prof. dr hab. inż. Władysław Szaflik
Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ciepłownictwa
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego
70-310 Szczecin
e-mail: wladyslaw.szaflik@zut.edu.pl

Szczecin, 30.czerwca 2016 r.

R E C E N Z J A

Pracy doktorskiej **mgr inż. Michała Klimasa**

p.t. ***„Metoda wspomagania wyboru systemu technicznego wyposażenia budynków pasywnych”***

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzje opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej w Poznaniu (pismo: WB/ 107/ 2016 z dnia 23.03.2015 r.). Podstawą opracowania jest egzemplarz pracy doktorskiej, literatura naukowa dotycząca zakresu pracy oraz wyniki badań własnych.

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa dotyczy metody wyboru racjonalnego rozwiązania systemu technicznego wyposażenia budynków (STWB). Podano przykład zastosowania opracowanej przez doktoranta metody do wyboru układu instalacji przygotowania ciepłej wody.

Doktorant na wstępie pracy podał uzasadnienie tematyki pracy, następnie scharakteryzował budynki pasywne i omówił stosowane systemy technicznego ich wyposażenia ze szczególnym uwzględnieniem tych systemów do pracy, których potrzebne jest ciepło.

W dalszej kolejności opisał stosowane kryteria oceny i metody wyboru systemów technicznego wyposażenia budynków (STWB). Szczególną uwagę zwrócił na oceny: energetyczną, egzergetyczną, ekonomiczna i środowiskową. Dalej omówił metody wyboru systemu, stwierdził, że najczęściej stosowane są metody MCDM, zaś kluczowym aspektem przy ich korzystaniu z nich jest wybór modelu preferencji decydenta.

Następnie Autor sformułował cel i tezy rozprawy. Głównym celem badawczym rozprawy było stworzenie algorytmu wspomagającego decydentów przy wyborze systemów technicznego wyposażenia budynków pasywnych, zapewniających odpowiednie parametry komfortu użytkowania. Kluczowym elementem opracowanej metodyki było zastąpienie subiektywnie wybieranych kryteriów wyboru oceny STWB przez decydenta, opracowanym na podstawie wyników badań statystycznych grupy ekspertów modelem preferencji.

W pracy można wyróżnić dwa podstawowe merytoryczne części pracy – w pierwszej z nich Doktorant przedstawia udoskonalony przez siebie algorytm wspomagania wyboru systemu technicznego wyposażenia budynku, a w drugiej weryfikację opracowanego algorytmu na podstawie opracowanych przez siebie numerycznych modeli układów przygotowania ciepłej wody dla rzeczywistego obiektu. Na końcu tej części przedstawia obszerną dyskusję wyników obliczeń. Doktorant rozprawę kończy podaniem wniosków w których stwierdza, że udowodnił postawione tezy i w ten sposób osiągnął postawiony cel pracy.

Rozprawa zawiera 6 rozdziałów samej pracy, jej streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń, bibliografię oraz dziewięć załączników, wśród nich zawarto wyniki analizy statystycznej, dane wejściowe do programu TRNSYS oraz wyniki przeprowadzonej analizy wielokryterialnej. Bibliografia jest obszerna (180 pozycji) i obejmuje najważniejsze prace badawcze z przedmiotowej literatury. Rozprawa liczy 135 stron tekstu samej pracy, zamieszczono w niej 27 tabel i 69 rysunków.

Rozdział pierwszy nosi tytuł „Wprowadzenie", Autor na początku przedstawia i analizuje w nim zużycie i strukturę zużycia energii na świecie oraz emisję dwutlenku węgla. Z analizy tej wypływa wniosek, że najefektywniejszym i najpopularniejszym rozwiązaniem pozwalającym na ograniczenie ilości ciepła i emisji CO_2 jest ograniczenie zużycia energii w budownictwie poprzez stosowanie budynków niskoenergetycznych i pasywnych.

W rozdziale drugim o tytule „Charakterystyka budynków pasywnych" Doktorant na początku krótko je charakteryzuje, prezentując ich parametry architektoniczno-budowlane, następnie porównuje zapotrzebowanie na ciepło przez budynki wykonane w różnych latach i budynki pasywne, przedstawia też zalecenia dotyczące poszczególnych elementów konstrukcji i wyposażenia budynku oraz zasad jego projektowania. Następnie podaje charakterystykę systemu technicznego wyposażenia budynków pasywnych ze szczególnym omówieniem instalacji ogrzewania i wentylacji.

