

Białystok 20.02.2020

dr hab. inż. Irena Ickiewicz , prof. PB
15-351 Białystok
ul. Wiejska 45 E
Wydział Budownictwa i Nauki o Środowisku

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Musiała

pt **”Analiza efektywności energetycznej przezroczystych przegród
budowlanych modyfikowanych materiałami zmiennofazowymi”**

wykonaną pod kierunkiem dr hab. inż. Lecha Lichołaja, prof. PRz

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzję opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukaszewicza z dnia 15.01.2020, umowa o dzieło Nr.NN/382/2020.

2. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa liczy 256 strony w tym 231 stron tekstu zasadniczego rozprawy, 25 stron zawierających bibliografię i wykaz innych źródeł. Wykaz literatury zawiera 161 pozycji, w tym 141 publikacji, 17 adresów stron internetowych i 3 akty ustawodawcze.

Na początku pracy podano wykaz ważniejszych oznaczeń, wybrane symbole greckie oraz wykaz skrótów i akronimów. Po kilkustronicowym wstępie (znumerowanym jako rozdział 1) zamieszczono zasadniczy tekst rozprawy składający się z sześciu rozdziałów oraz podsumowania i wniosków. Na końcu przedstawiono propozycje dalszych badań oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

W rozdziale **drugim** opisano aktualny stan wiedzy w zakresie przedmiotu badań dotyczącego współpracy cieplnej przegród przezroczystych z materiałami zmiennofazowymi .

W pierwszym podrozdziale opisano usłonecznienie, system zysków bezpośrednich, oraz pośrednich. Następnie podano podstawowe zależności wymiany ciepła przez przegrody nieprzezroczyste z uwzględnieniem złożonej wymiany ciepła (konwekcji i radiacji).

W kolejnym podrozdziale przedstawiono efektywność energetyczną pasywnych systemów słonecznych oraz metody jej wyznaczania (metody empiryczne, analityczne, numeryczne i korekcyjne).

W dalszej kolejności omówiono materiały zmiennofazowe (PCM) stosowane w budownictwie, współpracujące z przegrodami nieprzezroczystymi i przezroczystymi, funkcjonowanie PCM w akumulatorze ciepła oraz modelowanie magazynowania ciepła uwzględniające przemianę fazową.

Rozdział **trzeci** zawiera tezę cel i zakres pracy.

W rozdziale **czwartym** przedstawiono charakterystykę stanowisk badawczych laboratoryjnych i poligonowych, użytą do badań, aparaturę, materiały i odczynniki. W związku z tym, że Autor pracy podjął się samodzielnego wytworzenia materiału zmiennofazowego, stąd też zostały opisane niezbędne zadania badawcze, związki chemiczne i ich mieszaniny, dokonano również doboru estrów charakteryzujących się niskimi temperaturami krzepnięcia i topnienia.

Jednym z niezbędnych badań uzupełniających dotyczących wytworzonego autorskiego materiału zmiennofazowego, było określenie jego zmian właściwości fizycznych i chemicznych w czasie. Badania zostały przeprowadzone w komorze klimatycznej na nowo opracowanym PCM oraz na 2 referencyjnych materiałach zmiennofazowych przez okres 2200 cykli przemian fazowych, co odpowiada 6-letniego funkcjonowania badanego materiału.

Kolejne zadanie to opracowanie szczelnej powłoki polimerowej umożliwiającej utrzymywanie roztopionego materiału zmiennofazowego w zadanym miejscu, przeprowadzono również szczegółowe badania wpływu materiału zmiennofazowego we współpracy z wewnętrzną żaluzją pionową wykonaną z profili aluminiowych.

Badania eksperymentalne były prowadzone w komorze klimatycznej, w której umieszczano 2 jednakowe zbiorniki w kształcie walca. Taka konstrukcja stanowiska laboratoryjnego pozwalała rejestrować w czasie ilość energii niezbędnej do całkowitego roztopienia PCM.

