

**Prof. dr hab. inż. Robert SEKRET**  
Profesor zwyczajny w Politechnice Częstochowskiej

**POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA**  
**Wydział Infrastruktury i Środowiska**  
Katedra Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji  
42 – 201 Częstochowa, ul. J.H. Dąbrowskiego 69  
Tel.: +48 664758109; E-mail: [rsekret@is.pcz.czest.pl](mailto:rsekret@is.pcz.czest.pl)

Częstochowa, dn. 04.05.2016 r.

**Szanowny Pan**  
**Prof. dr hab. inż. Krzysztof Barbusiński**  
Prodziekan ds. Organizacji i Rozwoju  
Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Politechniki Śląskiej  
ul. Konarskiego 18  
44-100 Gliwice

## **Recenzja**

### **Rozprawy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Palmowskiej**

#### **1. Wprowadzenie**

Recenzja niniejsza została napisana w odpowiedzi na pismo Nr RIE-BD/4/235/2015/2016 z dnia 23 marca 2016 roku.

#### **2. Zakres rozprawy**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Palmowskiej nosi tytuł „Modelowanie rozdziału powietrza wentylacyjnego w hali krytego lodowiska”. Zawiera łącznie 148 stron. Oparto ją o 69 pozycji bibliograficznych, w tym 17 źródeł internetowych. Rozprawa została podzielona na 10 głównych rozdziałów i uzupełniona o spis ważniejszych oznaczeń i indeksów.

Rozdział pierwszy pracy stanowi wstęp. Doktorantka ujęła w nim uzasadnienie podjęcia się zaproponowanego problemu naukowego. Z jednej strony Autorka pracy uznała, że usunięcie nadmiaru wilgoci w halach lodowisk stanowi istotny aspekt zapewnienia bezpieczeństwa ludzi i trwałości elementów budowlano-instalacyjnych a z drugiej strony Doktorantka wskazała na brak wystarczającej wiedzy w zakresie projektowania tego typu systemów wentylacji. Doktorantka podkreśliła ponadto, że dla

rozwiązywania przedstawionych problemów, zwłaszcza dla obiektów o skomplikowanej geometrii oraz złożonym charakterze zjawisk przepływowych, wymagane jest zastosowanie narzędzi naukowych w postaci symulacji numerycznych i ich weryfikacji eksperymentalnej, gdyż metody inżynierskie nie są w stanie przewidzieć skutków działania instalacji w nowych warunkach pracy. Rozdział drugi ocenianej rozprawy doktorskiej stanowi przegląd aktualnego stanu wiedzy na temat wentylacji hal lodowisk i jej badań. Doktorantka przedstawiła w nim: charakterystykę hal lodowisk z punktu widzenia wentylacji, dotychczasowy stan wiedzy w zakresie: wymagań stawianych wentylacji hal lodowisk, specyfiki rozdziału powietrza w halach lodowisk, sposobu uzdatniania powietrza wentylacyjnego i osuszającego w halach, opis matematyczny zjawisk fizycznych zachodzących w hali, badania modelowe wentylacji hal lodowisk oraz innych dużych obiektów sportowych. Rozdział trzeci ocenianej rozprawy doktorskiej stanowi cel i zakres pracy. Autorka założyła, że celem pracy będzie walidacja eksperymentalna modelu numerycznego przepływu powietrza, ciepła i wilgoci w wentylowanej hali lodowiska oraz badania nad poprawą warunków przepływowych i ciepłno-przepływowych w tym obiekcie ze względu na przebywających ludzi i utrzymanie dobrego stanu technicznego hali. W związku z tak przyjętym celem pracy Doktorantka zaplanowała 5 zadań szczegółowych. Obejmują one: przeprowadzenie eksperymentalnej identyfikacji przepływu powietrza i warunków ciepłno-przepływowych w rzeczywistej hali lodowiska, modelowanie numeryczne przepływu: powietrza, ciepła i wilgoci w hali lodowiska wraz z zaproponowaniem autorskiej metody zadawania warunków brzegowych, wykonanie szczegółowej walidacji eksperymentalnej wyników obliczeń numerycznych, określenie wpływu założonych czynników na poprawę warunków przepływowych i ciepłno-wilgotnościowych w hali oraz opracowanie wniosków końcowych będących jednocześnie wskazówkami do projektowania systemów wentylacji i osuszania hal lodowisk. W czwartym rozdziale Doktorantka przedstawiła metodykę badań. W pierwszej części tego rozdziału zawarto opis modelowanego obiektu. Obiektem była hala lodowiska „Tafla” zlokalizowana w Gliwicach. W opisie Autorka uwzględniła: geometrię hali, sposób użytkowania, charakterystykę przegród budowlanych, wewnętrzne źródła ciepła i opis systemu wentylacji. W drugiej części rozdziału czwartego Doktorantka przedstawiła metodykę badań eksperymentalnych. W tej części ujęła: metodykę badań warunków wentylacji hali (tj.: obszar badawczy hali, rozmieszczenie punktów pomiarowych, metodę pomiarów, opis i parametry urządzeń wykorzystanych w pomiarach), metodykę badań termowizyjnych rozkładu temperatury na przegrodach wewnętrznych obiektu oraz emisyjności lodu. W części trzeciej rozdziału czwartego Doktorantka zaprezentowała charakterystykę programu Ansys CFX wykorzystanego w pracy modelowania przepływu: powietrza, ciepła, wilgoci i zanieczyszczeń. Rozdział piąty ocenianej rozprawy doktorskiej stanowi eksperymentalna identyfikacja przepływu powietrza i warunków ciepłno-wilgotnościowych w hali lodowiska. W ramach przeprowadzonych badań eksperymentalnych, realizowanych na potrzeby uzyskania danych do obliczeń numerycznych, określono: parametry tafli lodu (niezbędne do symulacji przepływu ciepła pomiędzy jej powierzchnią a otoczeniem), parametry powietrza zewnętrznego

