

dr hab. inż. Dariusz Heim, prof. PŁ

Łódź, dn. 02.06.2018

Katedra Inżynierii Środowiska

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

Politechnika Łódzka

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Anny Zastawnej-Rumin

**pt. „Analiza efektywności stosowania materiałów fazowo zmiennych w przegrodach
polskich budynków niskoenergetycznych”**

wykonanej na Wydziale Inżynierii Lądowej, Politechniki Krakowskiej.

Promotor: dr hab. inż. Tomasz Kisilewicz, prof. PK

Promotor pomocniczy: dr inż. Katarzyna Nowak

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej z dnia 21.03.2018 r. o powołaniu recenzenta oraz na prośbę Pana Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej – dr hab. inż. Andrzeja Szarata, prof. PK, z dnia 27.03.2018 r., sformułowaną w piśmie 10.510.16.2018.

2. Ocena zasadności podjęcia tematu

Rozwój współczesnego budownictwa i technologii budowlanych zdeterminowany jest wielorakimi wymaganiami, m.in. z zakresu oszczędności energii. W naszych warunkach klimatycznych obiekty optymalizowane są głównie pod kątem spełnienia wymagań jakości środowiska wewnętrznego w okresie ogrzewczym. Stąd też w większości przypadków, decydującym przy wyborze danego rozwiązania projektowego jest zapotrzebowanie na energię do ogrzewania. Tym niemniej, problematyka niedotrzymania parametrów komfortu termicznego w sezonie letnim jest problemem znanym od czasów pojawienia się

DZIENNIKARZ	
Wydziału Inżynierii Lądowej	
Wpłynęło dnia...	14.06.2018
L. dz.	LO.510.16.2018
podpis	Góral

współczesnych technologii budowlanych, w szczególności lekkiego budownictwa szkieletowego. Problem ten narasta w połączeniu z dużymi zyskami ciepła wynikającymi zarówno ze sposobu użytkowania budynków (rosnąca liczba elektrycznych urządzeń użytku codziennego) jak i trendów w samej architekturze (znaczny udział powierzchni przeszklonych), i nie dotyczy jedynie naszej szerokości geograficznej.

Zagadnienia podjęte w ocenianej rozprawie doktorskiej wpisują się w zakres działalności naukowej prowadzonej od wielu lat w Zakładzie Budownictwa i Fizyki Budowli Politechniki Krakowskiej, stanowiąc istotny wkład w rozwój wiedzy i metod badawczych w zakresie racjonalnego wykorzystania zysków ciepła w budynkach. Należy stwierdzić, że są one także zgodne z kierunkami badań prowadzonymi w innych wiodących ośrodkach naukowych na świecie, w krajach takich jak: Stany Zjednoczone, Niemcy, Hiszpania, Norwegia i Francja.

Choć pierwsze badania nad wykorzystaniem materiałów fazowo zmiennych (MFZ) do magazynowania ciepła w formie utajonej prowadzone były jeszcze w latach 70. ubiegłego wieku to istotny rozwój w tej dziedzinie nastąpił dopiero po roku 2000 i trwa do dnia dzisiejszego. Użycie MFZ w wewnętrznych materiałach budowlanych i wykończeniowych jest ich podstawową i najczęściej badaną aplikacją. W wielu miejscach spotkać można również praktyczne zastosowanie wewnętrznych okładzin modyfikowanych MFZ w budynkach istniejących, zaś na rynku dostępne są półprodukty służące do wytwarzania komponentów jak i same komponenty budowlane. W tym kontekście podjęta w recenzowanej rozprawie problematyka analizy efektywności stosowania materiałów fazowo zmiennych w przegrodach polskich budynków niskoenergetycznych wydaje się być jak najbardziej potrzebna a tym samym uzasadniona. Prezentowana rozprawa doktorska jest kompleksową i rzetelną odpowiedzią na tę potrzebę, zaś jej wyniki przyczynią się z pewnością do rozwoju i udoskonalenia metod obliczeniowych, rzeczywistej oceny cieplnej dostępnych rozwiązań i poprawy standardu projektowania budynków.

3. Krótka charakterystyka pracy i zakres rozprawy

Praca pt. „Analiza efektywności stosowania materiałów fazowo zmiennych w przegrodach polskich budynków niskoenergetycznych” została przygotowana w formie maszynopisu i liczy 199 stron. Zawiera 98 rysunków i 22 tabele. Składa się z 6 rozdziałów.

