

Lublin, dn. 29.03.2021 r.

dr hab. inż. Tomasz Cholewa, prof. uczelni  
Politechnika Lubelska  
Wydział Inżynierii Środowiska  
Katedra Jakości Powietrza Wewnętrznego i Zewnętrznego  
ul. Nadbystrzycka 40B  
20-618 Lublin  
e-mail: [t.cholewa@pollub.pl](mailto:t.cholewa@pollub.pl)  
tel.: +48 81 538 4424

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
**Pana mgr inż. Karola Bandurskiego**  
**pt. „Wpływ użytkowników na bilans energetyczny budynków mieszkalnych**  
**– badania i modelowanie”**  
przygotowana pod kierunkiem naukowym  
Promotora prof. dr hab. inż. Haliny Koczyk  
oraz Promotora pomocniczego dr inż. Andrzeja Górki

## **1. Podstawa formalna recenzji**

Podstawą formalną przygotowania przedmiotowej recenzji jest zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej w Poznaniu (pismo: WISIE.63.13.2021 z dnia 18.02.2021 r.).

## **2. Aktualność wyboru tematu i umiejscowienie tematyki badawczej**

Tematyka rozprawy doktorskiej została właściwie wybrana i wpisuje się w najnowsze trendy badań w obszarze dyscypliny *inżyniera środowiska, górnictwo i energetyka*.

Obecnie prowadzonych jest wiele badań przez osoby z różnych ośrodków naukowych na świecie, które są ukierunkowane na zwiększenie efektywności energetycznej w istniejących budynkach jak i projektowanych przy zachowaniu komfortu użytkowników.

W tym aspekcie rozwiązania związane z obniżeniem energochłonności są porównywane z potrzebami i oczekiwaniami użytkowników budynków. Jest to związane z faktem, że poziom zużycie ciepła na potrzeby ogrzewania, zależy nie tylko od konstrukcji budynku,

rodzaju zastosowanego systemu ogrzewania i jego regulacji, parametrów zewnętrznych, ale również od preferencji i zachowań użytkowników.

Dlatego też powstaje wiele modeli użytkowników na potrzeby możliwie dokładnego zobrazowania ich obecności w budynku, otwierania okien, przesłaniania żaluzji czy korzystania z oświetlenia sztucznego.

Z drugiej strony to właśnie wpływ użytkowników jest uważany przez wielu naukowców jako czynnik, który przyczynia się to różnicy pomiędzy wynikami obliczeń symulacyjnych (za pomocą zaawansowanych programów komputerowych) czy też powszechnie stosowanych algorytmów a rzeczywistym zużyciem ciepła w danym budynku (tzw. *performance gap*).

Jednak nadal brak jest uniwersalnego i łatwego w szerokiej aplikacji modelu zachowania użytkowników, który pozwoliłby w znaczącym stopniu zminimalizować opisaną powyżej różnicę. Zatem podjęta w niniejszej rozprawie problematyka modelowania zachowań użytkowników budynków i analizy ich wpływu na wykorzystanie energii w warunkach polskich jest tematem bardzo aktualnym i właściwie wpisuje się w aktualne trendy badawcze związane z efektywnością energetyczną.

Celem pracy było zbadanie i scharakteryzowanie sposobu użytkowania lokali mieszkalnych pod względem energetycznym. Dzięki realizacji tego celu będzie można dokładniej sformułować założenia odnośnie aspektów użytkowych w symulacyjnych analizach energetycznych oraz poznać czynniki i procesy odpowiedzialne za wysokość zużycia energii przez mieszkańców w budynkach wielorodzinnych.

Dlatego też podjęty temat ma znaczenie nie tylko poznawcze, ale również utylitarne, ponieważ może zostać wykorzystany jako skuteczne narzędzie w procesie zwiększania efektywności energetycznej budynków na etapie ich projektowania jak i eksploatacji.

### **3. Ocena merytoryczna pracy**

Oceniana rozprawa doktorska liczy 197 stron i zawiera 186 pozycji cytowanego piśmiennictwa, 71 rysunków w tekście pracy oraz 30 rysunków zamieszczonych w załącznikach. W rozprawie znajduje się streszczenie w języku polskim i angielskim. Cennym elementem rozprawy jest „*Lista symboli*”, która znajduje się na początku pracy.