Poza badaniami laboratoryjnymi były prowadzone badania na stanowisku poligonowym zlokalizowanym na terenie Politechniki Rzeszowskiej w okresie od listopada 2016 do kwietnia 2017. Celem badań była ocena wpływu zastosowania wewnętrznej żaluzji poziomej, zawierającej w swoim profilu materiał PCM, na efektywność cieplną znajdującego się przy niej okna. Rozwiązanie z zastosowaniem w/w żaluzji pod nazwą „Mobilna izolacja okienna” było zgłoszone w 2015 roku jako międzynarodowy patent.

W dalszej kolejności autor analizował problemy techniczne związane z funkcjonowaniem mobilnej izolacji okiennej. Podstawowym problemem są duże zmiany objętości PCM wraz ze zmianą ich stanu skupienia sięgające 10-15%. Stąd też została zaproponowana przez Autora powłoka kopolimerowa na bazie octanu winilu i akrylanów alkilowych. Kolejny problem techniczny to zapewnienie szczelności, co zostało rozwiązane przez autora, który zaproponował wypełnienie wnętrza profili niewielką ilością wody, która charakteryzuje się większą gęstością w stosunku do PCM.

Aby poprawić efektywność energetyczną przegrody przezroczystej, zaproponowano zastosowanie skrzynki zawierającej PCM w przestrzeni między pakietami szybowymi, która została pokryta powłoką absorbcyjną. Aby zweryfikować zaproponowane rozwiązania dot. poprawy efektywności cieplnej, przeprowadzone zostały badania w izotermicznej komorze. Podobne badania przeprowadzono na drugim stanowisku badawczym znajdującym się w pomieszczeniu biurowym budynku Politechniki Rzeszowskiej. Badania były prowadzone w okresie sezonu grzewczego.

W rozdziale **piątym** przedstawiono uzyskane wyniki badań dotyczących; starzenia materiału PCM, szczelności, procesu topienia materiału zmiennofazowego w profilu aluminiowym. Przedstawiono również (w postaci wykresów) wartości temperatur na wewnętrznych powierzchniach szyby w części z żaluzją referencyjną i z PCM. Na kolejnych wykresach przedstawiono termogramy dla 9 różnych składów autorskiego materiału zmiennofazowego. Analizę statystyczną wyników doświadczalnych przeprowadzono w programie Statistica 12.

W związku z uzyskaniem zadawalających wyników kalorymetrycznych autor w 2018 uzyskał patent dot. *Materiału zmiennofazowego jak i sposobu wytwarzania*.

Kolejnymi wynikami zaprezentowanymi w rozdziale piątym, były wartości uzyskane z badań doświadczalnych dotyczących mobilnej izolacji okiennej. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów temperatury powietrza wewnętrznego w części z żaluzjami z PCM w zależności od czasu. Badania były wykonywane w kwietniu i maju 2017 r. Przedstawione wykresy temperatur i gęstości strumienia ciepłego potwierdziły stabilizujący wpływ, zastosowanego w żaluzji PCM, na dobowe zmiany temperatury przeszkleń i powietrza wewnętrznego podczas dni słonecznych.

W dalszej kolejności przedstawiono wyniki badań doświadczalnych okna zespolonego z poduszką zmiennofazową. Zaprezentowane na 19 wykresach wyniki dla 6 różnych kombinacji pakietów szybowych potwierdziły **stabilizujący wpływ akumulatora** ciepła z PCM na wartość temperatur i gęstości strumienia ciepła na wewnętrznej powierzchni pakietów szybowy w stosunku do okna referencyjnego.

Podobne badania okna zespolonego z poduszką zmiennofazową przeprowadzone były przy wykorzystaniu komercyjnego materiału zmiennofazowego (RT28).

Rozdział **szósty** zawiera analizę wyników badań.

Do analizy uzyskanych wyników został wykorzystany program numeryczny MATLAB 18b. Zastosowany model opisuje niestacjonarny przepływ ciepła poprzez równania metody różnic skończonych w układzie jawnym jednowymiarowym.