(niezbędne do symulacji przepływu ciepła przez przegrody zewnętrzne oraz określenia wilgotności właściwej powietrza nawiewanego), parametry powietrza nawiewanego (wymagane do zdefiniowania warunków brzegowych dla otworów nawiewnych, określono m.in. średni strumień objętości powietrza nawiewanego do hali i porównano go z danymi projektowymi) oraz rozkłady parametrów powietrza w hali (z uwzględnieniem: rozkładu prędkości powietrza nad taflą lodu, temperatury i wilgotności względnej powietrza wewnętrznego). Rozdział ten zawiera także wyniki wizualizacji strugi nawiewnej poprzez zadymianie, które pozwoliły na obserwację efektów nawiewania powietrza do hali przez istniejący system rozdziału powietrza, oraz wyniki pomiarów termowizyjnych. Rozdział szósty przedstawia wyniki badań numerycznych, tj. modelowania przepływu: powietrza, ciepła i wilgoci w hali lodowiska. Badania podzielono na dwie części. Pierwsza dotyczyła badań testowych zrealizowanych dla modelu uproszczonej hali lodowiska (celem ich był wybór opcji modelowania oraz kontrola bilansu ciepłno-wilgotnościowego pomieszczenia testowego), natomiast druga część badań dotyczyła modelu rzeczywistej hali lodowiska (celem badań było określenie rozkładów wybranych parametrów powietrza na potrzeby walidacji przy wykorzystaniu wyników badań „in situ”). Pierwsza część rozdziału szóstego zawiera: opis modelu numerycznego pomieszczenia testowego i przebieg obliczeń, wybór modelu promieniowania, wybór sposobu zadawania warunków brzegowych w otworze wywiewnym oraz bilans ciepłno-wilgotnościowy pomieszczenia testowego. W drugiej części zawarto: opis modelu numerycznego hali lodowiska i przebieg obliczeń oraz modelowanie numeryczne emisji wilgoci z powierzchni tafli lodowiska. Rozdział siódmy stanowi prezentację wyników z walidacji eksperymentalnej modelowania numerycznego. Głównym celem było sprawdzenie jakości opracowanego i udoskonalonego modelu numerycznego przepływu powietrza, ciepła i wilgoci w hali lodowiska pod względem poprawności symulacji zjawisk fizycznych zachodzących na obiekcie rzeczywistym. W ramach tej części pracy Doktorantka przedstawiła wyniki jakościowej oceny dla przepływu powietrza, ilościowej oceny dla wybranych parametrów powietrza w hali i ilościowej oceny dla temperatury dachu. W rozdziale ósmym ocenianej rozprawy doktorskiej Doktorantka przedstawiła wyniki wielowariantowych badań numerycznych nad poprawą warunków przepływowych i ciepłno-wilgotnościowych w hali lodowiska. Jest to główna i docelowa część pracy doktorskiej. Wyniki badań zawarte w tym rozdziale dają odpowiedź na zdefiniowane problemy, które powstały z oceny pracy systemu wentylacji dla badanego obiektu. Wśród tych zagadnień wyszczególniono zagadnienia dotyczące: konieczności osuszania powietrza i sposobu realizacji tego procesu uzdatniania powietrza, wpływu rozdziału powietrza wentylacyjnego i osuszającego na warunki w hali, wpływu sposobu wykorzystania hali na warunki ciepłno-wilgotnościowe oraz możliwości uniknięcia ryzyka wykroplenia wilgoci na powierzchni dachu. W tym celu Doktorantka przeprowadziła symulacje numeryczne, z wykorzystaniem wcześniej opracowanego i zwalidowanego w badaniach eksperymentalnych modelu, dla 10 wariantów wentylacji hali lodowiska. W ostatnim dziewiątym rozdziale rozprawy doktorskiej Doktorantka przedstawia podsumowanie i wnioski końcowe.