Rozdział 1. Wstęp, który zawiera wprowadzenie w podjętą tematykę oraz w którym określono cel, tezy oraz zakres rozprawy. Sformułowano łącznie 4 tezy pracy.

Rozdział 2 stanowi opis przeprowadzonych badań, w którym jedynie pierwsze 8 stron poświęcono na przegląd literatury na temat badań eksperymentalnych innych autorów, zaś całość licząca 49 stron stanowi opis badań własnych. Dotyczy on w głównej mierze badań prowadzonych na płytach gipsowo-kartonowych modyfikowanych mikroenkapsulowanym MFZ oraz paneli aluminiowych wypełnionych MFZ.

W rozdziale 3 dokonano przeglądu metod modelowania zjawisk cieplnych w warstwie materiału z uwzględnieniem ciepła utajonego przemiany fazowej. Szczegółowo omówiono algorytm obliczeniowy stosowany w programie Energy Plus oraz własną, autorską modyfikację polegającą na uwzględnieniu zjawiska histerezy wraz z jego weryfikacją.

Rozdział 4 jest w pewnym sensie kontynuacją obliczeń wykonanych w rozdziale 3 z tą różnicą, że przeprowadzono je dla przykładowego obiektu w warunkach klimatycznych Krakowa, nie zaś pojedynczego komponentu w warunkach obciążenia jak podczas badań w komorze klimatycznej. W rozdziale tym wykazano skutki pominięcia histerezy MFZ podczas obliczeń symulacyjnych oraz ocenę warunków termicznych panujących w budynku w sezonie chłodniczym, ogrzewczym i przejściowym.

Rozdział 5 stanowi autorską propozycję doboru oraz stosowania okładzin zawierających MFZ, w tym uproszczony algorytm określania parametrów termofizycznych okładziny, zaś rozdział 6 to krótkie podsumowanie pracy oraz określenie kierunków dalszych badań.

Praca zawiera ponadto streszczenie w języku polskim i angielskim, zestawienie stosowanych oznaczeń, spis literatury oraz wykaz tabel i rysunków. Nie zawiera załączników.

W pracy wykorzystano 266 pozycji literaturowych, głównie anglojęzycznych. W większości są to artykuły, które ukazały się po roku 2000, zaś w wielu przypadkach po roku 2010. Należą do nich prace własne doktorantki.

4. Ocena formalna

Przedstawiona praca ma charakter badawczo - teoretyczny i obejmuje zagadnienia fizyki cieplnej budowli. Celem pracy była:

- „analiza sposobu i efektywności akumulacji ciepła w materiałach, w których zachodzi zjawisko przemiany fazowej”,

- „próba sformułowania, na podstawie badań doświadczalnych oraz analiz symulacyjnych, ogólnych zasad właściwego stosowania materiałów fazowo zmiennych w budynkach niskoenergetycznych, zlokalizowanych w polskich warunkach klimatycznych”,

- „opracowanie autorskiego algorytmu doboru materiałów fazowo zmiennych w budownictwie”.

Stwierdzam, że założone cele zostały zrealizowane przez Doktorantkę za pomocą poprawnie dobranych metod badawczych oraz wyników symulacji uzyskanych za pomocą wstępnie zweryfikowanych, autorskich algorytmów obliczeniowych.

Moim zdaniem, jeszcze bardziej cenne z naukowego punktu widzenia są cele zdefiniowane w pracy jako pośrednie, czyli:

- „określenie wpływu histerezy przemian fazowo zmiennych na dokładność obliczeń symulacyjnych”, oraz

- „modyfikacja programu Energy Plus, tak aby możliwe było uwzględnienie histerezy materiałów fazowo zmiennych w obliczeniach symulacyjnych”,

co jest istotnym osiągnięciem w kontekście prowadzonych aktualnie na świecie badań z zakresu modelowania i symulacji procesów cieplnych w budynkach.