Wykorzystanie programu numerycznego pozwoliło na powiązanie zmiennych w czasie, wartości natężenia promieniowania słonecznego, temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego oraz dystrybucji ciepła w obrębie akumulatora z gęstością strumienia cieplnego na wewnętrznej powierzchni przeszklenia analizowanego okna.

W dalszej kolejności przedstawiono model okna zespolonego z poduszką powietrzną, gdzie przyjęto jednowymiarową wymianę ciepła w obrębie okna z przestrzenią jednoszybową oraz dwuwymiarową dla znajdującego się wewnątrz jej akumulatora. Wybór jednowymiarowego modelu wymiany ciepła w analizowanym przypadku został uzasadniony koniecznością założonych uproszczeń.

Dla zaproponowanego rozwiązania wykonana została również analiza efektywna pojemność cieplna zastosowanego wewnątrz absorbera materiału zmiennofazowego. Do określenia rzeczywistej ilości stopionego i skrzepniętego PCM w kolejnych krokach czasowych wykorzystano modyfikowane równania wymiany ciepła metody różnic skończonych w układzie dwuwymiarowym.

W dalszej kolejności zamieszczone zostały wyniki (w postaci wykresów) uzyskane z modelu wartości rejestrowanych gęstości strumienia cieplnego w funkcji czasu (kroku czasowego) i uzyskanych z modelu w części referencyjnej. Na wykresach przedstawiono 6 różnych kombinacji użytych do badań pakietów szybowych (np. dla dwuszybowego pakietu zewnętrznego i trójszybowego wewnętrznego). Na końcu rozdziału zamieszczono analizę uzyskanych wyników teoretycznych i empirycznych. Przedstawiono końcowe wykresy przedstawiające „dopasowanie” wartości temperatur mierzonych i obliczeniowych. Uzyskane wyniki zostały uznane za dobre.

W rozdziale **siódmym** przedstawiono możliwości stosowania przezroczystych przegród z akumulacyjnym materiałem zmiennofazowym.

W tablicach i na wykresach zamieszczono wartości z symulacyjnych obliczeń wpływu okna zespolonego z poduszką zmiennofazową (OZzPZ) na straty i zyski ciepła dla 3 różnych lokalizacji (Rzeszów, Rzym, Helsinki). Wykonanie takich analiz pozwoliło na ocenę potencjalnych strat i zysków w zależności od 3 typów klimatu: śródziemnomorskiego, umiarkowanego i umiarkowanego chłodnego.

Ostatni **ósmym** rozdział zawiera podsumowanie i wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz, obliczeń i badań laboratoryjnych i terenowych..

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1. Wybór tematyki rozprawy

Jednym z problemów współczesnego świata jest narastający kryzys energetyczny, co pociąga za sobą konieczność szukania alternatywnych rozwiązań mających na celu redukcję zapotrzebowania na energię cieplną, niezbędną między innymi do ogrzewania budynków w okresie zimy i co raz częściej do chłodzenia w okresie lata. Jednym ze sposobów redukcji zapotrzebowania na nieodnawialną energię cieplną jest nie tylko stosowanie odnawialnych źródeł energii, ale również poszukiwania innych rozwiązań mających na celu zwiększenie efektywności energetycznej budynku. Jednym z takich rozwiązań może być optymalne wykorzystanie możliwych do zrealizowania modyfikacji materiałów i technologii np. w przegrodach przezroczystych.

Stąd też autor pracy, po szerokim przeglądzie literatury (161 poz), aktów ustawodawczych oraz norm, i dokonaniu dogłębnych analizach teoretycznych popartych badaniami doświadczalnymi, zaproponował nowe rozwiązania materiałowe jak i technologiczne pakietów szybowych, które w zauważalny sposób poprawiają efektywność energetyczną budynku.

Wyniki wstępnych badań własnych autora oraz brak danych literaturowych pod kątem prowadzonych badań oraz modeli prognozowania efektywności energetycznej, potwierdziły zasadność podjętego tematu.

