

Prof. dr hab. inż. Jan Danielewicz

Wrocław 27.11. 2025 r.

Politechnika Wrocławska

Wydział Inżynierii Środowiska

Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa , Gazownictwa i Ochrony Powietrza

W7/K41

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr. inż. Monika
Jakubiak pt:”Wybór energooptimalnego odzysku ciepła i
konfiguracji chłodziw w centralach systemów
klimatyzacyjnych pomieszczeń czystych”**

Podstawa formalna opracowania recenzji

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Wrocławskiej Prof. Zbigniewa Nadolnego Nadolnego

z dnia 18.09.2025 (WISIE 63.59.2025).

Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt: Wybór energooptimalnego odzysku ciepła i konfiguracji chłodziw w centralach systemów klimatyzacyjnych pomieszczeń czystych autorstwa mgr inż. Moniki Jakubiak. Promotorem rozprawy jest Pan dr hab. inż. Mieczysław Porowski, prof. uczelni.

Zawartość opracowania

Przedstawiona do recenzji praca składa się z 11-tu rozdziałów, bibliografii i wykazu załączników.

Praca rozpoczyna się streszczaniem w języku polskim oraz w języku angielskim oraz zawiera wykaz ważniejszych oznaczeń .

. Doktorantka zwróciła uwagę na fakt, iż wraz z rozwojem nowych technologii, występuje zapotrzebowanie na pomieszczenia czyste. .Utrzymanie wymaganych parametrów powietrza w takich pomieszczeniach wymaga relatywnie dużych strumieni powietrza poddawanych filtracji wymaga również zachowania odpowiednich układów ciśnień, aby w celu zapobieganiu rozpowszechniania się zanieczyszczeń pomiędzy pomieszczeniami, Systemy klimatyzacyjne

(HVAC). zapewnić muszą wymagany poziom czystości pyłowej, stosowne temperatury i wilgotność powietrza. Wszystko to sprawia, iż systemy te generują relatywnie duże zużycie energii. Przykładowo, w zakładach produkujących półprzewodniki średnio zużycie energii elektryczna jest 3-krotnie większe niż w innych budynkach komercyjnych.

Rozdział 2-gi; Klasyfikacja pomieszczeń czystych ,parametry powietrza wewnętrznego

Jako pomieszczenie czyste określono wydzielone obszary bilansowania w których utrzymywane jest ściśle określone stężenie cząstek zanieczyszczeń pyłowych lub mikrobiologicznych . Jedną z pierwszych norm klasyfikacji pyłowej ,która wywarła największy wpływ na projektowanie oraz działanie pomieszczeń czystych by a norma z 1963 roku i opracowana przez zespół Sandia Corporation norma Federal Standard 209. W tej najnowszej wersji klasyfikacja pomieszczeń czystych dokonana jest na podstawie liczby cząstek $\geq 0,5\mu m$

Na m3 tworząc łącznie 13 klas. W rozdziale tym doktorantka opisała szereg norm ISO obejmujących zakres dotyczący projektowania , testowania oraz obsługi pomieszczeń czystych .Przykładowo Norma ISO 146-44-1 Klasyfikacja czystości powietrza przedstawia metodologię klasyfikacji pomieszczeń czystych a podział na 9 zdefiniowanych klas ISO oparto na równaniu wg d tej normy.

Autorka zestawiała klasyfikację pomieszczeń czystych i wg poz.lit.eraturowa [10] -tabela 2.1 oraz tabela 2.2. na stronie 14. Na stronie 15 w tabeli 2.2 przedstawiono czystość mikrobiologiczną W rozdziale tym autorka pracy opisała wymagania dotyczące parametrów powietrza dla sal operacyjnych w szpitalach oraz zakładów produkujących leki.ⁱ

Rozdział 3-ci Stan badań nad optymalizacją systemów HVAC

W rozdziale tym autorka opisała, iż optymalizacja struktury systemów HVAC jest jednym z kroków w dążeniu do zmniejszenia zużycia energii (zmniejszenie kosztów eksploatacji instalacji) . Autorka zacytowała tutaj wielu światowych badaczy tego problemu. Podano liczbowe przykłady (procentowe zmniejszenie zużycia energii w % w porównaniu z instalacjami tradycyjnymi np., 4,3 %) w porównaniu z systemem tradycyjnym (str.18, 19 prac). W rozdziale tym opisano również jakie oszczędności energetyczne daje wykorzystanie nawilżania adiabaticznego, pozwoliło to na osiągnięcie czterokrotne na zużycie energii w tym procesie chłodzenia, zamiast nawilżania parowego oszczędności czterokrotne na zużyciu

energii. W przypadku zastosowania odzysku energii np., energii po stronie wody (z wykorzystaniem wież chłodniczych oraz odzysku energii po stronie powietrza (membranowy wymiennik ciepła). W tym przypadku po stronie wody uzyskano odzysk energii na poziomie 10,2 – 13,1 % oraz 0 8,5 – 11,2 % po stronie powietrza. Są to dane z badań N Kwn i in, [29].