Rozdział trzeci nosi tytuł „Kryteria oceny i metody wyboru systemów technicznego wyposażenia budynków". Przy wyborze systemów technicznego wyposażenia budynków niekiedy niezbędne jest przeprowadzenie oceny różnych stosowanych rozwiązań. Dotychczas

w analizach powszechnie była stosowana zasada maksymalizacji korzyści i minimalizacji kosztów. Obecnie występuje konieczność rozszerzenia kryteriów oceny rozwiązań o czynniki ekologiczne, ekonomiczne i społeczne, analizowane w czasie życia budynków. Autor po krytycznym scharakteryzowaniu stosowanych kryteriów oceny oraz metod wyboru optymalnego rozwiązania STWB, stwierdza, że dotychczas stosowane metody rozwiązania problemu decyzyjnego wyboru są niewystarczające, ponieważ wynikają z subiektywnych preferencji decydentów. Autor uważa, że zaproponowana przez niego metoda oparta na algorytmie, w którym modele preferencji decydenta określane są na podstawie badań statystycznych grup ekspertów jest bardziej obiektywna. Następnie określa cel rozprawy i stawia jej tezy.

W rozdziale czwartym o tytule „Algorytm wspomagania wyboru systemu technicznego wyposażenia budynku" Doktorant omawia udoskonalony przez siebie algorytm. Na początku tego rozdziału przedstawia budowę przyjętego algorytmu, składa się on z czterech części, część pierwszą stanowi baza danych parametrów oraz wymagań technicznych budynku, w segmencie drugim następuje identyfikacja dopuszczalnych i akceptowalnych wariantów rozwiązań systemu, w trzecim zachodzi budowa modelu preferencji decydenta na podstawie analizy ankiet ekspertów, zaś w czwartym analiza i wybór rozwiązania kompromisowego na podstawie znormalizowanej macierzy obserwacji – normalizacja następuje poprzez przyporządkowanie odpowiednich miar z przedziału od zera do jeden. Aby ocena była bardziej wiarygodna Doktorant proponuje fuzzyfikację parametrów charakteryzujących analizowane rozwiązania. W dalszej kolejności, w tym rozdziale omawia budowę modelu preferencji decydenta. Aby go sformułować opracowuje kwestionariusz ankietowy (test), wybiera odpowiednią grupę respondentów, przeprowadza badania ankietowe i analizę statystyczna otrzymanych wyników. Na początku opracowuje kwestionariusz próbny i przedstawia go pilotażowej grupie ekspertów, po ich uwagach opracowuje jego wersję ostateczną. Przy analizie wyników uwzględnia kompetencje respondentów wynikające z ich samooceny. Na końcu rozdziału umieszcza opis wybranych kryteriów oceny.

Rozdział piąty zatytułowany „Zastosowanie algorytmu do wybranego studium przypadku" poświęcony jest analizie stosowalności algorytmu wyboru STWB. W pierwszym podrozdziale Doktorant przedstawia analizowane warianty układu przygotowania ciepłej wody i charakteryzuje ich działanie. Podrozdział drugi poświęcony jest walidacji istniejącego układu przygotowania ciepłej wody w rzeczywistym budynku. Modelowanie pracy układu przeprowadzono przy pomocy programu komputerowego TRNSYS 17. Program składa się z modułów modelujących elementy układu takich jak: kolektory słoneczne, zasobniki, wymienniki ciepła itd. Rzeczywisty układ wyposażony był w zestaw kolektorów słonecznych