Autorka sformułowała 4 tezy pracy. Część pierwsza tezy 1 w tak ogólnie sformułowanej treści jest dość oczywista. Moim zdaniem, bez szczegółowych badań i analiz można podać przypadki, w których zakładany warunek będzie spełniony lub niespełniony. Natomiast w części drugiej, została ona doprecyzowana w zakresie oczekiwanego wyniku co pozwala wykazać jej prawdziwość ale jedynie dla przypadków rozpatrywanych w pracy doktorskiej. Tezy 2 i 3 są do siebie zbliżone w sensie merytorycznym i mogłyby stanowić jedną tezę. Precyzyjne, wstępne założenie oczekiwanych wielkości energetycznych („przeszacowanie, nawet o 20%”) jest kontrowersyjne bez znajomości chociażby wstępnych wyników badań. Stwierdzam, że zarówno teza 2 jak i 3 zostały udowodnione. Teza nr 4 ma podobnie jak teza 1 charakter bardziej ogólny i nieco słabszy wydźwięk w porównaniu z tezami 2 i 3.

Praca ma klasyczny układ rozprawy doktorskiej. Zarówno część badawcza jak i symulacyjna rozpoczyna się krótkim przeglądem literatury, co jest uzasadnione z uwagi na charakter pracy. Szczegółowe wnioski znajdują się na końcu podrozdziałów 2.3, 2.4 oraz 4.2 i zostały jedynie częściowo zawarte w podsumowaniu umieszczonym na końcu pracy. Jako wnioski można także potraktować część dotyczącą zasad stosowania okładzin z MFZ,

sformułowane w części 5.1 i stanowiących w pewnym sensie wytyczne do projektowania. W podsumowaniu Doktorantka odnosi się także do wcześniejszych tez uznając, że zostały one sformułowane poprawnie.

W mojej opinii praca jest obszerna (liczy łącznie 199 stron) co świadczy o tym, że Doktorantka starała się dokonać jak najbardziej kompleksowej oceny wybranych rozwiązań. W wielu obszarach jest ona mocno rozbudowana, choć pewne fragmenty budzą niedosyt. Zdecydowanie brakuje wyników zawartych ponoć w opublikowanych pracach doktorantki, w tym dotyczących materiałów określonych jako bioPCM, tym bardziej, iż materiały te są analizowane w części obliczeniowej rozprawy. Szczególnie przydatne do oceny wyników badań i symulacji byłyby rezultaty badań kalorymetrycznych tego rodzaju MFZ. Widać, że zakres i być może również cel pracy ewoluowały w trakcie jej powstawania. Z pewnością Autorka nie unikała poszukiwania alternatywnych i innowacyjnych rozwiązań, a także eksplorowania obszarów pobocznych takich jak np. bardziej precyzyjny opis wymiany ciepła w materiałach o strukturze kubełkowej (bioPCM), pomimo, że ostatecznie nie znalazły się one w pracy. Była otwarta na kolejne, dodatkowe badania i analizy co świadczy, że być może również obecnie widzi możliwości prowadzenia dalszych badań w tej tematyce. Zostało to także sformułowane w zaproponowanych „kierunkach dalszych prac”, co nie jest raczej spotykane w przypadku prac doktorskich, które powinny stanowić sensu stricto pewną zamkniętą i zakończoną całość. Nie jest to jednak w żadnym stopniu wadą, zaś może stanowić dużą zaletę w sytuacji, kiedy Doktorantka planowałaby nadal kontynuować swoją pracę naukową w tym temacie.

Praca napisana jest prawidłową polszczyzną. Autorka nie stroni od szczegółowej analizy uzyskanych wyników na każdym etapie pracy. Jest precyzyjna i rzetelna w formułowaniu własnych opinii. Na szczególną pochwałę zasługuje opis modyfikacji algorytmu obliczeniowego (rozdział 3) stosowanego w wiodącym programie do symulacji procesów fizycznych w budynkach – Energy Plus. Ważne jest, że Doktorantka podchodzi z dystansem do uzyskanych wyników badań zdając sobie sprawę z dokładności urządzeń pomiarowych jak i niepewności pomiaru, którą każdorazowo wyznacza metodą obliczeniową. Drobne błędy o charakterze ogólnym bądź redakcyjnym wykazane w dalszej części recenzji nie mają wpływu na całościową, bardzo pozytywną ocenę.