Praca składa się z czterech części (*Wprowadzenie, Zebrane dane i wykorzystane narzędzia, Analiza i wyniki, Załączniki*) w skład, których wchodzi 11 rozdziałów. Strukturę prac uważam za kompletną, zaś podział na poszczególne rozdziały jest logiczny.

W rozdziale 1 (*Wstęp*) Doktorant przedstawił zagadnienia związane z efektywnością energetyczną i uwypuklił wpływ użytkowników na poziom zużycia energii w budynkach. Przedstawił główne kierunki badań prowadzonych w tym zakresie w Polsce i na świecie, również w ramach projektów badawczych IEA EBC związanych z wpływem użytkowników na zużycie energii w budynkach (Annex 53, 66 i 79). Na tej podstawie klarownie uzasadnił podjęcie tematyki swojej rozprawy i wskazał na aspekty, które wymagają prowadzenia badań. Przedstawione treści w tym rozdziale pokazują, że Doktorant dobrze orientuje się w aktualnej tematyce prowadzonych badań nad wpływem użytkowników na zużycie energii w budynkach.

Zdaniem recenzenta Doktorant, powinien w tej części pracy przedstawić więcej porównań (szczególnie zestawionych w tabelach lub na zbiorczych rysunkach), odnośnie prac badawczych (nie tylko projektów IEA EBC) już zrealizowanych w poszczególnych aspektach bezpośrednio związanych z tematyką pracy.

Rozdział 2 (*Cel i zakres pracy*) przedstawia cel pracy, którym było zbadanie i scharakteryzowanie sposobu użytkowania lokali mieszkalnych pod względem energetycznym. Realizacja tego celu miała pozwolić na dokładne sformułowanie założeń odnośnie aspektów użytkowych w symulacyjnych analizach energetycznych i poznać czynniki i procesy odpowiedzialne za wysokość zużycia energii przez mieszkańców w budynkach wielorodzinnych.

Przedstawiony cel pracy jest ambitny i ma charakter poznawczy.

W ramach tego rozdziału Doktorant sformułował również następujące tezy pracy:

1. Jest możliwe sklasyfikowanie gospodarstw domowych zarówno pod kątem sposobu użytkowania przestrzeni/lokalu, jak i sposobu interakcji z budynkiem, na podstawie danych pomiarowych, zbieranych poza granicą lokali mieszkalnych, i danych ankietowych,
2. Zużycia poszczególnych mediów przez gospodarstwa domowe są ze sobą skorelowane,
3. W budynkach wielorodzinnych ciepło na potrzeby grzewcze jest wykorzystywane w znacznie większej ilości niż wynika to z obliczeń teoretycznych opartych o obowiązujące normy czy regulacje prawne,
4. Wentylacja naturalna w budownictwie wielorodzinnym jest wykorzystywana nie tylko latem, ale również w sezonie grzewczym i przejściowym do dostarczenia

świeżego powietrza wg potrzeb fizjologicznych, jak i odprowadzenia chwilowo nadmiarowych zysków ciepła,

5. Na zużycie ciepła na cele c.o. przez lokale mieszkalne ma wpływ zarówno izolacyjność cieplna mieszkania, harmonogram jego użytkowania jak i strategia interakcji użytkowników z instalacją ogrzewczo-wentylacyjną.

Na potrzeby realizacji celu pracy jak i weryfikacji przedstawionych tez pracy Doktorant właściwie zaplanował część badawczą pracy (rozdziały 3-10), co zostało również przedstawione w klarowny sposób na rysunku 2.1.

W rozdziale 3 (*Badania zużycia mediów*) przedstawiona została charakterystyka badanych obiektów oraz metod pozyskiwania danych. Badania były prowadzone w czterech budynkach wielorodzinnych zasilanych z kotłowni gazowej o mocy około 370 kW. Na potrzeby ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej w poszczególnych mieszkaniach zastosowane były mieszkaniowe węzły cieplne.