(płaskich i próżniowych), płytowy wymiennik ciepła, zbiornik wstępnego podgrzewu, pompy obiegowe oraz układ sterujący. Obliczenia wykonano dla okresu roku z krokiem czasowym wynoszącym 10 minut, wykorzystano zarchiwizowane dane meteorologiczne i dane z systemu zaopatrzenia w ciepło budynku. Przeprowadzono kalibrację elementów modelu. Zastrzeżenia mogą budzić piki temperatury nośnika ciepła wypływającego z kolektorów (rys.5.20). Oprócz powyższego zastrzeżenia pozostałe wyniki przeprowadzonej walidacji układu w zasadzie można przyjąć za zadawalające. Po przeprowadzeniu walidacji Doktorant wykorzystując zgromadzone dane przeprowadził symulacje numeryczne wybranych układów przygotowania ciepłej wody w badanym budynku. Wynikiem przeprowadzonej symulacji były wartości wielkości charakteryzujących analizowane warianty, będące danymi wejściowymi do algorytmu wspomagania wyboru preferowanych rozwiązań systemu technicznego wyposażenia budynku. Na końcu rozdziału Autor przeprowadził dyskusję wyników obliczeń i określił preferowane rozwiązania.

Praca kończy się szóstym rozdziałem o tytule „Wnioski końcowe". W rozdziale tym Doktorant podsumował wyniki swoich badań, stwierdził, że zastosowana metodyka (algorytm wraz z uwzględnieniem modeli preferencji decydenta) może być stosowana w praktyce. Zaprezentowana metoda może być używana jako narzędzie wyboru rozwiązań systemów technicznego wyposażenia budynków wykorzystujące w sposób kompromisowy wiedzę ekspertów. Należy zaznaczyć, że zmodyfikowana przez doktoranta metoda może znaleźć równie zastosowanie w innych dziedzinach życia. Na końcu przedstawił kierunki dalszych badań.

W załączniku umieszczonym na końcu pracy Doktorant zawarł analizę statystyczną wyników badań ankietowych respondentów, wyniki obliczeń rzetelności odpowiedzi, opracowany kwestionariusz ankietowy, kody opracowanych przez siebie programów, dane wejściowe do obliczeń oraz otrzymane wyniki analizy wielokryterialnej.

3. **Ocena rozprawy**

Recenzowana rozprawa mgr inż. Michała KLIMASA dotyczy metody wspomagania wyboru systemu technicznego wyposażenia budynków (STWB). Zakres analizy ograniczono do układu mającego istotny wpływ na zużycie energii – układu przygotowania ciepłej wody.

W rozprawie przedstawiono problem podjęcia decyzji z wyborem systemu technicznego wyposażenia budynków w przypadku, gdy wymagana jest ocena jego kilku wariantów pod względem wielu kryteriów. Wskazano zasadność wyboru przy użyciu metody optymalizacji wielokryterialnej. Doktorant na podstawie wiedzy ekspertów zawartej w przeprowadzonych specjalnie opracowanym w tym celu ankietach opracował autorski algorytm wyboru

kompromisowego rozwiązania STWB. Następnie w celu przeprowadzenia weryfikacji stosowanego algorytmu, opracowany model rzeczywistego układu przygotowania ciepłej wody (w programie TRNSYS 17) poddał walidacji. Dla 24 wariantów modelu układu określił oceniane i na tej podstawie, wykorzystując opracowany przez siebie algorytm, dokonał wyboru najlepszego układu podgrzewania ciepłej wody.

Metoda zaproponowana przez doktoranta umożliwia wybór kompromisowego rozwiązania systemu technicznego wyposażenia budynków. Doktorant podjął się i zrealizował zadanie badawcze, którego zastosowanie wyników w praktyce, pozwoli na wybór odpowiedniego STWB umożliwiające ich poprawne i optymalne wykonanie prowadzące do dobrego samopoczucia ludzi w budynkach oraz optymalizacji kosztów inwestycyjnych oraz eksploatacyjnych elementów STWB.

4. **Uwagi ogólne**

Recenzowana rozprawa jest logiczna i przemyślana. Praca została wykonana rzetelnie, jest kompletna, zawiera rozległą analizę literatury, interesujące i szerokie badania eksperymentalne oraz symulacyjne obliczenia numeryczne. Opracowana została bardzo starannie. Istotnych uwag do przeprowadzonych badań i symulacji numerycznych oraz pokazanych wyników w pracy nie mam. Po zapoznaniu się z treścią rozprawy nasuwają mi się właściwie tylko uwagi związane z samym przedstawieniem treści pracy.