5. Ocena merytoryczna

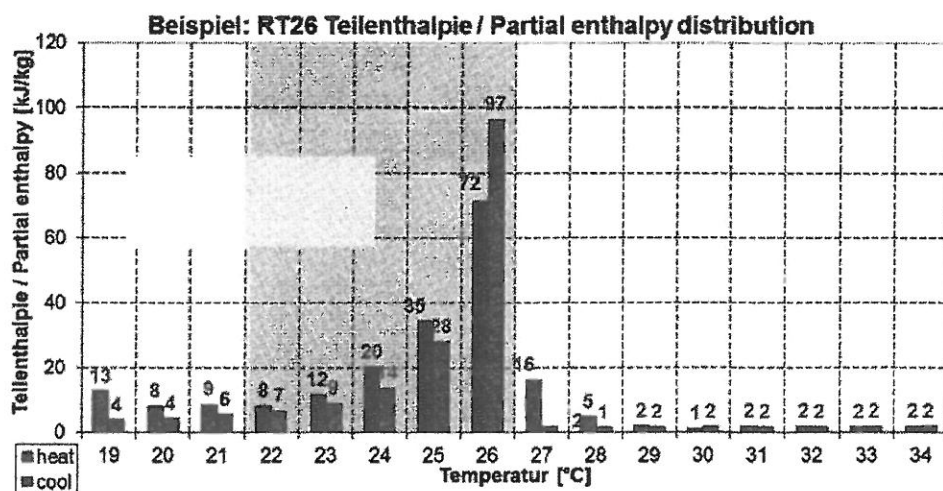
Z uwagi na trafnie sformułowany problem badawczy, szeroki zakres badań, prawidłową interpretację uzyskanych wyników oraz umiejętność sformułowania wniosków i wytycznych moja ocena merytoryczna prezentowanej pracy jest bardzo wysoka. Jednakże dokładna analiza nakłada na mnie obowiązek sformułowania kilku uwag o charakterze dyskusyjnym, nie umniejszających jednak pierwotnej oceny.

5.1. Uwagi krytyczne wymagające odpowiedzi w czasie publicznej obrony

Pierwsza uwaga dotyczy kluczowej dla uzyskanych wyników procedury prowadzenia badań w komorze klimatycznej. Moim zdaniem opis sposobu prowadzenia badań w komorze jest niewystarczający i nie daje możliwości odniesienia ich do warunków rzeczywistych panujących w budynku. W szczególności brakuje opisu warunków wymiany ciepła na powierzchni wewnętrznej przegrody pokrytej komponentem modyfikowanym MFZ. Proszę o doprecyzowanie jak intensywny był to proces poprzez chociażby przybliżone oszacowanie współczynników przejmowania ciepła. Czy dominującym mechanizmem wymiany ciepła była konwekcja czy promieniowanie? Jak warunki wymiany ciepła występujące podczas eksperymentu korespondują z warunkami wymiany ciepła w pomieszczeniach rzeczywistych, w warunkach eksploatacji. Zdolność do akumulowania jak i oddawania energii, która stanowi istotny fragment analizy uzyskanych wyników jest zależna nie tylko od temperatury powietrza w otoczeniu przegrody ale także od intensywności przejmowania ciepła. Tym samym sformułowane wnioski obowiązują przy pewnych założeniach, zaś w rzeczywistych warunkach eksploatacji może okazać się, że proces ten będzie mniej lub bardziej intensywny a tym samym czas potrzebny do pełnego stopienia lub zestalenia materiału będzie inny. Jedyna, krótka wzmianka nt. warunków wymiany ciepła znajduje się dopiero na stronie 116 pracy, w części poświęconej analizom symulacyjnym. Dodatkowe, powiązane z tym pytanie, dotyczy sposobu wykończenia powierzchni na czas prowadzenia badań. Czy powierzchnie płyty wzorcowej (gipsowo-kartonowej) oraz płyty Dupont (okładziny aluminiowej) były dla potrzeb eksperymentu pokryte powłoką o zbliżonych właściwościach emisyjnych, czy też z uwagi na przykrycie powierzchni czujnikiem strumienia miało to efekt pomijalny? Doprecyzowanie tych zagadnień ma kluczowe znaczenie w interpretacji późniejszych wyników opisanych m.in. w rozdziale 2.3.2.

Uwaga druga związana jest z przyjętym założeniem, że materiał powinien „pracować” w pełnym zakresie przemiany fazowej. Tymczasem komercyjnie dostępne MFZ posiadają

