



Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie

WYDZIAŁ TECHNIKI MORSKIEJ I TRANSPORTU

Ldz.WTMiT/KKiTCh/37/2019

Szczecin, 27.08.2019r.

Administracja
Wydziału Inżynierii Środowiska

Wpłynęło dn. 05 WRZ. 2019

Nr. 1586 szt.

PANI PROFESOR
ANNA MARA ANIELA

BARDZO PROSZĘ
O NADANIE SPRAWY BŁG

DZIEKAN
Wydziału Inżynierii Środowiska
Politechniki Krakowskiej

dr hab. inż. Stanisław M. Rybicki, prof. PK

dr hab. inż. Tomisław Gołębiowski, prof. PK
Prodziekan Wydziału Inżynierii Środowiska
Politechniki Krakowskiej

Szanowny Panie Prodziekanie,

Przesyłam 3 egzemplarze recenzji rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Niny Szczepanik-Ścisło opracowane przez prof. dr hab. inż. Bogusława Zakrzewskiego.



Szczecin 22.08.2019r.

Prof. dr hab. inż. Bogusław Zakrzewski
Katedra Klimatyzacji i Transportu Chłodniczego
Wydział Techniki Morskiej i Transportu
Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie
71-065 Szczecin, al. Piastów 41

Administracja
Wydziału Inżynierii Środowiska
Wpłynęło dn. 05. WRZ. 2019
Nr. 1586 szt.

Recenzja
Rozprawy doktorskiej mgr inż. Niny Szczepanik-Ścisło

pt.

„MODELOWANIE TECHNIKĄ OBLICZENIOWEJ DYNAMIKI PŁYNÓW (CFD) I BADANIA LABORATORYJNE NAWIEWNIKA O ZMIENNEJ GEOMETRII ZAPEWNIAJĄCEJ POPRAWĘ KOMFORTU CIEPLNEGO W POMIESZCZENIACH Z ENERGOOSZCZĘDNĄ WENTYLACJĄ O ZMIENNYM STRUMIENIU POWIETRZA (VAV)”

Dyscyplina: Inżynieria Środowiska
Autor: Mgr inż. Nina Szczepanik-Ścisło
Promotor: Dr hab. inż. Agnieszka Lechowska
Promotor pomocniczy: Dr inż. Agnieszka Flaga-Maryańczyk
Kraków 2019

Wprowadzenie

Opinie opracowano w odpowiedzi na pismo Pana dr hab. inż. Tomisława Gołębiowskiego, prof.PK Prodziekana Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej w Krakowie z dnia 29.05.2019 wraz z informacją, że zgodnie z uchwałą Rady Wydziału z dnia 27 maja 2019 zostałem powołany na recenzenta pracy doktorskiej mgr inż. Niny Szczepanik-Ścisło, której promotorem jest dr hab. inż. Agnieszka Lechowska, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Agnieszka Flaga-Maryańczyk.

Ocena problematyki badawczej pracy

Nieustanny rozwój ilościowy systemów klimatyzacji jest związany z dążeniem do poprawy warunków egzystencji ludzi na całym świecie. Sektor budowlany jest najbardziej energochłonnym działem gospodarki i zużywa do 40% całkowitej energii końcowej. Stąd wykorzystuje się różne rozwiązania w celu ograniczenia zużycia energii, jednym z nich jest zmniejszenie strumienia powietrza wentylacyjnego stosownie do chwilowych zysków ciepła pomieszczeń.

Jednakże, gdy przepływ powietrza obniża się, system może nie być w stanie usunąć wszystkich zanieczyszczeń wewnątrz wentylowanej strefy, gdyż powietrze może nie dotrzeć do najdalszych jego części. Może to powodować kumulację zanieczyszczeń w budynkach, powodując martwe strefy oraz dodatkowo obniżając komfort cieplny w wyniku braku usuwania wytworzonych zysków ciepła. Zalecane parametry dla systemów ze zmiennym przepływem powietrza, w tym dla wskaźnika świeżego powietrza, podane są w normach.

Należy może wspomnieć że w sierpniu 1989 roku Agencja Ochrony środowiska przedstawiła Kongresowi USA raport **”Jakość powietrza w 10 wybranych losowo budynkach publicznych”**, w których zastosowano energooszczędne systemy. Jak stwierdzono stężenia niektórych substancji były około 100 razy wyższe niż na zewnątrz.