W dysertacji przedstawiono autorską metodę wspomagającą wybór racjonalnego (uśrednionego) rozwiązania systemu technicznego wyposażenia budynków (STWB). Przedstawiona metoda, jest metodą uniwersalną, umożliwiającą wspomaganie wyboru każdego systemu, a nie tylko systemu technicznego wyposażenia budynków pasywnych. Autor zajmuje się wyborem układu instalacji przygotowania ciepłej wody w budynku pasywnym, równie dobrze może to być układ w budynku tradycyjnym. W związku z tym moim zdaniem należałoby zmienić tytuł rozprawy na bardziej odpowiadający pracy, na przykład ***„Metoda wspomagania wyboru systemu technicznego wyposażenia budynków”***.

Cel i tezy rozprawy zawarte w rozdziale 3 wynikają z przeglądu i analizy stanu wiedzy. Teza jest założeniem, które Doktorant zamierza udowodnić w swojej rozprawie. Autor postawił trzy tezy, uważam, że wystarczyłaby pierwsza, do której włączonoby drugą, mogłaby mieć ona następującą treść:

> *„Wybór systemu technicznego wyposażenia budynku pasywnego jest problemem wielokryterialnym, gdzie konieczne jest zastosowanie algorytmu uwzględniającego identyfikację zbioru rozwiązań dopuszczalnych, kryteriów*

oceny oraz modelu preferencji decydenta, który może być oparty o badania statystyczne grupy ekspertów"

Natomiast trzecia teza stanowi właściwie zalecenie, że opracowany algorytm należy zweryfikować poprzez zastosowanie do wybranego rzeczywistego obiektu.

5. Uwagi szczegółowe

Przy przeglądaniu pracy nasunęły mi się pewne uwagi szczegółowe, są to właściwie uwagi nie dotyczące meritum rozprawy, a jedynie formalne. Poniżej przedstawiam najważniejsze z nich:

1. str. 28, wiersz 13 od góry, Doktorant wprowadza wagi przyporządkowane do wybranych kryteriów oceny wyboru STWB, brak mi ich opisu i charakterystyki,
2. niejasny zapis matematyczny równań (4.1), (4.2) i (4.3),
3. str. 36 wiersz 7 i 6 od dołu, sformułowanie „Każda udzielona odpowiedź definiowała wagę danego współczynnika, który następnie wpływał na ocenę końcową wszystkich odpowiedzi udzielonych przez danego respondenta" jest niejasne i wymaga komentarza.
4. Praca byłaby bardziej czytelna gdyby „Opis wybranych kryteriów oceny" (punkt 4.2.4) byłby przed „Budową kwestionariusza" (punkt 4.2.1).
5. Tytuł rysunku 5.22 powinien mieć postać „Temperatura wody na dole zbiornika"
6. Tytuły Tabeli 5.9 i Tabeli 5.11 niejasne, a zawartość wymaga dokładniejszego omówienia.
7. Podpisy pod rysunkami 5.43 - 5.46 zbyt syntetyczne.

6. Uwagi o charakterze redakcyjnym

Uwagi o charakterze redakcyjnym zaznaczono w sprawdzonym egzemplarzu pracy. Praca została napisana poprawnie językowo, w sposób zrozumiały i czytelny, nie zauważyłem rzucających się w oczy błędów stylistycznych. Kolejność rozdziałów i treści dysertacji jest przemyślana oraz logiczna, a układ pracy jest właściwy.

7. Podsumowanie oceny rozprawy

Recenzent stwierdza, że rozprawa doktorska mgr inż. mgr inż. Michała Klimasa p.t. „Metoda wspomagania wyboru systemu technicznego wyposażenia budynków pasywnych" stoi na dobrym poziomie naukowym i jest oryginalnym oraz cennym osiągnięciem

naukowym Doktoranta. Poczynione uwagi nie zmieniają ogólnej pozytywnej oceny pracy. W ramach pracy Doktorant:

1) Krótko scharakteryzował budynki pasywne i systemy techniczne ich wyposażenia,
2) dokonał szczegółowego przeglądu literatury na temat stosowanych kryteriów oceny systemów technicznych wyposażenia budynków (STWB),
3) scharakteryzował stosowane metody wyboru STWB, a szczególna uwagę zwrócił na uniwersalną metodę MCDM (Multi Criteria Decision Making),
4) stworzył uniwersalny algorytm wspomagania wyboru kompromisowego rozwiązania i zastosował go do wspomagania wyboru technicznego wyposażenia budynku,
5) przyjął i scharakteryzował wybrane kryteria oceny, na podstawie których dokonywano wyboru systemu technicznego wyposażenia budynku,
6) zbudował model preferencji decydenta i zastosował go w praktyce, w tym celu:
   - opracował kwestionariusz ankietowy zawierający pytania filtrujące, dotyczące ocenianych wskaźników charakteryzujących rozwiązania i pytania dotyczące samooceny doświadczenia zawodowego respondenta, z odpowiedziami w pięciostopniowej skali preferencji,
   - na podstawie pytań filtrujących i dotyczących samooceny spośród grona osób zajmujących się analizowaną tematyką dokonał wyboru grup ekspertów związanych z budownictwem jednorodzinnym, wielorodzinnym, użyteczności publicznej i zamieszkania zbiorowego biorących udział w określeniu kompromisowego rozwiązania,
   - przeprowadził ocenę rzetelności przygotowanej ankiety poprzez określenie współczynnika homogeniczności skali Alfa-Cronbacha,
   - wyznaczył wektory wag kryteriów głównych oceny biorąc pod uwagę wyłącznie odpowiedzi udzielone przez ekspertów,
7) Zbudował w programie TRNSYS model numeryczny rzeczywistego układu podgrzewania ciepłej wody wyposażonego w kolektory słoneczne, podgrzewające poprzez przepływowe wymienniki ciepła, ciepłą wodę gromadzoną w zasobnikach ciepłej wody.
8) Po przeprowadzeniu walidacji modelu opracował modele numeryczne 24 układów przygotowania ciepłej wody użytkowej i na tej podstawie określił dla nich wartości ocenianych parametrów.

9) Uwzględniając fuzzyfikację oceny poszczególnych rozwiązań porównał sumy ważone ocen wariantów układów dla zdefiniowanych profili ekspertów i dokonał ich oceny.
10) Przedstawił dalsze kierunki udoskonalania zbudowanego algorytmu i profili ekspertów na innych Systemach Technicznego Wyposażenia Budynków.

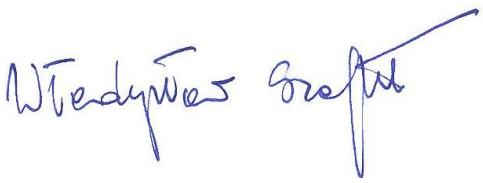
W ostatnich latach coraz szerzej analizowane są rozwiązania stosowanych w budynkach systemów technicznego wyposażenia budynków. Podstawę ich oceny stanowią różne kryteria np.: zużycie energii pierwotnej, emisja dwutlenku węgla, koszty inwestycyjne, koszty eksploatacyjne, komfort korzystania itd. Doktorant podjął ciekawą próbę określenia uśrednionej oceny grupy ekspertów dla jednego z Systemów Technicznego Wyposażenia Budynków - układu przygotowywania ciepłej wody.

Można więc stwierdzić, że wziął pod uwagę zbiorową ich wiedzę i na tej podstawie przyporządkował analizowanym rozwiązaniom pewne miary pozwalające na ich kategoryzację od najmniej do najbardziej optymalnych. W ten sposób zrealizował cel postawiony w pracy i potwierdził przyjęte w rozprawie tezy.

8. **Wniosek końcowy**

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska **mgr inż. Michała Klimasa** p.t. ***„Metoda wspomagania wyboru systemu technicznego wyposażenia budynków pasywnych”*** 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). Reprezentuje wysoki poziom naukowy, ponadto zostały przeprowadzone przez Doktoranta obszerne badania empiryczne i numeryczne, co dodatkowo podnosi wartość rozprawy. Wyniki pracy mogą być również wykorzystane w praktyce inżynierskiej.

Przedkładam Wysokiej Radzie Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej w Poznaniu niniejszą recenzję z wnioskiem o przyjęcie pracy jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony.



prof. dr hab. inż. Władysław Szaflik