



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I INŻYNIERII ŚRODOWISKA
Instytut Inżynierii Środowiska
ul. Berdychowo 4, 60-965 Poznań

Prof. dr hab. inż. Janusz Wojtkowiak
tel. (61) 6652413, 6652442
fax: (61) 6652444
e-mail: janusz.wojtkowiak@put.poznan.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra CIUMANA

pt.: „Modelowanie rozdziału powietrza wentylacyjnego w hali pływalni”

Recenzja została sporządzona na zlecenie Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w związku z uchwałą z dnia 23.06.2017 r., przekazaną przez Panią dr hab. inż. Joannę Kalkę – Prodziekan ds. Nauki i Organizacji WIŚiE PŚI, w piśmie nr RIE-BD/4/318/2016/2017, z dnia 06.07.2017.

1. Ogólna charakterystyka pracy

Oceniana praca liczy 171 stron i składa się z 9 rozdziałów poprzedzonych spisem treści i spisem ważniejszych oznaczeń. Rozprawę zamyka bibliografia oraz jednostronicowe streszczenia w języku polskim i angielskim. Bibliografia obejmuje 80 pozycji, wśród których Doktorant jest współautorem 4 artykułów w polskich czasopismach naukowo-technicznych, 2 rozdziałów w pracach zbiorowych, 3 referatów na konferencjach międzynarodowych i 1 referatu na konferencji krajowej. Wszystkie 10 pozycji z udziałem Kandydata jest związane z tematyką ocenianej pracy doktorskiej.

W recenzowanej pracy Doktorant przeprowadza eksperymentalną walidację modelu numerycznego CFD opisującego stacjonarne pola temperatury, prędkości i zawartości wilgoci w powietrzu wypełniającym halę pływalni. Badania doświadczalne i modelowanie numeryczne prowadzi na obiekcie rzeczywistym – pływalni szkolnej o wymiarach 17,6×11,7×4,4 m z niecką basenową o wymiarach 12,5×7,0×1,36 m. Zwalidowany model wykorzystuje do oceny zmian strumienia powietrza wentylacyjnego na warunki cieplno-wilgotnościowe w badanej hali. Analizuje pod względem energetycznym zmienność strumienia powietrza, zastosowanie

dwustopniowego odzysku ciepła w systemie wentylacyjnym oraz wprowadzenie dodatkowego miejscowego nawiewu powietrza. Wszystkie najważniejsze obliczenia przeprowadza za pomocą komercyjnych programów komputerowych, zarówno naukowych (Ansys-CFX), jak i inżynierskich (IDA ICE, WENT2IBM, FDBES).

Oceniana rozprawa doktorska ma charakter doświadczalno-teoretyczny i mieści się w dyscyplinie „inżynieria środowiska”.

2. Ocena tematyki pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Ciumana dotyczy problemu zapewnienia odpowiedniej jakości powietrza w hali krytej pływalni za pomocą właściwie zaprojektowanego i eksploatowanego układu wentylacji. Parametrami określającymi jakość powietrza są jego temperatura, wilgotność, prędkość i stężenie zanieczyszczeń. Podstawowym zadaniem układu wentylacji jest utrzymanie wartości wyżej wymienionych parametrów w dopuszczalnych zakresach w całej objętości hali.

W krytych pływalniach występuje wyraźnie wyższa temperatura i wilgotność powietrza w porównaniu z typowymi pomieszczeniami przebywania ludzi. Z powierzchni wody w basenie oraz z zawilgoconych posadzek ma miejsce stałe parowanie wody. Strumień odparowanej wilgoci jest główną wielkością jaką należy brać pod uwagę podczas projektowania systemów wentylacyjnych pływalni. Wysoka wilgotność powietrza stwarza niebezpieczeństwo wykraplania się pary wodnej na chłodniejszych powierzchniach hali, a więc głównie na zewnętrznych przegrodach budowlanych. Jest to zjawisko bardzo niekorzystne ze względu na niebezpieczeństwo korozji, rozwój grzybów i pleśni. Do zabezpieczenia przegród budowlanych powszechnie wykorzystuje się układy wentylacyjne. Ze względu na wysoką energochłonność tych układów należy je projektować w taki sposób, aby zapewnić komfort cieplny użytkowników i ochronę przeciwwilgociową konstrukcji przy możliwie małych kosztach inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Warunkiem poprawnego zaprojektowania układu wentylacji dla tak złożonego i nietypowego obiektu jak hala pływalni, jest posiadanie odpowiednio zaawansowanego i sprawdzonego narzędzia obliczeniowego. Budowie, walidacji i zastosowaniu takiego narzędzia poświęcona jest oceniana praca doktorska. Warto podkreślić, że problem zapewnienia wymaganej jakości powietrza w budynkach oraz analiza związanych z tym nakładów energetycznych, jest od wielu lat przedmiotem licznych publikacji. Jednakże, w odniesieniu do hal pływalni powyższy problem nie został dotychczas zadowalająco rozwiązany.