W innym raporcie Instytutu Medycyny **„Alergeny w pomieszczeniach zamkniętych. Ocena i zwalczanie szkodliwych skutków”** wykazano że co 10 obywatel USA zapada na choroby alergiczne, a blisko 40% ma przeciwciała IgE w odpowiedzi na alergen środowiskowe.

Pomimo przepisów, problem wysokiego stężenia zanieczyszczeń i/lub braku komfortu cieplnego istnieje zarówno w domach jednorodzinnych, budynkach wybudowanych w klasycznym standardzie jak również w budynkach szczelnych (pasywnych i zero energetycznych). Problem ten występuje w wielu obiektach handlowych, sportowych, szkołach, przedszkolach, budynkach biurowych itp., co oznacza, że istnieje wyraźnie zarysowany problem w całym sektorze budowlanym.

Formalna analiza rozprawy

Maszynopis dysertacji mgr inż. Niny Szczepanik-Ścisło, przedstawionej do recenzji, obejmujący łącznie 128 stron w tym: spis treści, tekst pracy, 5 tabel, 48 rysunków i 18 rysunków w streszczeniu w języku polskim, spis cytowanej literatury zawiera 92 pozycje, w tym 88 to pozycje obcojęzyczne .

Tytuł pracy jest komunikatywny, adekwatny do treści maszynopisu. Układ rozprawy jest logiczny, ograniczony do zagadnień merytorycznych, niezbędnych dla przeprowadzenia wywodu zgodnego z koncepcją Doktoranta.

Zasadnicza część pracy składa się z 9 rozdziałów, a mianowicie: 1. Wstęp. 2. Jakość powietrza wewnętrznego z systemami VAV. 3. Plan badań i cele. 4. Koncepcja i projekt nowego nawiewnika. 5. Symulacje CFD. 6. Walidacja wyników symulacji. 7. Wpływ strumienia na komfort termiczny. 8. Analiza i badania PIV. 9. Podsumowanie i wnioski. Literatura, spis rysunków i spis tablic. Prace kończy obszernie podsumowanie w języku polskim 22 str. Rozdział pierwszy poprzedzają: nomenklatura, symbole greckie i skróty. Rozdziały 1,5,6,7 i 8 zawierają podrozdziały.

Praca jest przygotowana bardzo starannie i napisana pięknym językiem angielskim. Na uwagę zasługuje staranne opracowanie wyników oraz zamieszczenie rysunków ułatwiających studiowanie pracy.

Merytoryczna analiza pracy

We wstępie Autorka przybliżyła znaczenie regulacji wydajności strumienia powietrza i jego związek z zużyciem energii. Zasadniczym celem badań było opracowanie innowacyjnych rozwiązań z wykorzystaniem nawiewnika o dynamicznie zmieniającej się geometrii. Został on zaprojektowany w taki sposób, aby mógł utrzymać stały, optymalny zasięg strugi w pomieszczeniu pomimo zmieniającej się ilości nawiewanego powietrza, co jest typowe dla charakterystyki systemów VAV. Pozwoli to utrzymać komfort cieplny i przeciwdziałać kumulacji zanieczyszczeń.

Jednym z głównych elementów wpływających na dystrybucję powietrza jest nawiewnik. Jak wykazały badania wielu autorów, zrównoważenie i dystrybucja przepływu powietrza w systemach klimatyzacyjnych VAV jest jednym z głównych wyzwań. W swoich badaniach ustalili oni, że nie ma standardowej metody zrównoważenia i dystrybucji przepływu powietrza przez strefy w systemach klimatyzacji VAV co podkreśla Doktorantka.

Pomimo wielu zalet, w tym oszczędności energii, systemy VAV mają także szereg wad takich jak: niedostarczenie odpowiedniej ilości świeżego powietrza, stagnacja powietrza (może prowadzić do wzrostu stężenia substancji chemicznych), przeciągi i hałas. Pierwsze dwa problemy są najistotniejsze dla niniejszej pracy, ponieważ biorą pod uwagę jakość powietrza w pomieszczeniu i mogą być związane z geometrią nawiewnika.