Stąd też sformułowano, tezę, cel i zakres pracy, która brzmi następująco: **Istnieje możliwość poprawy efektywności energetycznej budowlanej przegrody przezroczystej poprzez modyfikację jej struktury lub elementów z nią współpracujących autorskim materiałem zmiennofazowym.**

3.2. Główne osiągnięcia rozprawy

Do głównych osiągnięć autora należy zaliczyć;

- opracowanie składu chemicznego i wyprodukowanie materiału zmiennofazowego co zaowocowało zgłoszeniem patentowym (12.04.2018),
- opracowanie powłoki polimerowej umożliwiającej utrzymanie roztopionego materiału w odpowiednim miejscu,
- gruntowne przeanalizowanie i zbadane istotnego zjawiska związanego ze starzeniem się autorskiego materiału PCM,
- zaprojektowanie i wykonanie (jako prototypu) mobilnej izolacji okiennej w postaci wewnętrznych żaluzji okiennych z wykorzystaniem autorskiego materiału zmiennofazowego PMC , rozwiązanie to jest przedmiotem międzynarodowego zgłoszenia patentowego (4.05.2015).

W celu wyłonienia optymalnych rozwiązań Autor przedstawił 6 różnych kombinacji użytych do badań pakietów szybowych (np. dla dwuszybowego pakietu zewnętrznego i trójszybowego wewnętrznego). Rozwiązanie te zostały poddane gruntownym badaniom laboratoryjnym i poligonowym. Zamieszczone wyniki z badań zaproponowanych rozwiązań pozwoliły na wyciągnięcie konstruktywnych wniosków.

Analizie poddano również wpływ klimatu zewnętrznego na efektywności energetycznej zastosowanych zmodyfikowanych pakietów szybowych. Wytypowane miasta to Rzym, Rzeszów i Helsinki , reprezentujące trzy typy klimatów śródziemnomorski, umiarkowany i umiarkowany chłodny.

Na uwagę zasługuje fakt , że w większości zaproponowanych, na podstawie analiz teoretycznych oraz modeli numerycznych, rozwiązań (materiałowych i technologicznych), wykonano weryfikację uzyskanych wyników. Badania mające na celu zweryfikowanie otrzymanych wartości były wykonywane zarówno w laboratoriach jak i na skonstruowanych przez autora poligonowych stanowiskach badawczych. Uzyskane wyniki z badań bezpośrednich potwierdziły słuszność przyjętych rozwiązań.

Recenzowana rozprawa w sposób całościowy obejmuje zagadnienia związane z poprawą efektywności energetyczną zaproponowanych rozwiązań w przegrodach przezroczystych. Uzyskane wartości poprawy efektywności energetycznej wyniosły od 30 do 40 procent.

Analizy i badania zostały przeprowadzone zgodnie z metodyką naukową. Na uwagę zasługuje fakt bardzo dużej liczby przeprowadzonych pomiarów jak i bardzo wnikliwa charakterystyka parametrów cieplnych, materiałowych z analizą ekonomiczną, technologiczną, oraz geometryczną (np. analizowane były współczynniki kształtu profili aluminiowych).

Praca posiada **dotychczasowy walor użytkowy**, ponieważ określenie wpływu zaproponowanych rozwiązań ma istotne znaczenie dla **poprawnego bilansu cieplnego budynku , a w konsekwencji poprawy efektywności energetycznej jako kolejnego kroku budownictwa zrównoważonego.**

Doktorant wykazał się bardzo dobrymi umiejętnościami prowadzenia badań naukowych, analizą uzyskanych wyników i formułowaniu poprawnych wniosków. Całość pracy i uzyskane rezultaty naukowe oceniam pozytywnie.