Należy zatem stwierdzić, że tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Ciumana jest ważna i aktualna.

3. Ogólna ocena treści pracy

W rozdziale 1. Doktorant krótko scharakteryzował przedmiot swoich badań i przekonująco uzasadnił przyczynę podjęcia tematyki modelowania rozdziału powietrza wentylacyjnego w analizowanej hali.

Rozdział 2. jest analizą aktualnego stanu wiedzy na temat układów wentylacji hal pływalni. W rozdziale tym Kandydat szczególnie dużo uwagi poświęcił ilościowemu opisowi emisji wilgoci z lustra wody basenowej, co należy uznać za w pełni uzasadnione. W podsumowaniu przeglądu stanu wiedzy Doktorant sformułował 4 wnioski, które precyzyjnie uzasadniają celowość i zakres podjętych badań.

W Rozdziale 3. sformułowany został cel i zakres pracy oraz zadania do wykonania. Celem pracy jest *„doświadczalna walidacja teoretycznego opisu przepływu ciepła i wilgoci w wentylowanej hali pływalni dla różnych modeli emisji wilgoci oraz wykorzystanie zwalidowanego modelu do zbadania wpływu strumienia powietrza wentylacyjnego na warunki cieplno-wilgotnościowe w hali wraz z oceną związanych z tym nakładów energetycznych”*. Tak sformułowany cel należy uznać za właściwy dla pracy doktorskiej. Również zakres pracy i przyjęte szczegółowe zadania badawcze nie budzą zastrzeżeń.

Rozdział 4. dotyczy badań eksperymentalnych przepływu powietrza i warunków cieplno-wilgotnościowych w hali pływalni. Badania wykonano na obiekcie rzeczywistym – pływalni szkolnej w Gliwicach. Rozdział zawiera opis hali i układu wentylacji, opis metodyki badań, rozmieszczenia punktów pomiarowych oraz informacje na temat zastosowanych przyrządów pomiarowych. Liczba mierzonych wielkości i punktów pomiarowych jest obszerna i obejmuje: temperaturę, wilgotność i prędkość powietrza w hali, temperaturę, wilgotność i strumień powietrza nawiewanego, temperaturę wody w basenie, temperaturę powierzchni przegród budowlanych, temperaturę i wilgotność powietrza zewnętrznego. Programem badań objęto 3 pory roku. Część wielkości mierzono w sposób ciągły, część w sposób krótkotrwały. Większość mierzona była punktowo, niektóre powierzchniowo (termowizja). Oceniając informacje zawarte w rozdziale 4 należy stwierdzić, że są one wyczerpujące i precyzyjne. Rozmieszczenie punktów pomiarowych, zastosowane przyrządy pomiarowe oraz metodyka badań nie budzą zastrzeżeń.

W rozdziale 5. Kandydat opisał metodykę modelowania numerycznego i sposób testowania modelu CFD. Krótko scharakteryzował zastosowany program Ansys CFX – komercyjny kod komputerowy przeznaczony do zaawansowanych symulacji transportu masy, pędu i energii

w ośrodkach ciągłych. Następnie szczegółowo opisał sposób wyboru najbardziej adekwatnego modelu turbulencji z pośród 14 dostępnych w programie Ansys-CFX. O ostatecznym wyborze modelu SST przesądziło porównanie wyników symulacji numerycznych z wynikami badań doświadczalnych obejmujące 6 następujących wielkości: rozkład prędkości powietrza w osi nawiewanej strugi, szerokość profilu strugi, pęd i energia kinetyczna turbulencji w strudze oraz rozkłady szybkości powietrza w wybranych przekrojach hali pływalni. Zakres analizy prowadzącej do wyboru modelu turbulencji zasługuje na uznanie. Niestety nie jest w pełni jasne, jak duży był udział Kandydata w badaniach doświadczalnych wykorzystanych w wyżej wymienionej analizie.