Prototyp nowego nawiewnika

Systemy VAV reagują na obciążenie cieplne w wentylowanych strefach. Kiedy obciążenie cieplne strefy obniża się, przepływ powietrza się zmniejsza, co skutkuje oszczędnością energii. Pomimo tego, że jest to odpowiedź na równowagę cieplną, istnieje ryzyko, że zmniejszony strumień świeżego powietrza pozostawi przestrzeń, które nie są odpowiednio wentylowane. Koncepcja nowego nawiewnika opiera się na pomysle, że dostosowuje on swoją geometrię do zmieniających się warunków panujących w systemie w celu zapobiegania takim sytuacjom.

Konstrukcja nawiewnika z dynamicznie zmieniającą się geometrią opiera się na zmianie jego średnicy. Koncepcję projektową pokazała Doktorantka na rysunkach. Dynamiczne dopasowanie geometrii nawiewnika ma na celu zmianę prędkości powietrza nawiewanego w miarę zmniejszania się strumienia powietrza przepływającego przez system tak, aby jego zasięg pozostał taki sam. Podstawą nowego projektu jest koncepcja, że geometria może się zmieniać zgodnie z sygnałami w systemie, które wskazują na zmianę przepływu powietrza. Nawiewnik zaprojektowano w taki sposób, aby jego średnica zmniejszała się wraz ze spadkiem przepływu powietrza. Jeśli przepływ znajduje się poniżej pewnego progu granicznego, pierścienie zewnętrzne zamykają się, zmniejszając średnicę i zwiększając prędkość powietrza wpływającego do wentylowanej strefy.

Symulacje numeryczne CFD

Celem badań CFD było opracowanie modelu komputerowego, który mógłby zostać wykorzystany do dokładnej oceny przepływu powietrza, przy uwzględnieniu

różnych strategii a także różnych badanych struktur. Metody CFD zostały wykorzystane przez wielu naukowców do oceny różnych systemów dystrybucji powietrza. Rozpoczęcie prac od budowy prototypu stanowiska laboratoryjnego może skutkować miesiącami badań i wydatków bez znalezienia rozwiązania problemu. Z tego powodu zdecydowano się na projektowanie systemu VAV z wykorzystaniem modelowania i analizy CFD.

Do badania wybrano program ANSYS Fluent, ponieważ zapewnia on wszechstronne możliwości modelowania szerokiej gamy problemów z nieściśliwym i ściśliwym medium, laminarnym i turbulentnym przepływem płynu oraz możliwością przeprowadzenia analizy stanu ustalonego lub dynamicznie zmiennego.

Symulacje zostały przeprowadzone w celu określenia możliwości zachowania zasięgu strugi przepływu powietrza w konfiguracji ze zmianą natężenia przepływu powietrza przez system. Ponieważ dostarczanie świeżego powietrza jest niezbędne dla zapewnienia odpowiedniego komfortu cieplnego i jakości powietrza, ważne było stworzenie modelu, który nie zakłóca przepływu ani nie obniża jakości powietrza.

Rozważono trzy przypadki, w których uwzględniono przepływ powietrza równy: 330 m³/h jako maksymalny przepływ powietrza; 226 m³/h jako średni przepływ powietrza; - 158 m³/h jako minimalny przepływ powietrza. Zastosowano model osiowosymetryczny. Geometria analizowanego modelu została przedstawiona na rysunkach i została dostosowana do warunków panujących na zbudowanym stanowisku laboratoryjnym oraz wymagań stosowanego modelu symulacyjnego. Zaprojektowano również komorę wyrównawczą dla strugi powietrza.

Badania laboratoryjne

Celem badań przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym było zbadanie koncepcji nawiewnika ze zmienną geometrią i potwierdzenie wyników symulacji komputerowych. Zarówno stanowisko laboratoryjne jak i warunki eksperymentów zostały zaprojektowane i przeprowadzone w celu umożliwienia pełnego porównania z wynikami symulacji CFD. Prototyp został zaprojektowany zgodnie z normą europejską EN12238 i wykonano go ze stali nierdzewnej. Koncepcję stanowiska pomiarowego pokazano na rysunkach.