Na potrzeby analiz w niniejszej rozprawie wykorzystano następujące pomiary:

- dobowe odczyty z ciepłomierzy (z 460 dni i 101 mieszkań);
- cotygodniowy (lub dwutygodniowy) odczyty z liczników energii elektrycznej (dla 105 mieszkań), wodomierzy wody zimnej (dla 105 mieszkań) i gazomierzy (101 mieszkań) przez 10 tygodni;
- dzienne odczyty z liczników energii elektrycznej (dla 36 mieszkań), wodomierzy wody zimnej (dla 36 mieszkań) i gazomierzy (35 mieszkań) przez 14 dni,
- 5 minutowe (z okresu styczeń 2014 - maj 2017) odczyty z ciepłomierza zlokalizowanego za głównym źródłem ciepła (kocioł gazowy).

Odpowiednio scharakteryzowano i oceniono proces badań ankietowych mieszkańców.

Na uwagę zasługuje również wnikliwa analiz Autora w zakresie skuteczności ankietyzacji jak i dokładności pomiarów wykorzystania ciepła.

Wątpliwości recenzenta budzą jednak wyniki w zakresie efektywności analizowanego systemu ogrzewczego (nawet powyżej 100%), które zostały przedstawione na rysunku 3.9.

Dlatego, zdaniem recenzenta pomocny byłby w tym rozdziale dodatkowy rysunek, na którym pokazane byłyby mierzone wartości wraz z ich oznaczeniami, szczególnie w zakresie dostarczanego ciepła, aby jednoznacznie pokazać tok obliczeń w tym zakresie.

Rozdział 4 (*Dane meteorologiczne, słoneczne zyski ciepła i obliczenia symulacyjne*) przedstawia charakterystykę danych pomiarowych w zakresie warunków meteorologicznych, które zbierane były na stacji pomiarowej usytuowanej na dachu budynku (około 25 m) nad

poziomem terenu i około 3 km od badanych obiektów. W rozdziale tym przedstawiono również założenia do obliczeń w programie TRNSYS na potrzeby symulacji zapotrzebowania na ciepło dla jednego z budynków.

Zdaniem recenzenta, w tym rozdziale powinny być przedstawione bardziej szczegółowe informacje z zakresu dokładności zastosowanych czujników parametrów zewnętrznych jak i częstotliwości archiwizacji danych.

Rozdział 5 (*Wykorzystane narzędzia statystyczne*) przedstawia charakterystykę wybranych przez Doktorant metod wnioskowania statystycznego i narzędzi statystycznych. W klarowny i dostosowany (przez Autora) do analiz w kolejnych rozdziałach sposób przedstawiono zagadnienia związane z testowaniem hipotez statystycznych, analiz zależności, wskaźników dopasowania zastosowanych modeli oraz metod grupowania obiektów. Tą część pracy uważam, za bardzo pomocną oraz pokazującą, że Doktorant bardzo dobrze orientuje się w wykorzystaniu narzędzi statystycznych, które są potrzebne, aby właściwie interpretować uzyskiwane wyniki badań.

Rozdział 6 (*Model różnicowania gospodarstw domowych*) pokazuje oryginalne podejście Doktoranta wykorzystane na potrzeby zdefiniowania typów gospodarstw domowych, które charakteryzują się podobnym sposobem użytkowania w aspekcie generowanych zysków ciepła. Na uwagę zasługuje fakt, że mimo ograniczonej liczby mierzonych parametrów w warunkach rzeczywistych, Autor określił wewnętrzne zyski ciepła oraz zapotrzebowanie na strumień powietrza wentylującego dla każdego lokalu na podstawie zużycia energii elektrycznej, gazu oraz harmonogramów użytkowania. Na te potrzeby przyjął szereg założeń, które zostały odpowiednio poparte ważnymi źródłami literaturowymi, co pokazuje, że Doktorant korzysta z powodzeniem z istniejącej literatury naukowej i umie ją aplikować na potrzeby rozwiązania konkretnych problemów obliczeniowych.