bardzo szeroki zakres przemiany, zaś deklarowana temperatura np. 23°C odpowiada maksymalnej wielkości ciepła utajonego dla danego wąskiego zakresu jej zmian, np. 1 K. Podobny błąd pojawia się w opisie właściwości płyty Dupont (str. 34) gdzie znaleźć można informację o temperaturze przemiany fazowej wynoszącej 21,5°C co nie jest prawdą, gdyż jak wynika z rysunku 2.4.2 zachodzi ona w pewnym szerokim zakresie temperatury. W pracy nie podano jaki MFZ stosowany jest w produkcie Micronal (PCM 23 i PCM 26), natomiast jest to najprawdopodobniej mieszanka parafin posiadająca charakterystykę jak na rysunku 1 (PCM 26) lub podobną, lecz w dużej mierze zgodną z wynikami pomiarów kalorymetrycznych zamieszczonych w pracy na rysunku 2.3.4. Jak widać, materiał ten w formie jednolitej przechodzi przemianę fazową w zakresie temperatur 19 - 34°C, przez co oczywistym jest, że nie jest możliwe jego pełne rozładowanie gdy temperatura powietrza wynosi np. 24°C. Uwzględniając fakt, iż najbardziej efektywnym zakresem temperatury pracy jest zakres komfortu cieplnego użytkowników należałoby przeddefiniować użyteczne ciepło przemiany z możliwością jego zróżnicowania w zależności od pory roku. Zgodnie z rysunkiem 1 dla okresu lata odpowiadałby on polu zaznaczonemu na kolor szary czyli zakresowi temperatury 22 - 26°C co skutkuje łącznym ciepłem przemiany w tym zakresie równym 147 kJ/kg (w procesie nagrzewania) i stanowi 70% całkowitego ciepła utajonego przemiany fazowej materiału. Uwaga ta koresponduje z pierwotnym założeniem, sformułowanym także w streszczeniu pracy, iż „... warunkiem koniecznym dla efektywnego wykorzystania materiałów fazowo-zmiennych do akumulowania ciepła na drodze utajonej przemiany fazowej jest cykliczne pełne uwalnianie magazynowanej energii”. Moim zdaniem nie jest konieczne doprowadzanie materiału do pełnego „rozładowania” jeżeli wiązałoby się to z obniżeniem temperatury powietrza poza zakres komfortu cieplnego. Na stronie 55 stwierdzono, iż zaskakującym jest, że ilość energii zmagazynowana w niższych temperaturach jest wyższa niż w sytuacji dużego przegrzania bez późniejszego schłodzenia. Przyjmując, że enkapsulowany MFZ ma charakterystykę podobną do tej pokazanej na rysunku 1 nie jest to dziwne, gdyż w przypadku cyklu 0210 (zakres 17 - 26°C) materiał jest w stanie zmagazynować 177 kJ/kg, zaś w cyklu 0207a (zakres 28 - 36°C) jedynie 16 kJ/kg. Podobnie na stronie 58 nie dziwi fakt, że materiał chłodzony powietrzem o temperaturze 28°C oddaje stosunkowo niewielką ilość zakumulowanej energii.



Rys. 1. Ilość ciepła utajonego w poszczególnych zakresach temperatur w cyklu grzania i chłodzenia

5.2. Pozostałe uwagi merytoryczne

Na rysunku 1.1.3a pokazano wynik badania ciepła przemiany fazowej Micronalu, który nie jest czystym MFZ a kompozytem składającym się z polimerowej otoczki, w której zamknięta jest parafina. Biorąc pod uwagę wielkość kapsułek, udział procentowy samej parafiny w objętości kompozytu jest niewielki co skutkuje niską wartością ciepła przemiany w porównaniu do bioPCM (rys. 1.1.3b) który jest MFZ w czystej postaci. Wyniki pokazane na rysunku nie dotyczą „ciepła właściwego przemiany fazowej” jak podano w podpisie lecz ciepła utajonego.

Na stronie 15 pojawia się stwierdzenie, że „temperatura zmiany fazy powinna mieścić się w zakresie 20 - 30°C. Moim zdaniem górna granica jest zawyżona i powinna maksymalnie wynosić 26°C co wynika z wymagań komfortu cieplnego użytkowników w przypadku zastosowania MFZ, jako elementu wykończenia powierzchni pomieszczeń w budynkach przeznaczonych na pobyt osób. Ponadto w przypadku materiałów o temperaturze przemiany poniżej temperatury komfortu dla okresu zimowego (21 - 22°C) istnieje ryzyko akumulowania w MFZ ciepła pochodzącego z instalacji ogrzewczej, a tym samym znaczne zwiększenie stałej czasowej pomieszczenia i pogorszenie zdolności do krótkookresowej regulacji temperatury powietrza lub przerw w ogrzewaniu.