Stanowisko laboratoryjne zostało zbudowane w pomieszczeniu, w którym możliwa była kontrola warunków środowiskowych. Dostosowano je tak, aby odzwierciedlało zmieniające się warunki systemu VAV. Ponieważ wentylator wyposażono w falownik podłączony do napędu, można było zmieniać przepływ powietrza w zależności od potrzeb. Sam przepływ powietrza obliczono zgodnie z obowiązującymi normami poprzez zastosowanie kryzy pomiarowej.

Po wykonaniu pomiaru na kryzie powietrze wpływało do komory wyrównawczej, gdzie przepływ został wyrównany przez szereg kratak prostujących przepływ powietrza, eliminując dodatkowo turbulencje. Następnie strumień powietrza docierał przez nawiewnik do pomieszczenia badawczego

Po wlocie powietrza do strefy testowej zastosowano termoanemometr do pomiaru prędkości. Pomiar prędkości przepływu powietrza dokonywano co 30 cm zwiększając dystans od nawiewnika. Położenie anemometru ustalono dla każdego

punktu pomiarowego za pomocą lasera krzyżowego. Średnica sondy anemometru była na tyle mała (6 mm), że nie zaburzała przepływu strugi do pomieszczenia.

Wyniki symulacji numerycznych

Aby określić czy zmiana konstrukcji nawiewnika poprawiła warunki systemu VAV przez utrzymanie stałego zasięgu strugi przeprowadzono serię symulacji przy użyciu aplikacji ANSYS Fluent z modelem turbulencji k- ω .

Pierwszym krokiem była analiza zmiany zasięgu strugi powietrza bez zmiany średnicy nawiewnika dla różnych strumieni przepływu powietrza.

Zasięg strugi określono jako odległość, w której prędkość powietrza spada do 0,5 m/s. Jest to graniczna wartość po osiągnięciu której powietrze nie będzie płynąć do dalszych obszarów wentylowanego pomieszczenia. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach, gdzie został zmniejszony strumień powietrza z maksymalnego na minimalny bez zmian w geometrii nawiewnika. Zgodnie z przypuszczeniami, podczas zmniejszania strumienia przepływu powietrza z maksymalnego do minimalnego przy stałym ustawieniu średnicy nawiewnika zasięg strugi zmniejszył się z 7,5 m do około 4 m.

Aby przeciwdziałać obniżeniu zasięgu strugi powietrza, zastosowano nawiewnik z adaptacyjną geometrią. Podczas testów zmieniono średnicę zgodnie z projektem przedstawionym na rysunkach oraz przetestowano różne ustawienia końcowe. Wielkość przepływu została zmieniona z przepływu maksymalnego na przepływ średni i minimalny. Równocześnie średnica nawiewnika została obniżona automatycznie od $\Phi 200$ mm przez $\Phi 160$ mm do $\Phi 100$ mm (ustawienie dla średniego i minimalnego przepływu odpowiednio w celu przyspieszenia przepływu powietrza). Wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono na rysunkach. Zasięg strugi w trzech przypadkach jest w przybliżeniu taki sam i wynosi od 7 m do 7,5 m. Wyniki symulacji potwierdziły, że możliwe jest przyjęcie takiej geometrii nawiewnika, aby utrzymać stały zasięg strugi powietrza pomimo zmieniającego się przepływu powietrza przez system. Aby to sprawdzić przeprowadzono testy laboratoryjne w celu oceny poprawności symulacji.

Wyniki badań laboratoryjnych

Wszystkie wyniki badań laboratoryjnych przedstawiono na rysunkach, gdzie porównano zasięg strugi dla każdego przypadku. Wyniki jednoznacznie dowodzą, że podobnie jak w symulacjach, można utrzymać stały zasięg strugi powietrza pomimo zmieniającego się przepływu przez system poprzez zastosowanie nawiewnika ze zmienną geometrią. Strumień powietrza nawiewanego zmieniał się z 158 m³/h do 330 m³/h.

Dodatkowo, dla każdego przypadku stworzono wykresy rozptyłu powietrza, aby pokazać, w jaki sposób zmienia się przepływ nie tylko wzdłuż osi nawiewnika. Zmierzono odległość od nawiewnika zarówno w pionie jak i w poziomie, do momentu kiedy prędkość strugi powietrza osiągnęła 0,5 m/s. Ponownie pomiary wykonano zwiększając dystans od nawiewnika w pionie oraz poziomie o 30 cm.