W rozdziale zatytułowanym *Zużycie c.w.u. i innych mediów* (rozdział 7) przedstawiono autorski sposób wyodrębnienia zużycie ciepła na cele c.o. i c.w.u. dla każdego mieszkania na podstawie sumarycznego zużycia ciepła dla danego mieszkania. Następnie

Wykonano korelację między charakterystyka gospodarstwa domowego i zużyciem poszczególnych mediów. Na tej podstawie zauważono, że zużycia ciepła na cele ogrzewania w małym stopniu zależy od intensywności zysków ciepła. Zastosowana metodologia i podejście obliczeniowe w tym rozdziale jest poprawne.

W tej części pracy Doktorant mógł dodatkowo porównać zaproponowaną metodę wyodrębnienia zużycie ciepła na cele c.o. i c.w.u. z innymi tego typu metodami, które są powszechnie wykorzystywane w praktyce inżynierskiej, aby pokazać wady i zalety proponowanego przez siebie podejścia.

W rozdziale 8 (*Porównanie obliczonego zużycia ciepła na cele c.o. z pomiarami*) Doktorant podkreślił, że sposób użytkowania instalacji grzewczo-wentylacyjnej wpływa na zużycie energii na dwa sposoby: bierny wynikający z harmonogramu użytkowania, ilości zysków ciepła i zapotrzebowania na świeże powietrze oraz aktywny wynikający ze sposobu w jaki użytkownicy regulują systemem energetycznym w celu uzyskania pożądanych warunków środowiska wewnętrznego. Dlatego na potrzeby wyznaczenia biernego wpływu oraz porównania teoretycznego i rzeczywistego zużycia ciepła przez analizowane budynki jak i poszczególne lokale, Autor wykorzystał w poprawny sposób opracowane wcześniej modele odnośnie określania zysków wewnętrznych i zapotrzebowania na powietrze wentylacyjne. W wyniki przeprowadzonych analiz stwierdził, że zużycie ciepła na cele c.o. przez budynki mieszkalne jest od 70 do 130 % wyższe niż wynikające z miesięcznych analiz symulacyjnych oraz, że zyski słoneczne i wewnętrzne stanowią około 2/3 strumienia ciepła przekazywanego do budynków w trakcie teoretycznego sezonu ogrzewczego. Podkreślił również, że znaczącym czynnikiem, który wpływa na nadmierne zużycie ciepła przez lokale mieszkalne jest niewykorzystanie zysków ciepła z uwagi na ich chwilową dużą intensywność, której mała pojemność cieplna lokali nie jest w stanie zakumulować.

Zdaniem recenzenta Doktorant powinien zwrócić przy tego typu analizach większą uwagę na utrzymywaną w pomieszczeniach ogrzewanych wartość temperatury wewnętrznej (najlepiej rzeczywistą), która może się znacznie różnić od wyników badań ankietowych oraz na rzeczywistą wartości strumienia powietrza wentylującego.

W ramach rozdziału 9 (*Model użytkowania instalacji grzewczo-wentylacyjnej*) Doktorant z powodzeniem podjął próbę, interpretacji interakcji użytkownik-budynek w oparciu o zebrane dane. Ciekawym i nowym podejściem było określenie przez Autora

wpływu użytkowników na podstawie wyników pomiarów prowadzonych tylko na zewnątrz lokalu a nie w samych lokalach.

Weryfikacji poddał dwa przypadki, z których pierwszy opierał się na modelu ekwiwalentnego strumienia powietrza wentylacyjnego ( $ACH_{eq}$ ), a drugi na modelu opisującym regulację grzejników za pomocą zaworów termostatycznych.

Autorski algorytm wyboru równania dla modelu  $ACH_{eq}$  przedstawił w klarowny sposób na rysunku 9.6.

Na podstawie analiz stwierdził, że użytkownicy sterują bezpośrednio strumieniem wentylacyjnym a nie wielkością otworu okiennego oraz naświetlił problemy, które mogą utrudniać prostą implementację tego typu modeli w innych budynkach bez przeprowadzenia szczegółowych analiz w zakresie intensywności strumienia wentylującego dla danego stopnia otwarcia przy danej różnicy ciśnień.