### 3. Ocena pracy

Podjęcie przez Doktorantkę, w ocenianej rozprawie doktorskiej, zadania modelowania rozdziału powietrza wentylacyjnego w hali krytego lodowiska z wykorzystaniem badań eksperymentalnych uważam za trafny i świadczący o znajomości współczesnych problemów, które są konieczne do rozwiązania w ramach obszaru dyscypliny naukowej inżynierii środowiska. Zagadnienia ogrzewania powietrznego, wentylacji i osuszania powietrza stanowią istotne problemy istniejących lodowisk, gdzie poprawa warunków cieplno-przepływowych dla uniknięcia ryzyka wykroplenia wilgoci z punktu widzenia przebywających ludzi oraz wydłużenia czasu eksploatacji wyposażenia technicznego obiektu są bardzo ważne. Należy podkreślić, że przeprowadzane analizy i oceny systemów wentylacji obiektów sportowych, w tym hal lodowisk, wskazują na ciągły brak efektywnych rozwiązań inżynierskich, co wynika m.in. z niewystarczającego stanu wiedzy naukowej.

Wstęp do pracy oraz aktualny stan wiedzy (rozdział pierwszy i drugi rozprawy) Doktorantka przedstawiła czytelnie i w pełni odniosła się do specyfiki podjętego problemu naukowego, wykazując niewystarczający stan wiedzy o wentylacji krytych lodowisk i zachodzących w nich zjawisk, przykładowo: nieliczne wyniki eksperymentalnych i numerycznych badań nad systemami wentylacji, brak badań z uwzględnieniem ludzi i lodu jako źródeł wilgoci, czy też kompleksowych badań, tj. badań numerycznych zwalidowanych eksperymentalnie. Autorka bardzo precyzyjnie przedstawiła motywację do podjęcia się tematu badań i trafnie zdefiniowała jakim wyzwaniem musimy sprostać w zakresie jakości środowiska wewnętrznego tego typu obiektów w najbliższej przyszłości. Spójne podsumowanie aktualnego stanu wiedzy w zakresie podjętej problematyki pozwoliło na precyzyjne sformułowanie celu i zakresu rozprawy. Przedstawiony zakres pracy szczegółowo informuje o kolejnych etapach realizacji założonego celu pracy. Należy stwierdzić, że Doktorantka nabyła umiejętności przeprowadzenia krytycznego przeglądu literatury oraz poprawnego formułowania celu i zakresu badań. Wybór obiektu do badań przepływu powietrza oraz warunków cieplno-wilgotnościowych jest poprawny i nie budzi zastrzeżeń. Doktorantka dokonała rzetelnego opisu modelowanego obiektu hali lodowiska. Przedstawiona w rozdziale czwartym pracy metodyka badań eksperymentalnych jest adekwatna do założonego celu, tj. pozyskania wiedzy na potrzeby walidacji modelu numerycznego. Nie wnoszę uwag do: zaproponowanego obszaru badawczego hali, rozmieszczenia punktów pomiarowych, metody pomiarów, opisu i parametrów urządzeń wykorzystanych w pomiarach. Wybór programu Ansys CFX wykorzystanego w pracy modelowania przepływu: powietrza, ciepła, wilgoci i zanieczyszczeń w wybranym obiekcie również uważam za trafny, gdyż pozwala on na ocenę efektów działania wentylacji na etapie projektu, jak również optymalizację rozdziału powietrza. Należy stwierdzić, że Doktorantka nabyła umiejętności poprawnego wyboru obiektu badań i metodyki badawczej. Oceniam, że wartość uzyskanych wyników badań zarówno