Pomiar rozptyłu powietrza przeprowadzono, ponieważ istnieje szereg efektów dynamicznych, które mogą wpływać na rozkład strugi powietrza w pomieszczeniu

zwłaszcza, gdy jego prędkość spada. Najważniejsze z nich to: profil prędkości, pulsacje przepływu, efekty mechaniczne i otaczająca atmosfera, w tym efekty cieplne. W przypadku badań laboratoryjnych, zmiany cieplne w otoczeniu nie stanowiły problemu ponieważ pomieszczenie testowe było utrzymywane w stabilnych warunkach a testy przeprowadzono w warunkach izotermicznych.

Na rysunkach pokazano poszczególne przypadki odpowiednio dla maksymalnego przepływu powietrza, przez średnie aż do minimalnego przepływu powietrza, porównując wyniki symulacji z pomiarami. W punkcie zero na osi odciętych umiejscowiony jest środek nawiewnika.

Aby określić rozbieżność wyników symulacji od wyników pomiarów, wykonano dwa obliczenia błędów w celu sprawdzenia dokładności: średni względny błąd procentowy - MAPE i średni kwadratowy błąd - RMSE. Wskaźniki te zostały wybrane, ponieważ mogą być wykorzystywane do oceny dokładności proponowanych modeli jak w pracach wielu autorów.

RMSE jest często stosowaną miarą różnic między wartościami (próbka i populacja) przewidywanymi przez model lub estymator a wartościami faktycznie obserwowanymi. MAPE służy do porównywania dokładności prognoz, takich jak symulacje z wynikami pomiarów.

Wartości tych wskaźników dla badanych przypadków przedstawiono w tabeli. Najlepiej symulację odzwierciedlają minimalny przepływ, a najgorzej maksymalny. Jednakże największa osiągnięta wartość błędu mieści się poniżej 10%, co można uznać za satysfakcjonujące.

Komfort cieplny w pomieszczeniach

Istnieje wiele wskaźników komfortu cieplnego, które pomagają określić jego poziom. Najbardziej popularne wskaźniki to PMV (przewidywana ocena średnia) i PPD (przewidywany odsetek niezadowolonych). Ich wartości wskazują czy środowisko wewnętrzne nie jest ani za ciepłe ani za chłodne dla użytkowników oraz jaki jest odsetek niezadowolonych z komfortu cieplnego osób w pomieszczeniu. Definicje wskaźników PMV i PPD można znaleźć w książce Fanger'a i normie EN ISO. W niniejszej pracy wykonano analizę PMV i PPD w module programu Ansys Fluent aby zbadać wpływ nawiewnika na komfort. Przeprowadzono szereg symulacji mających na celu ocenę czy struga nawiewanego powietrza w różnych przypadkach zapewnia komfort cieplny.

Aby otrzymać wyniki obliczeń wskaźników komfortu cieplnego, przyjęto 6 następujących parametrów (jednakowe we wszystkich symulacjach), odpowiadające sytuacji w sezonie letnim:

1- wilgotność względna powietrza, 2- temperatura powietrza: 3- prędkość powietrza zaczerpnięta z wyników symulacji PMV i PPD; 4- temperatura promieniowania, 5- oporność cieplna odzieży, 6- tempo metabolizmu: 1,2 met (odpowiadające lekkiej pracy w pozycji siedzącej, np. w pomieszczeniu biurowym).

Wyniki obliczeń dla maksymalnego, średniego i minimalnego przepływu powietrza przedstawiono na rysunkach oraz w tabeli. Wyniki podane w tabeli

pokazują, że oba parametry komfortu cieplnego sięgają od komfortu aż do skrajnego dyskomfortu. Jednak wyniki te dotyczą całej geometrii, w tym komory wyrównawczej i samego nawiewnika.

Oba wskaźniki pokazują, że komfort cieplny jest utrzymywany w odległości zasięgu strugi w przewidywanym obszarze pobytu ludzi (gdy prędkość spada do 0,5 m/s). Podobne wyniki obliczeń można zaobserwować dla średniego i minimalnego przepływu.