Proszę wyjaśnić co Autorka rozumie pod pojęciem (str. 17) „... kompatybilność z innymi materiałami budowlanymi.”? Czy jest to zdolność do integracji pod względem cech mechanicznych, fizycznych, czy chemicznych, o których wspomniane jest także na str. 18?

W pierwszej tezie pracy pojawia się stwierdzenie, że „Realizacja tego warunku jest w praktyce trudna i wymaga wielogodzinnych okresów nagrzewania i chłodzenia oraz dużych, nawet kilkunastostopniowych zmian temperatury otoczenia, tak, aby przemiana fazowa zaszła w całej grubości warstwy”. Powyższa teza byłaby z pewnością zasadna, gdyby doprecyzowano jakiej grubości warstwy są przedmiotem badań, natomiast nigdzie w pracy taka informacja się nie pojawia. Można się jedynie domyślać, że w przypadku płyt g-k są to grubości standardowe czyli od ok. 1,2 - 1,5 mm. Na stronie 40 podano, że badane płyty miały zbliżoną grubość co sugeruje, że nie były tej samej grubości. Brak jest informacji nt. grubości płyt Dupont oraz bioPCM. W tej sytuacji zadanie badawcze można by sformułować nieco inaczej poprzez określenie jaka jest efektywna grubość warstwy PCM przy założeniu dobowych cykli zmian temperatury o zadanej amplitudzie?

Zakres badań określony na stronie 34 rozprawy nie odpowiada w proporcjach zaprezentowanym wynikom. Najbardziej szczegółowo opisano rezultaty uzyskane dla płyt gipsowo kartonowych modyfikowanych Micronalem, choć nie określono czy płyty były wykonywane własnoręcznie czy też uzyskane od producenta. Najskromniej opisano badania i wyniki uzyskane dla płyt bioPCM, chociaż były one analizowane w części numerycznej pracy.

Na stronie 36 podano, że „Czas trwania poszczególnych cykli oraz przebiegi temperatury, wewnątrz komory cieplnej zostały tak dobrane, aby odpowiadały warunkom panującym w okresach letnim i przejściowym wewnątrz nasłonecznionych pomieszczeń, zlokalizowanych w polskich warunkach klimatycznych”. W jaki sposób oszacowano te warunki? Jakie były inne, poza słonecznymi, strumienie zysków ciepła (zyski wewnętrzne) oraz strat ciepła (na drodze wentylacji). Czy przyjęto, że zyski ciepła są częściowo eliminowane na skutek pracy systemu mechanicznego chłodzenia czy też założono, że pomieszczenie jest pomieszczeniem o niekontrolowanych parametrach powietrza w okresie lata? Doprecyzowanie odpowiedzi na powyższe pytania pozwoli odnieść założone warunki do rzeczywistych warunków eksploatacji.

Na stronie 38 podano, że badania kalorymetryczne przeprowadzone były przez firmę Netzsch. Czy oznacza to, że nie były one wykonane osobiście przez Doktorantkę? Używanie określenia kalorymetr DSC jest niewłaściwe gdyż skrót DSC oznacza Differential Scanning Calorimeter i sam w sobie zawiera słowo kalorymetr. Jak rozumiem wyniki przedstawione na rysunkach 2.3.3 i 2.3.4 dotyczą Micronalu, nie zaś samego MFZ zamkniętego w polimerowej otoczce?

Czy pomiary przewodności cieplnej (str. 39) wykonywane były jednokrotnie, czy też stosowano powtórzenia a jeżeli tak to na podstawie ilu wyników cząstkowych oszacowano wynik końcowy? Małe różnice w uzyskanych wynikach pomiędzy różnymi stanami skupienia są z pewnością efektem niewielkiej zawartości MFZ w całkowitej masie płyty.

Początek aktywnego działania MFZ określony w tabeli 2.3.3 (str. 58) poprzez temperaturę powietrza kwalifikuje materiał PCM 26 jako nieprzydatny pod względem komfortu cieplnego (temperatura powietrza 29,3 - 31,8°C).

W sprzeczności są fragmenty opisu płyty Dupont w odniesieniu do płyt g-k (str. 74). Z jednej strony stwierdza się, że „gęstość powierzchniowa użytego w przypadku płyty Dupont materiału akumulującego jest nieco mniejsza niż w przypadku płyt gipsowych” po czym dwa paragrafy poniżej można znaleźć stwierdzenie „Cienka warstwa oraz skondensowana postać PCM w płytach Dupont ...”. W jaki sposób szacowano gęstość powierzchniową użytego MFZ?

