, 2.3.4 oraz 2.4.2, 2.4.3) oraz odniesienia wyników badań w komorach klimatycznych do wyników podobnych pomiarów znanych z literatury.

Jak Autorka rozprawy zauważyła, badania eksperymentalne, nawet bardzo obszerne, nie są w stanie zastąpić projektowania opartego na prognozowaniu zużycia energii oraz mikroklimatu dowolnego budynku. Zbudowanie wiarygodnego modelu obliczeniowego przegród zawierających PCM jest niezbędne dla symulacji pomieszczeń w warunkach niestacjonarnych. Stąd w pracy umieszczono obszerny rozdział poświęcony obliczeniom teoretycznym. Istotną jego częścią jest przedstawienie specyfiki numerycznego modelowania przepływu ciepła w przegrodach zawierających PCM. Szczególną uwagę poświęcono metodyce obliczeń materiałów fazowo-zmiennych w programie Energy Plus. Program ten został użyty do obliczeń walidacyjnych oraz uogólniających. Algorytm obliczeń Autorka zmodyfikowała w celu uwzględnienia histerezy.

Doktorantka zakłada, że obliczenia przepływu ciepła w przegrodzie odbywa się metodą różnic skończonych w schemacie Cranca-Nicholson. Równanie 3.2.2.5 (str. 99) odpowiada tym założeniom. Na następnej stronie Autorka podaje, że „obliczenia iteracyjne zapewniają przyjmowanie do obliczeń aktualnej dla danego kroku czasowego dokładnej wartości c według wzoru 3.2.3.6” (powinno być 3.2.2.6). Jednakże wg podanej zależności wyliczenie efektywnej pojemności cieplnej odnosi się do kroku poprzedniego (wskaźniki $j-1$ oraz j). Podobnie jest we wzorach 3.3.1 i 3.3.2 w opisie wpływu histerezy. Tak więc w kroku czasowym j do $j+1$ ta wartość jest stała, a więc nie występuje konieczność iterowania ze względu na pojemność cieplną. Należy wyjaśnić, czy wskaźniki „ j ” zostały w odpowiednich wzorach poprawnie ustalone i czy wartość pojemności cieplnej była przyjmowana z poprzedniego kroku czasowego. Takie rozwiązanie, pomimo pewnej niekonsekwencji polegającej na określeniu niektórych współczynników w schemacie

jawnym (*explicit*), jest dopuszczalne i dość powszechnie stosowane w tego typu obliczeniach. Stała wartość pojemności cieplnej uwalnia rozwiązanie od problemów związanych z konwergencją przy skokowych zmianach tej wartości. Ceną jest pogorszenie adekwatności modelu fizycznego, a tym samym dokładności obliczeń, w zakresie temperatury odpowiadającym przemianie fazowej, gdzie wrażliwość entalpii na zmiany temperatury jest bardzo wysoka. Zmniejszenie kroku czasowego jest w tym przypadku konieczne dla poprawy dokładności obliczeń.

Dla uzyskania dokładnego rozwiązania konieczne jest ciągle monitorowanie entalpii w węzłach materiału z właściwością PCM. Konsekwentnie do schematu mieszanego, entalpia ta powinna być wyliczana dla średniej temperatury z kroku czasowego j oraz $j+1$. Takie rozwiązanie umożliwia dokładniejsze uwzględnienie wchodzenia węzła materiałowego w stan przemiany oraz wychodzenia z niego. Temperatura początkowa, w danym kroku czasowym, jest najczęściej poza obszarem przemiany fazowej (a nie na granicy obszaru jak zakłada Autorka) a końcowa wewnątrz obszaru (lub na odwrót). Przyrost entalpii uwzględnia wówczas zarówno ciepło jawne (tam, gdzie krzywe grzania i chłodzenia się pokrywają) jak i niejawne. Wartość entalpii zależy od temperatury końcowej, która nie jest znana w momencie rozwiązywania układu równań. Tak więc konieczne jest iterowanie. Kryterium zakończenia iteracji może być, określona dokładnością obliczeń, pomijalna różnica temperatury w węzłach lub pomijalna zmiana entalpii (określonej w pracy wzorem 3.1.3.3, str. 88) w kolejnych iteracjach. Dodatkowym parametrem obliczeniowym jest udział frakcji płynnej, który przyjmuje wartości opisane równaniem 3.1.3.5. Wprowadzenie tego parametru pozwala dodatkowo na wyeliminowanie niejednoznaczności dla izotermicznej przemiany fazowej.

Przytoczony opis rozwiązania dokładnego nie podważa poprawności metodologii opisanej w rozprawie. Przy odpowiednio małym kroku czasowym można uzyskać wystarczająco dokładne wyniki dające wiarygodny obraz zjawisk cieplnych w przegrodach z materiałami PCM. Zaleca się jedynie uściślenie opisu modelu zastosowanego w obliczeniach w świetle przytoczonych uwag.

Idea modyfikacji algorytmu, pokazana na rys. 3.3.1 jest w zasadzie poprawna. Jednak jako fragment obliczeń powinna posiadać wejście (input) oraz wyjście (output). Należałoby zaznaczyć, że wejściem jak i wyjściem może być, w zasadzie, każdy z prostokątów. Zgodnie z opisem przejście do innego stanu następuje przy zmianie monotoniczności temperatury. Tak więc „krzywa grzania” i krzywa chłodzenia” zawiera przejście przez fazę przemiany. Wyjście z „krzywej przejściowej” jest możliwe dopiero po pokryciu się odpowiednio z krzywą chłodzenia lub grzania. Oznacza to, że algorytm „krzywej przejściowej” zawiera zarówno algorytm krzywej grzania jak i chłodzenia ze zmianą fazy. Występuje tutaj tzw. „nadmierność kodu” (z ang. code redundancy). Dla uniknięcia tego wystarczy określić wyjście do „krzywej grzania lub chłodzenia” już w momencie, gdy temperatura „znajdzie się” na jednej tych krzywych, jeszcze w fazie przemiany.