Podobnie jak w przypadku maksymalnego przepływu powietrza, w obu przypadkach PMV i PPD mają wysokie wartości w pobliżu nawiewnika i wskazują dyskomfort. Jednakże, gdy prędkość powietrza obniża się w odległości 7 m od nawiewnika, PMV i PPD są równe odpowiednio -0,5 i 7,3% dla średniego przepływu powietrza oraz -0,3 i 6,9% odpowiednio dla minimalnego przepływu powietrza.

Wyniki symulacji wykazały, że nawiewnik z dynamicznie zmieniającą się geometrią utrzymuje komfort cieplny i stały zasięg strugi we wskazanej odległości od nawiewnika.

Analiza PIV

Poprzednie rozdziały pokazały wyniki jednego przypadku, w którym zasięg strugi został zachowany. Aby zobaczyć, w jaki sposób zasięg strugi powietrza zmienił się dla różnych warunków, przeprowadzono serię pomiarów PIV (Particle Image Velocimetry) pozwalających zobrazować przepływ płynu.

Technologia PIV rozwija się dynamicznie od około 30 lat dzięki większej dostępności metoda PIV stała się popularnym sposobem pomiaru przepływów powietrza i ich charakterystyk w ostatnich latach ze względu na nieinwazyjną metodę pomiaru. Ponadto pomiary PIV pozwalają na pomiar pola prędkości dla każdej chwili w danym przedziale czasowym. Dzięki tym cechom można bardzo dokładnie zmierzyć charakterystykę przepływu powietrza.

System pomiaru jest oparty na rejestracji cząstek znacznikowych wprowadzonych w strumień powietrza, które są następnie oświetlane przez laser. Laser wysyła sygnały w określonym przedziale czasu, które są odbijane od cząsteczek znacznika. Odbicie jest monitorowane przez kamerę. Dzięki znanym odstępom czasowym między promieniami lasera, możliwe jest obliczenie wektorów prędkości powietrza.

Badania w ramach niniejszej pracy podzielono na dwa etapy. Najpierw przeprowadzono serię symulacji CFD podobnych do symulacji w poprzednich rozdziałach, Następnie przeprowadzono pomiary PIV w dwóch różnych odległościach kontrolnych, aby zbadać, jak zmienił się zasięg strugi i czy wyniki symulacji były skorelowane z pomiarami. Badania zostały wykonane dla dwóch ekstremalnych przepływów przez system - wysoki przepływ powietrza 750 m³/h i niski przepływ powietrza 360 m³/h.

Symulacje przeprowadzone z wykorzystaniem narzędzia ANSYS Fluent miały te same parametry wejściowe co pomiary w technice PIV. Aby porównać otrzymane

wyniki obliczeń, ukazane na rysunkach przedstawiające pomiary PIV i symulacje CFD przy wlocie powietrza do pomieszczenia mają tę samą skalę prędkości: od 0 m/s do 17 m/s.

Na rysunkach ukazano, że wraz ze zmniejszaniem się średnicy, rośnie prędkość powietrza przy wlocie do pomieszczenia, pomimo zmniejszenia przepływu przez system

Aby zobaczyć czy zmiana prędkości przy nawiewniku wpływa na zasięg strugi wykonano pomiary w odległości 6 m od nawiewnika. W tym przypadku wyniki pomiarów PIV oraz wyniki symulacji miały identyczny zakres prędkości: od 0.4 m/s do 1.9 m/s. Wyniki porównania badań oraz obliczeń zostały przedstawione na rysunkach.

Podsumowanie i wnioski

Celem Doktorantki było zbadanie możliwości poprawy warunków środowiska wewnętrznego w dużych przestrzeniach, w których stosuje się systemy wentylacji VAV. W pracy skupiono się na ostatnim elemencie systemu: na nawiewniku. Jego geometria miała się zmieniać wraz ze zmieniającym się przepływem w systemie wentylacyjnym, aby utrzymać stały zasięg strugi pomimo malejącego strumienia powietrza.

Aby zbadać wpływ nowego nawiewnika, przeprowadzono szereg symulacji CFD oraz testy laboratoryjne. Wyniki potwierdziły, że przy zmieniającej się geometrii zasięg strugi był stabilny, mimo że przepływ znacząco zmalał od 330 m³/h do 158 m³/h.