Co Autorka rozumie pod pojęciem „niski stopień przegrzewania wnętrza” użytym w opisie na stronie 74? Określenie to jest mało precyzyjne.

Kolejna uwaga dotyczy jednoznacznego doprecyzowania pojęcia histerezy. Czy rozumiana jest ona jako przesunięcie względem siebie zakresu temperatur w jakich uwalniana jest poszczególna ilość energii i nazywanej często przechłodzeniem lub przegrzaniem materiału? Taką interpretację można by przyjąć na podstawie informacji zawartych m.in. na stronie 74 oraz podczas opisu zasad modelowania zjawiska histerezy, pkt. 3.2.3 i 3.3. Inną definicję znaleźć można na stronie 82, gdzie histereza jest opisana jako „różnica pomiędzy ilością energii niezbędnej do roztopienia materiału i jego scalenia” co jak dalej pisze Autorka jest trudne do wyjaśnienia „z perspektywy prawa zachowania energii”. Tym bardziej, że „różnice dochodzą nawet do 15%”.

Zgodnie z opisem na stronie 122 wykonano badania kalorymetryczne osnowy gipsowo-kartonowej oraz czystego PCM. Proszę o wyjaśnienie co rozumiane jest pod pojęciem osnowy gipsowo-kartonowej? Czy chodzi o gips zawarty pomiędzy dwiema warstwami kartonu? Czy badania czystego PCM przeprowadzono rzeczywiście dla samego MFZ czy też dla Micronalu? Dlaczego nie przebadano właściwego kompozytu tj. Micronal + płyta g-k.

Proszę o wyjaśnienie budowy przegrody typu „dach” pokazanej w tabeli 4.1.1 (str. 130). Czy budowa ta jest racjonalna i jak ten układ warstw koresponduje z modelem 650FF? Jakie dane dotyczące współczynnika emisji powierzchni przyjęto w obliczeniach temperatury

promieniowania przegród (pkt. 4.1.2)? Czy powierzchnia ściany pokryta materiałem Dupont miała współczynnik emisji taki jak tradycyjna folia aluminiowa i jak taki sposób wykończenia powierzchni mógł wpłynąć na uzyskany wynik? Ma to znaczenie w przypadku porównania wyników uzyskanych dla płyty Dupont oraz g-k pokazanego na rysunku 4.1.5 (str. 134).

Wątpliwe jest stwierdzenie umieszczone na stronie 139, że „łatwy dostęp do zmodyfikowanego przez autorkę programu symulacyjnego, uwzględniającego histerezę PCM, może także spowodować powszechniejsze stosowanie w budownictwie tańszych, nieorganicznych materiałów charakteryzujących się dużą histerezą”. Natomiast z pewnością pozwoli on dokładniej szacować ewentualne korzyści energetyczne wynikające z ich zastosowania.

W punkcie 4.2 nie określono dla jakich danych wykonano symulacje. Stwierdzenie, iż „Promieniowania słoneczne nie dociera do wewnętrznej powierzchni przegrody północnej co skutkuje zerową wartością zysków ciepła dla tej powierzchni w analizowanym okresie czasu” (str. 141) jest niepoprawne z fizycznego punktu widzenia. Idąc tym tokiem rozumowania należałoby przyjąć, że każda przegroda do której nie dociera promieniowania słoneczne będzie charakteryzowała się stałą temperaturą, pomimo wzrostu temperatury w samej strefie. Równie kontrowersyjne jest kolejne zdanie „Bezpośrednie promieniowanie słoneczne oraz promieniowanie odbite skutkuje tylko niewielkimi zyskami ciepła dla wewnętrznych powierzchni przegród” jak i zdania kolejne. W przypadku przyszłych publikacji, zaleca się przeredagować fragment tekstu znajdujący się na stronie 141. Model budynku zaproponowany i zilustrowany na rysunku 4.2.3 (str. 142) jest natomiast mało realny i rzadko występujący w architekturze, szczególnie budynków wielokondygnacyjnych.

W przypadku analizowania układów wielowarstwowych składających się z różnych MFZ (np. pkt 4.4.) proszę o doprecyzowanie jak uwzględniono w modelu obliczeniowym przewodzenie ciepła przez poszczególne warstwy MFZ oraz opory kontaktowe? Czy stosowanie wielu warstw jest uzasadnione w sytuacji, gdy nie jest możliwe schłodzenie pojedynczej warstwy materiału.