Wyniki obszernych badań eksperymentalnych zostały wykorzystane do walidacji zaproponowanego modelu obliczeniowego. Parametry fizyczne materiałów, przyjmowane do obliczeń, zostały określone poprzez pomiary eksperymentalne. Krzywe entalpii wyznaczono poprzez kalibrację (str. 122). Nie jest jasne, czy kalibracja polegała na wyznaczeniu entalpii poprzez proste, wagowe udziały poszczególnych materiałów, czy też zastosowano inne dopasowanie?

W analizie porównawczej ograniczono się do określenia chwilowych różnic (błędów obliczeniowych) pomiędzy wynikami pomiarów i symulacji. Pominięto wyznaczenie korelacji, co dałoby pełniejszy obraz walidacyjny. Tym niemniej należy uznać, że dokładność obliczeń jest wystarczająca dla opisu badanych zjawisk termicznych i towarzyszących wniosków. Wyraźna poprawa dokładności obliczeń w modelu uwzględniającym histerezę potwierdziło celowość rozbudowy algorytmu o ten, jak się okazuje, istotny element.

Wykonanie uogólniających obliczeń symulacyjnych stanowi prostą konsekwencję przeprowadzonych wcześniej pomiarów i analiz. Wyniki symulacji obliczeniowych potwierdziły wcześniejsze tezy i umożliwiły dokonanie dalszych uogólnień. Wykorzystując obszerny materiał badawczy Doktorantka opracowała zasady i algorytm

efektywnego stosowania okładzin z PCM. Zasady te powinny, moim zdaniem, zostać opublikowane w czasopismach popularno-naukowych, gdyż stosowanie pasywnych rozwiązań w tym materiałów PCM nie jest w Polsce wystarczająco znane i tym samym rzadko stosowane.

Praca zakończona jest podsumowaniem i wnioskami. Wnioski te są adekwatne do tematu i zakresu badań. Pomimo szeroko zakrojonych badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych, Autorka słusznie zauważyła, że tematyka prac wybiega daleko poza zakres jednej pracy naukowej. Nakreśliła więc kierunki dalszych prac badawczych, które, jak można przypuszczać, będzie realizowała w przyszłości.

2. Uwagi szczegółowe

Rozprawa jest starannie zredagowana i napisana poprawną polszczyzną. Pomimo dużej objętości (prawie 200 stron) nie ma rozwlekłości, nie zauważono też wielu błędów literowych, interpunkcyjnych czy nieprecyzyjności. Błędy literowe zaznaczono w pracy. Pozostałe, nieliczne uwagi, zestawiono poniżej:

Str. 12. rys. 1.1.1, na osi poziomej należało, zamiast czasu, umieścić entalpię, czas płynie w jedną stronę, stąd krystalizacja umieszczona na rysunku nie mogła by wystąpić;

Str. 42. wzory na dokładność, ze względu na spójność jednostek, nie powinno się wpisywać procenta do wyrażenia tylko liczbę absolutną (tj. zamiast 0.05%, powinno być 0.0005);

Str. 91. „metoda Cranka-Nicolsona”, Phyllis Nicolson była kobietą, stąd powinno się pisać „metoda Cranca-Nicolson”;

Str. 98. równanie 3.2.2.3, „h” nie jest objaśnione, jeśli jest to entalpia właściwa to ρ jest w tym wzorze zbędne;

Str. 176. W cytowaniu używa się nazw: „Energy Build.”, powinno być „Energy & Building”;

Str. 176. Brak nazwy czasopisma w cytowaniu 15.

3. Podsumowanie i wniosek końcowy

Mgr inż. Anna Zastawna-Rumin w rozprawie doktorskiej *Analiza efektywności stosowania materiałów fazowo-zmiennych w przegrodach polskich budynków niskoenergetycznych* opisała obszerne badania eksperymentalne, które przeprowadziła w zespole komór klimatycznych oraz badania pomocnicze. Następnie przedstawiła algorytm obliczeń przepływu ciepła w przegrodzie zawierającej PCM z uwzględnieniem histerezy, który zaimplementowała do programu Energy Plus, służącego do symulacji cieplnych całych budynków. Model obliczeniowy poddała walidacji na podstawie wyników badań eksperymentalnych, uzyskując zadawalającą zgodność. Następnie przeprowadziła uogólniające symulacje komputerowe pozwalające na sprawdzenie realnych rozwiązań w polskich warunkach klimatycznych.

Liczba i zróżnicowanie obiektów badawczych oraz zakres pomiarów i analizy są wystarczające dla zrealizowania przedmiotu i celu pracy. Doktorantka wykazała umiejętności formułowania i rozwiązywania problemu naukowego, prowadzenia badań z zastosowaniem prawidłowo dobranych metod badawczych oraz poprawnej prezentacji i interpretacji wyników. Uzyskane rezultaty mają charakter użyteczny, a także mogą być wykorzystane w dalszych badaniach naukowych. W związku z tym stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Anny Zastawnej-Rumin spełnia wszystkie wymagania *Ustawy z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (z późniejszymi zmianami) oraz wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