Zbadano również wpływ zmian strumienia powietrza na komfort cieplny poprzez określenie wartości wskaźników PMV i PPD. W każdym przypadku komfort cieplny był utrzymywany w odległości 7 m od nawiewnika, gdzie prędkość przepływu spadła do około 0,5 m/s, pomimo zmieniających się warunków w systemie wentylacyjnym. Dowodzi to, że świeże powietrze nie tylko dotarłoby do osób w pomieszczeniu, ale także zapewniałoby im komfort cieplny.

Dodatkowo przeprowadzono pomiary PIV dla wysokich wartości przepływów powietrza przez system, aby zbadać jak wpływają na charakterystykę nawiewnika. W badaniu uwzględniono dwa strumienie: 750 m³/h i 360 m³/h. Wyniki badania wykazały, że podobnie jak w poprzednich przypadkach, gdy zastosowano proponowany nawiewnik z dynamicznie zmieniającą się geometrią, zasięg strugi powietrza pozostawał stały. Oznacza to, że można poprawić jakość powietrza w pomieszczeniach stosując systemy VAV poprzez wykorzystanie nawiewnika z dynamicznie zmienną geometrią.

Wyniki symulacji, pomiary laboratoryjne i pomiary PIV wykazały, że dystrybucja powietrza uległa poprawie, a komfort cieplny został utrzymany w wentylowanej strefie.

Należy dodać jednak, że istnieje ryzyko związane ze zwiększoną prędkością powietrza w pobliżu nawiewnika, gdy następuje zmiana jego średnicy. Korzystnie byłoby kontynuowanie badań dla zastosowania nawiewnika z innymi systemami VAV, które miałyby inne charakterystyki przepływu. Doktorantka planuje podjąć

w przyszłości badania mające to na celu , a także dalsze udoskonalanie metod wentylacji z wykorzystaniem energooszczędnych systemów VAV.

Wniosek końcowy

Podsumowując należy stwierdzić że podjęte przez mgr inż. **Ninę Szczepanik-Ścisło**, badania i uzyskane wyniki są ważne z poznawczego i aplikacyjnego punktu widzenia. Praca wnosi nowe oryginalne i istotne elementy do tej dziedziny.

Na tle szerokiej analizy podjętego problemu badawczego, w oparciu o najnowszą literaturę, cel pracy został jasno sprecyzowany, a do jego realizacji została dobrana metodyka badań. Uzyskane interesujące wyniki badań przedstawiono na rysunkach i tabelach, dały podstawę do dobrze przeprowadzonej analizy i sprecyzowania wyników. Doktorantka skoncentrowała się na istotnych, związanych z celem badań problemach, a ich rezultaty szeroko przedyskutowała w oparciu o literaturę. Świadczy to o rozległej i ugruntowanej Jej wiedzy w badanym temacie.

Największym osiągnięciem pracy jest wykonanie badań laboratoryjnych potwierdzających wyniki symulacji w programie ANSYS Fluent, wyniki symulacji, pomiary laboratoryjne i pomiary PIV wykazały, że dystrybucja powietrza uległa poprawie, a komfort cieplny został utrzymany w wentylowanej strefie.

Reasumując mogę stwierdzić, że przedstawiony maszynopis rozprawy, zawierający opisane w nim metody rozwiązania problemu, wyniki badań, analizy wyników i wnioski zaproponowane przez doktorantkę, mgr inż. Ninę Szczepanik-Ścisło, w mojej opinii spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z przepisami ustawy określone w rozdziale II art. 13 pozycja 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule Naukowym w Zakresie Sztuki, (Dz. U. 03. Nr 65, poz.595 z dn. 16.04.2003 z późniejszymi zmianami).

Jednocześnie ze względu na szeroki i bardzo aktualny zakres badań oraz wyróżniające się stylistycznie, graficznie i redakcyjne opracowanie wyników wraz z ich dużą wartością poznawczą i utylitarną wnioskuję o wyróżnienie pracy.

Drobne uwagi przekazano Doktorantce.



prof. dr hab. inż. Bogusław Zakrzewski, prof. zw.