Wybór warunków brzegowych oraz siatki dyskretyzacji do obliczeń CFD nie budzą większych zastrzeżeń. Sposób testowania struktury gęstości siatki jest generalnie poprawny, chociaż brakuje iteracji „ $i+1$ ” pokazującej, że zastosowana siatka S3 rzeczywiście spełnia warunek „grid independent solution”. Szkoda również, że w rozdziale poświęconym modelowaniu CFD nie zamieszczono krótkiej informacji o sprzęcie, na którym przeprowadzono obliczenia oraz czasie ich trwania.

Rozdział 6. zawiera wyniki walidacji doświadczalnej modelu CFD. W pierwszej kolejności Doktorant porównał wyniki obliczeń temperatury, szybkości i wilgotności powietrza, uzyskane dla 6 różnych modeli emisji wilgoci z lustra wody w niecce basenowej, z wynikami pomiarów. Na tej podstawie do dalszych obliczeń numerycznych wybrał stosunkowo nowe równanie VDI z roku 2010. Następnie, dla modelu CFD z wybranym równaniem VDI, ocenił zgodność wyników obliczeń parametrów powietrza w hali pływalni oraz wyników obliczeń temperatury wewnętrznych powierzchni ścian hali, z wynikami pomiarów. Ocenę zgodności przeprowadził z uwzględnieniem niepewności pomiarowych. W efekcie stwierdził, że zaproponowany model CFD dobrze odwzorowuje rzeczywiste warunki występujące w hali pływalni. Powyższe stwierdzenie można uznać za uzasadnione. Należy jednak zauważyć, że zgodność wyników obliczeń CFD z wynikami pomiarów termowizyjnych jest, ze względów obiektywnych „dość umowna”, tzn. bardziej jakościowa niż ilościowa.

W rozdziale 7. Kandydat przedstawił wyniki badań numerycznych wpływu strumienia powietrza wentylacyjnego na warunki komfortu cieplnego w hali pływalni. Analizie poddał 9 wariantów różniących się nie tylko strumieniem, ale również temperaturą i wilgotnością właściwą powietrza nawiewanego oraz wilgotnością właściwą powietrza w hali. Obliczenia wykonał dla warunków zimowych i letnich. Zbadał wpływ rozbudowy istniejącego układu wentylacji o dodatkową, sufitową kratkę nawiewną nad strefą przebywania ratownika. Analiza

otrzymanych rozkładów szybkości, temperatury i wilgotności względnej powietrza w wybranych przekrojach hali pozwoliła na sformułowanie wniosków o dużym praktycznym znaczeniu.

Rozdział 8. zawiera ocenę energetyczną badanych wariantów systemu wentylacji. Obliczenia energetyczne Doktorant przeprowadził wykorzystując dostępne narzędzia inżynierskie w postaci programów IDA ICE – analiza energetyczna i komfort cieplny w budynkach, WENT2IBM – obliczenia strat ciśnienia w przewodach wentylacyjnych, FDBES Ventpack – obliczenia oporów przepływu w nawiewnikach i wywiewnikach wyposażonych w przepustnice. Efektem wykonanych obliczeń są całoroczne zapotrzebowania na energię końcową i nieodwracalną energię pierwotną dla 8 wariantów pracy układu wentylacji, w tym 4 z jednostopniowym i 4 z dwustopniowym odzyskiem ciepła. Wyniki obliczeń pokazały możliwość obniżenia nakładów energetycznych na wentylację na skutek zmniejszenia strumienia powietrza wentylacyjnego oraz zastosowania dwustopniowego odzysku ciepła. Wpływ zastosowania nawiewu miejscowego okazał się energetycznie neutralny.

W rozdziale 9. Kandydat wyczerpująco podsumował efekty swojej pracy i sformułował szereg wniosków o dużej wartości praktycznej.

Przygotowanie i udoskonalenie modelu numerycznego do oceny jakości powietrza w hali pływalni, eksperymentalne zwalidowanie modelu oraz jego zastosowanie do opisu wpływu strumienia powietrza wentylacyjnego na warunki ciepłno-wilgotnościowe wewnątrz hali, a także ocena energetyczna wybranych wariantów pracy układu wentylacji, stanowią o wysokiej wartości merytorycznej oraz aplikacyjnej ocenianej pracy.

Biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, że cele rozprawy zostały osiągnięte, a otrzymane wyniki mogą być uznane za znaczący wkład Doktoranta w rozwiązanie ważnego problemu naukowego.