6. Uwagi o charakterze edytorskim i ogólnym

Graficzne przedstawienie wyników w postaci wykresów nie jest spójne. Część z nich posiada tło szare, część zaś białe. Czcionki na wykresach różnią się, sprawiając wrażenie, że pochodzą one z różnych, wcześniejszych opracowań i nie były ujednolicone podczas

ostatecznego formatowania rozprawy. Oś pozioma w połowie wykresu powoduje, że staje się on mniej czytelny. Jednostki przy opisach osi są w niektórych przypadkach pozbawione odpowiednich indeksów.

Mylącym jest nazywanie zmian strumienia ciepła w czasie energią zmagazynowaną, np. rys. 2.3.15, tym bardziej, że na osi pionowej użytą jednostką jest W/m^2 . Aby określić wielkość energii należałoby ten strumień scałkować.

Rysunek 2.3.5 przedstawia wyniki ciepła właściwego uzyskane dla zwykłej płyty g-k, czyli tak naprawdę gipsu, nie zaś ciepła utajonego przemiany MFZ (opis str. 38).

W tabeli 2.4.1 nie podano jednostek poszczególnych wielkości. Nie wyjaśniono co oznaczają grupy A, B, C i D. Długość okresu chłodzenia przed rozpoczęciem cyklu na poziomie 72 godzin jest chyba błędem?

Str. 4, użyto sformułowania „akumulowania ciepła na drodze utajonej przemiany fazowej”, jednakże każde magazynowanie ciepła na drodze przemiany fazowej jest magazynowaniem ciepła utajonego;

Str. 4, użyto sformułowania „zmodyfikowano program”, a tak naprawdę zmodyfikowano procedurę obliczeniową uwzględniając zjawisko histerezy;

Str. 11, jest „cieplnych” powinno być „ciepła”;

Str. 17, jest „łatwopalności”, powinno być „niepalność”;

Str. 17, jest „mur”, powinno być „ceramika”;

Str. 21, jest „nazmienne”, powinno być „na zmienne”;

Str. 29, jest „frazowo-zmiennego”, powinno być fazowo zmiennego”;

Str. 32, jest „Zastosowania”, powinno być „Zastosowana”;

Str. 63, pojawia się niezrozumiałe sformułowanie „jest poprawna uwzględnienie zaobserwowanej”;

Str. 67, jest „mierzonyej” powinno być „mierzonej”;

Str. 73, tabela 2.4.2, wiersz 7, brak jednostki temperatury;

Str. 100, jest „c”, powinno być „ C_{eff} ”;

Str. 101, jest „c”, powinno być „ c_d ”;

Str. 115, tabela 3.4.1 jest „14-87”, powinno być „14,87”.

7. Wniosek końcowy

Uwagi jakie zawarłem w swojej opinii w dużym stopniu mają charakter dyskusyjny i nie podważają w istotny sposób wartości naukowej pracy, jak również nie obniżają bardzo pozytywnej oceny samej Doktorantki. Stwierdzam, że Autorka opracowania podejmując istotny problem badawczy rozwiązała go samodzielnie, poprawnymi metodami naukowymi przez co wykazała się umiejętnością wymaganą od osób ubiegających się o stopień doktora. Otrzymane wyniki wnoszą nowe elementy do wiedzy nt. efektywności energetycznej stosowania komponentów modyfikowanych MFZ w budownictwie jak i metod jej obliczania, które obok aspektu poznawczego posiadają również istotną wartość utylitarną.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anny Zastawnej-Rumin pt.: „Analiza efektywności stosowania materiałów fazowo zmiennych w przegrodach polskich budynków niskoenergetycznych” spełnia wymagania art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki wraz z późniejszymi zmianami, dlatego wnioskuję do Rady Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej o jej przyjęcie i dopuszczenie Kandydatki do publicznej obrony.

Ponadto uważam, że z uwagi na:

- szeroki zakres przeprowadzonych badań i kompleksowe rozwiązanie problemu,
- udoskonalenie modelu matematycznego wykorzystywanego w jednym z wiodących narzędzi do symulacji energetycznych budynków,
- trafnie sformułowane wnioski oraz autorski, uproszczony algorytm doboru okładzin modyfikowanych MFZ,

zasługuje ona na wyróżnienie.



Dr hab. inż. Dariusz Heim, prof. PŁ