Zdaniem recenzenta sformułowanie pojawiające się wielokrotnie w tym rozdziale „sterowanie strumieniem wentylacyjnym” nie jest trafne dla przedmiotach budynków, ponieważ w analizowanych budynkach występuje układ wentylacji naturalnej, grawitacyjnej, który nie ma dokładnej (w ujęciu inżynierskim) możliwości sterowania wielkością strumienia przez użytkowników.

W kolejnej części tego rozdziału zostały przedstawione w ciekawy i klarowny sposób autorskie modele w zakresie użytkowania instalacji ogrzewczej. Doktorant po wykonaniu analizy w zakresie poziomów mocy z jakim są użytkowane grzejniki oraz strategii ich regulacji, stwierdził, że tylko jeden sposób wykorzystuje idee, z jaką zostały zaprojektowane zawory termostatyczne i praktykuje go tylko 19% lokali.

W ramach rozdziału 10 poprawnie wyznaczono rzeczywisty współczynnik wykorzystania zysków oraz pokazano, że przyjmuje on wartości niższe niż teoretyczny dla analizowanych obiektów. Doktorant zauważył również, że niższy poziom wykorzystanie zysków ciepła występuje w okresie wiosennym w porównaniu do okresu jesiennego.

Ostatni rozdział to *Wnioski i kierunki dalszych prac*. W tej części rozprawy Doktorant w jasny i klarowny sposób pokazuje, że postawione wcześniej tezy pracy są spełnione. Jest to podparte wynikami przeprowadzonych badań eksploatacyjnych oraz wnikliwymi analizami Autora prac, które były prowadzone na dobrym poziomie naukowym.

Uzupełnieniem tej części pracy są propozycje Autora w zakresie dalszych badań w tym zakresie.

#### **4. Uwagi do pracy**

##### Uwagi o charakterze ogólnym:

Mimo, że wyniki mają charakter użytkowy, Doktorant powinien w bardziej jasny sposób podkreślać ich uniwersalny charakter oraz możliwości szerokiego wykorzystania. Można to było zrobić w różnych częściach pracy przy pokazywaniu zalet i wad przedstawianych algorytmów, czy też przy porównywaniu ich z obecnie wykorzystywanym podejściem w danym zakresie.

##### Uwagi o charakterze redakcyjnym:

W rozprawie pojawiają się pewne nieścisłości nomenklaturowe, w szczególności: „powierzchnia grzewcza grzejna”, „zużycie wody grzewczej [m<sup>3</sup>/d]”, „ciepło na potrzeby grzewcze”, „sezon grzewczy”.

#### **5. Wnioski końcowe**

Pan mgr inż. Karol Bandurski przedstawił do oceny ciekawą rozprawę, którą oceniam bardzo pozytywnie. Układ i zawartość pracy jest odpowiedni i przemyślny. Przedstawione uwagi i sugestie w ramach rozdziału 3 oraz rozdziału 4 recenzji nie wpływają na wartość merytoryczną rozprawy oraz na pozytywny odbiór całości rozprawy.

Pan mgr inż. Karol Bandurski wykazał się bardzo dobrą znajomością wiedzy teoretycznej i umiejętnościami praktycznymi w zakresie prowadzonych badań eksploatacyjnych oraz symulacyjnych. Przedstawiona dyskusja otrzymanych wyników (wykonana przy wykorzystaniu wielu narzędzi statystycznych) oraz ich późniejsza, poprawna interpretacja świadczą o odpowiednim przygotowaniu Doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Tematyka rozprawy doktorskiej została właściwie wybrana i wpisuje się w najnowsze trendy badań w obszarze dyscypliny *inżyniera środowiska, górnictwo i energetyka*.

Podsumowując moją recenzję stwierdzam, że oceniana rozprawa doktorska mgr inż. Karola Bandurskiego p.t. „Wpływ użytkowników na bilans energetyczny budynków mieszkalnych – badania i modelowanie” spełnia wszystkie wymagania określone przez Ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (tekst jednolity Dz. U. nr 0 z 2014, poz. 1852) stawiane rozprawom



doktorskim. Wnioskuje do Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Karola Bandurskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Biorąc pod uwagę zakres pracy wnioskuje również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Karola Bandurskiego.

Lublin, dn. 29.03.2021 r.



.....

dr hab. inż. Tomasz Cholewa