4. Uwagi krytyczne

4.1. Uwagi formalne (edytorskie)

Praca została napisana bardzo poprawnym językiem. Struktura pracy, zamieszczone tablice i rysunki, poza pojedynczymi przypadkami (patrz: pkt 4.2), nie budzą zastrzeżeń. Niemniej, szczegółowa analiza doprowadziła do wykrycia kilkunastu niżej wymienionych usterek edytorskich.

1. Str. 26 w wierszach 4 i 5g oraz na str. 28 w wierszu 23d mamy: „(*Trianti-Stourna i in. 1997*)”, natomiast w bibliografii na str. 168 jest: „*Trianti-Stourna i in. ... 1998*”; chodzi o niezgodność dat.

2. Str. 29 wiersz 5g, jest: „... z *elektryczną pompą ciepła*”, a powinno być: „... ze *sprężarkową pompą ciepła*”
3. Str. 30 wiersz 11g „(CEN, 2007)” – nie ma takiej pozycji w spisie bibliografii.
4. Str. 42 w wierszu 5d jest: „(rys. 4.11 i 4.112)”, a powinno być: „(rys. 4.11 i 4.12)”.
5. Str. 46 w wierszu 1d i na str. 47 w wierszu 1g czytamy: „... *przepływ powietrza przez przegrody zewnętrzne hali pływalni*”; z lektury pracy wynika, że raczej chodzi o: „... *przepływ ciepła przez przegrody zewnętrzne hali pływalni*”.
6. Str. 47 w tytule rysunku 4.14 mamy: „*Parametry powietrza zewnętrznego w hali pływalni:...*”, powinno być: „*Parametry powietrza zewnętrznego w otoczeniu hali pływalni:...*” lub „*Parametry powietrza na zewnątrz hali pływalni:...*”.
7. Str. 52 wiersz 10d zamiast: „rys. 4.15” powinno być: „rys. 4.16”.
8. Str. 57 wiersz 4g zamiast: „rys. 4.17” powinno być (chyba): „rys. 4.18”.
9. Str. 73 wiersz 1g, szkoda, że nie wskazano pozycji bibliografii, w której opisany jest cytowany „*algorytm Rhie-Chow*”.
10. Str. 75 Tabela 5.2 zamieszczenie samych wartości residuów ciśnienia i prędkości bez podania ich definicji może być źródłem nieporozumień.
11. Str. 75 i 76 (tekst i równania (5.1)÷(5.3)) – niejasności w stosowanych symbolach, np.
 - w spisie oznaczeń indeks dolny „e – zewnętrzny”; czy również we wzorach (5.1)÷(5.3) indeks „e” ma takie samo znaczenie?
 - „k” – to prawdopodobnie energia kinetyczna turbulencji – brak w spisie oznaczeń,
 - jaką temperaturę oznacza symbol „ t_a ”? indeksu „a” nie ma w spisie oznaczeń.
12. Str. 89 wiersze 4d i 5d mamy „(Palmowska 2015)” – brak tej pozycji w spisie bibliografii.
13. Str. 89 wiersz 3d zamiast: „*W przypadku każdej z serii pomiarowych ...*”, powinno być: „*W przypadku każdej z serii obliczeniowych ...*”.
14. Str. 99 wiersze 3d i 4d zamiast: „*Przy pomocy pozostałych formuł ...*”, powinno być: „*Za pomocą pozostałych formuł ...*”.

4.2. Uwagi merytoryczne

Ważniejsze spostrzeżenia dotyczące strony merytorycznej analizowanych zjawisk oraz ich matematycznego opisu wymieniono poniżej w kolejności chronologicznej.

1. Str. 15 wiersze 18g÷20g niezrozumiałe zdanie: „*Natomiast, przy wyższych prędkościach wzrasta znacząco opór hydrauliczny, co skutkuje zahamowaniem strumienia objętości powietrza i nie uzyskaniem oczekiwanego zwiększenia zasięgu strugi*”. Zdaniem recenzenta

zamiast: „...zahamowaniem strumienia objętości powietrza...” powinno być: „...spowolnieniem wzrostu strumienia objętości powietrza ...”