eksperymentalnych i numerycznych (rozdział piąty i szósty) jest wysoka. W tej części rozprawy na podkreślenie zasługuje także sposób organizacji realizowanych badań. Są one logicznie ułożone i spójne z założonym zakresem pracy. Nie wnoszę uwag do uzyskanych wyników. Przeprowadzone badania eksperymentalne oraz modelowania numerycznego pozwoliły Doktorantce na identyfikację przepływu powietrza i warunków ciepłno-przepływowo-ych prowadząc tym samym do wyznaczenia warunków brzegowych dla wielowariantowej analizy będącej głównym elementem ocenianej rozprawy. Rozdział siódmy stanowi prezentację wyników z walidacji eksperymentalnej wyników modelowania numerycznego. Przeprowadzona ocena jakościowa przepływu powietrza oraz ilościowa ocena w zakresie: prędkości powietrza, temperatury powietrza, wilgotności właściwej i względnej powietrza oraz temperatury dachu pozwoliły Doktorantce na akceptowalne odwzorowanie zjawisk fizycznych zachodzących w badanej hali lodowiska. Tym samym opracowany i zwalidowany model należy uznać za wystarczający do analizy wielokryterialnej. Przyjęte założenia do analizy wielokryterialnej nad poprawą warunków przepływowo-ych i ciepłno-wilgotnościowych oraz zaproponowany przebieg obliczeń są poprawne do realizacji podjętego celu. Wybór wariantów do analizy oraz wpływ: osuszania powietrza, systemu rozdziału powietrza, sposobu uzdatniania powietrza, liczby osób przybywających w hali, zastosowania sufitu niskoemisyjnego są także trafne. Wartość uzyskanych wyników przez Doktorantkę jest tym większa, że wykorzystano w badaniach również metody termowizyjne. Zawarte w tekście rozprawy rysunki i tabele zostały opracowane bardzo starannie a ich liczba w pełni odpowiada potrzebom graficznej i tabelarycznej prezentacji omawianych aspektów podjętej problematyki. Zastosowana terminologia nie budzi zastrzeżeń. Jest zgodna z przyjętymi zasadami w zakresie podjętej problematyki. Oznaczenia i symbole odnoszą się do treści pracy. Należy stwierdzić, że Doktorantka nabyła umiejętności: realizacji badań, analizy uzyskanych wyników i ich prezentacji. Nie mam zastrzeżeń do przedstawionych wyników z analizy numerycznej oraz wniosków końcowych ocenianej rozprawy. Są one czytelne i przekonujące oraz odnoszą się do przyjętego celu pracy, zaproponowanego zakresu oraz kierunków przyszłych badań. Ostatecznie należy stwierdzić, że Doktorantka nabyła umiejętność formułowania wniosków z pracy naukowej.

**Za istotne osiągnięcia rozprawy uważam:**

- Przeprowadzenie badań eksperymentalnych stanu środowiska wewnętrznego hali lodowiska.
- Zastosowanie metody termowizyjnej w badaniach eksperymentalnych warunków ciepłno-wilgotnościowych hali lodowiska i wykorzystanie uzyskanych wyników jako warunków brzegowych w opracowanym modelu numerycznym.
- Badania emisji wilgoci od powierzchni tafli lodowiska.
- Przeprowadzenie wielowariantowych obliczeń numerycznych prowadzących do poprawy stanu środowiska wewnętrznego hali lodowiska.

Dodatkowo na podkreślenie zasługuje bardzo staranne opracowanie edycyjne i graficzne rozprawy doktorskiej.

Po zapoznaniu się z zawartością pracy doktorskiej nie mam znaczących uwag krytycznych, czy dyskusyjnych. Materiał jest czytelny i logicznie ułożony a stopień szczegółowości jest wystarczający. Niemniej jednak nasuwają się dwa pytania:

1. Czy przytaczana w pracy wielkość „szybkość powietrza” jest poprawna. Czy nie trafniejszym byłaby „prędkość powietrza”?
2. Na ile uzyskane wyniki pozwalają na zaproponowanie i wdrożenie nowego systemu pozwalającego na likwidację lub minimalizację problemu nadmiernego zawilgocenia powietrza i wykroplenia wilgoci na powierzchni tafli lodowiska?

#### 4. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny praca doktorska mgr inż. Agnieszki Palmowskiej pt. „Modelowanie rozdziału powietrza wentylacyjnego w hali krytego lodowiska” stanowi oryginalne rozwiązanie bardzo istotnego problemu naukowego jakim jest poprawa jakości środowiska wewnętrznego obiektów sportowych. Jej poziom merytoryczny spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wobec powyższego wnioskuje o dopuszczenie rozprawy mgr inż. Agnieszki Palmowskiej do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę istotne osiągnięcia rozprawy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Palmowskiej przedstawione w mojej ocenie uważam, że oceniana praca doktorska pt. „Modelowanie rozdziału powietrza wentylacyjnego w hali krytego lodowiska” zasługuje na wyróżnienie.