4. Uwagi i pytania

4.1. Uwagi i pytania o charakterze dyskusyjnym

1) Niezrozumiałe jest sformułowanie w **Celu pracy** ostatniego punktu (str. 56) brzmiącego;

Opracowanie prototypu mobilnej izolacji okiennej zawierającej materiał zmiennofazowy poprzez doświadczalne określenie jej wpływu na poprawę efektywności energetycznej okna poprzez zastosowanie tego rozwiązania zacięniającego?

O jakie rozwiązanie zacięniające tu chodzi ?

2) W pracy wspomina się o kosztach produkcji autorskiego PCM, stwierdzając , że wybrane przez autora estry, ze względu na swoje właściwości, były drogimi związkami chemicznymi, stąd autor

podjął decyzję o samodzielnym wytworzeniu w/w związków. Czy autor przeprowadził analizę opłacalności ekonomicznej w przypadku wprowadzenia swoich rozwiązań do powszechnego zastosowania?

3) W p.4.3.2 zamieszczono informacje dotyczące starzenia się autorskiego materiału zmiennofazowego. W badaniach przeprowadzono 2200 cykli przemian fazowych co odpowiada okresowi 6-letniego funkcjonowania cieplnego badanych materiałów, wydaje się, że jest to stosunkowo krótki okres. Czy to jest maksymalny okres gwarancji, co się będzie działo po tym okresie i czy planuje się kontynuowanie badań w tym kierunku?

4.2. Uwagi redakcyjne

Praca napisana jest w miarę poprawnie pod względem językowym, zredagowana w sposób poprawny i w miarę logiczny. Niestety autor ma tendencję do pisania bardzo długich zdań, co konsekwencji przedstawiony tekst jest niekoniecznie zrozumiały. Czytając tekst pracy odnosi się wrażenie lekkiego chaosu w przekazywaniu kolejnych „informacji”. Szczegółowe uwagi redakcyjne i usterki edytorskie zostały przekazane bezpośrednio autorowi pracy, który wprowadził odpowiednie poprawki.

Poza tym;

- str.32, 7 wiersz od góry jest liczba *prawdopodobieństwa* Grasshoffa powinno być liczba podobieństwa Grasshoffa

Przerecikowania wymagałyby wnioski, które powinny być napisane w bardziej przejrzysty sposób, zadania są zdecydowanie za długie, co powoduje, że istotne informacje gubią się w gąszczu dodatkowych danych.

5. Podsumowanie

Recenzowana rozprawa doktorska „**Analiza efektywności energetycznej przezroczystych przegród budowlanych modyfikowanych materiałami zmiennofazowymi**” stanowi oryginalne i pełne rozwiązanie przez Autora zagadnienia naukowego.

Do rozwiązania zagadnienia naukowego Doktorant użył właściwych, do postawionych celów, metod, technik i programów numerycznych. Rozprawa stanowi istotny wkład w naukowym ujęciu efektywności energetycznej obudowy budynku, a pośrednio budownictwa zrównoważonego.

W rozprawie Autor wykazał się szeroką wiedzą z zakresu literatury przedmiotu, badań oraz umiejętnością prowadzenia badań eksperymentalnych, poprawnej analizy i wyciągnięcia wniosków.

Podsumowując niniejszą recenzję stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Michała Musiała pt. „**Analiza efektywności energetycznej przezroczystych przegród budowlanych modyfikowanych materiałami zmiennofazowymi**” spełnia wszystkie warunki merytoryczne i formalne, którym powinna odpowiadać rozprawa doktorska, określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku- wraz z późniejszymi zmianami. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony i nadanie Autorowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Biorąc pod uwagę ogromny wkład autora w realizację badań nad materiałami zmiennofazowymi, duży dorobek publikacyjny z zakresu materiałów zmiennofazowych co skutkowało między innymi zgłoszeniami patentowymi (2015, 2018), wykonanie prototypu proponowanych rozwiązań, a następnie pozytywne zweryfikowanie zakładanych wyników efektywności energetycznej, upoważnia mnie do złożenia **wniosku o wyróżnienie rozprawy**.

Białystok 20.02.2020 r

dr hab. inż. Irena Ickiewicz, prof. PB