2. Brak precyzji w nazewnictwie i symbolach parametrów powietrza wilgotnego. Przykładowo, na str. 16 we wzorze (2.1) symbole V_N i ρ_N powinny oznaczać odpowiednio strumień objętości i gęstość **suchego** powietrza nawiewanego, a nie „tylko” strumień objętości i gęstość powietrza nawiewanego.
3. Str. 38 wiersz 18d – brak informacji jakie „parametry powietrza zewnętrznego” były mierzone; informacja taka pojawia się z opóźnieniem w dalszej części pracy.
4. Str. 43 rys. 4.11c – czy lokalizacja rejestratora APAR AR235 na ścianie nad grzejnikiem nie wpływała negatywnie (zakłócająco) na warunki jego pracy?
5. Str. 45 wiersze 8d÷11d w jaki **znaczący** sposób współczynnik przejmowania ciepła w **konwekcji wymuszonej** zależy od temperatury powietrza zewnętrznego T_e i temperatury zewnętrznej powierzchni przegrody T_z ?
6. Str. 45 wz. (4.3), jak obliczano (przyjmowano) temperaturę odniesienia T_r ?
7. Str. 68 Tabela 4.11, wartości współczynników przejmowania ciepła na zewnętrznych powierzchniach ścian analizowanej hali są 3÷4 razy mniejsze od rzeczywiście występujących – jak to wyjaśnić?
8. Str. 68 Tabela 4.11, jak obliczano (czym są) współczynniki **przenikania** ciepła na wewnętrznych i zewnętrznych powierzchniach ścian?
9. Str. 80 wiersz 17d czym jest (jak był obliczany) „*uśredniony moment pędu w kierunku osiowym*”?
10. Str. 88 w wierszach 1d i 2d w rozdziale dotyczącym obliczeń CFD czytamy: „*Strumień masy powietrza usuwanego przyjęto jako równy strumieniowi masy powietrza nawiewanego*”. Co ze strumieniem masy parującej wody? Patrz uwaga nr 2 w pkt. 4.2 recenzji.
11. Czy niepewności pomiarowe pokazane na rysunkach 5.17 (str. 94), 6.2 (str. 100), 6.6÷6.8 (strony 106÷108) uwzględniają niepewności typu A i typu B? Z jakim poziomem ufności wyznaczono niepewności pokazane na w/w rysunkach?
12. Str. 114 rys. 7.2 mylące przedstawienie parametrów powietrza na wykresie Molliera. Naniesione odcinki dobrze pokazują zmiany tylko jednego parametru, mianowicie wilgotności właściwej x . Zmiany pozostałych wielkości (T , ϕ , h_{l+x}) są przedstawione niepoprawnie.
13. Kwestie nazewnictwa:
 - „*strumień pędu*” zamiast „*pęd strumienia*” (str. 4),
 - „*spręż wentylatorów*” zamiast „*spiętrzenie wentylatorów*” (str. 144).

Powyższe uwagi mają po części charakter dyskusyjny i nie podważają wysokiej wartości i najważniejszych osiągnięć ocenianej pracy.

5. Podsumowanie

Autor wykazuje bardzo dobrą znajomość omawianych zagadnień, umiejętność formułowania problemów badawczych i ich rozwiązywania za pomocą współczesnych metod eksperymentalnych oraz zaawansowanych komercyjnych narzędzi obliczeniowych.

Za oryginalny dorobek naukowy Kandydata należy uznać:

- zaimplementowanie w programie komputerowym CFD różnych zależności opisujących emisje wilgoci z powierzchni wody do powietrza wypełniającego halę pływalni oraz wskazanie równania zapewniającego największą zgodność z wynikami pomiarów,
- przeprowadzenie walidacji zaproponowanego modelu numerycznego z wykorzystaniem wyników własnych długoterminowych badań eksperymentalnych zrealizowanych na obiekcie rzeczywistym,
- zaproponowanie modyfikacji istniejącego układu wentylacji polegającej na wprowadzeniu dodatkowego miejscowego nawiewu powietrza do strefy ratownika w celu poprawy warunków jego pracy,
- wykonanie oceny energetycznej proponowanych rozwiązań obejmujących zmniejszenie strumienia powietrza wentylacyjnego, zastosowanie dwustopniowego odzysku ciepła w centrali wentylacyjnej i wprowadzenie dodatkowego nawiewu miejscowego.

6. Wniosek końcowy

Reasumując, uważam, że **praca doktorska mgr inż. Piotra Ciumana spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim** określone w art. 13 ust. 1 ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami).

Stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Piotra Ciumana do publicznej obrony, a biorąc pod uwagę jej wysoki poziom naukowy i dużą wartość aplikacyjną uważam, że oceniana rozprawa zasługuje na wyróżnienie.