Rozdział 4. Problem badawczy, cel i teza pracy;

W rozdziale tym autorka pracy wskazała, iż w literaturze występuje zbiór różnych rozwiązań systemów HVAC pomieszczeń czystych, natomiast brak jest ścisłych kryteriów wyboru. Przy założeniu, że optymalizacja struktury systemów HVAC pomieszczeń czystych wg kryteriów minimalizacji nakładów energetycznych na przetłaczanie powietrza jest zagadnieniem dobrze rozpoznanym w teorii i praktyce, dotyczy to zwłaszcza systemów zdecentralizowanych/

Natomiast w zakresie optymalizacji struktury systemów HVAC pomieszczeń czystych wg kryterium minimalizacji nakładów energetycznych na obróbkę termodynamiczną powietrza zagadnienie rozpatrywane jest jako jakościowe, ilościowych badań jest relatywnie mało i dotyczą one głównie i dotyczyła one głównie głównie badań dotyczących w zakresie wyboru recyrkulacji powietrza i jest ona dopuszczalna. Czy też opcji odzysciepła lub rezygnacji z tego procesu., konfiguracji chłodnic powietrza w centralach klimatyzacyjnych itp.

Na podstawie studiów literaturowych doktorantka sformułowała problem badawczy którym jest brak metody wyznaczania energooptymalnych struktur HVAC pomieszczeń n czystych uwzględniające dopuszczalne konfiguracje komponentów.

Cele szczegółowe rozprawy dotyczą;

- wyznaczenia energooptymalnych konfiguracji struktur odzysku energii cieplnej w systemach HVAC dla pomieszczeń n czystych,
- wyznaczenia energooptymalnych konfiguracji chłodnic powietrza w centralach klimatyzacyjnych systemów HVAC dla pomieszczeń czystych oraz wyznaczenie energooptymalnych algorytmów sterowania systemami HVAC pomieszczeń czystych o optymalnych strukturach obejmujących system odzysku energii i tzw, optymalną konfigurację chłodnic powietrza.

Na podstawie przeprowadzonych analiz doktorantka postawiła następujące tezę rozprawy:

- **Cel główny:** Opracowanie procedury optymalizacyjnej dla systemów HVAC w pomieszczeniach czystych.
- **Teza:** Energooptymalne struktury HVAC zależą od kombinacji kluczowych parametrów:
 - Klasa czystości (C_s)
 - Udział powietrza zewnętrznego (α_0)
 - Jednostkowe obciążenie chłodnicze (q)

Energooptymalne struktury systemów HVAC pomieszczeń czystych, w tym opcje układu odzysku ciepła i konfiguracji chłodnic powietrza w centralach klimatyzacyjnych, są funkcjami kombinacji kluczowych parametrów: klasy czystości (C_s) udziału powietrza zewnętrznego (α_0) /jednostkowego obciążenia chłodniczego (q_i) oraz parametrów klimatu zewnętrznego.

Dla tak założonych celów i udowodnienia postawionej tezy pracy doktorantka sformułowała następujące zadania badawcze obejmujące systemy HVAC pomieszczeń czystych;

1. Opis matematyczny systemu HVAC pomieszczenia czystego za pomocą wektora będącego funkcją parametrów stałych i zmiennych decyzyjnych.
2. Wyznaczenie zbioru wszystkich możliwych wariantów systemów HVAC, warunków ograniczających oraz zbioru wariantów dopuszczalnych systemu HVAC spełniających funkcję użytkową i ograniczenia
3. Wyznaczenie struktur systemów recyrkulacji mów HVAC z tzw. optymalnymi opcjami recyrkulacji, kluczowych parametrów stałych.

W celu realizacji wymienionych zadań badawczych zastosowano jako narzędzie badawcze analizę systemową, modelowanie symulacyjne i optymalizację wielopoziomową.

Rozdział 5. Zagadnienie optymalizacji i metoda rozwiązania w aplikacji do wyznaczania jest minimum zapotrzebowania na energię pierwotną systemów HVAC pomieszczeń czystych.

Algorytm ogólny zagadnienia wyboru energooptymalnego systemu HVAC Doktorantka przedstawiła na rys.5.1. Z pomocą, którego współrzędne stanowią parametry stałe oraz zmienne decyzyjne (równanie 5.1 str.26),

Funkcją celu na każdym etapie wyznaczania wariantów optymalnych jest minimum zapotrzebowania na energię pierwotną.

W pracy przedstawiono również wpływ klimatu zewnętrznego na wyniki symulacji (klimat subarktyczny -Rosja, klimat tropikalny Brazylia, klimat subtropikalny-Tajwan, kontynentalny-Polska

Rozdział 6. Dopuszczalne struktury systemu HVAC pomieszczeń czystych

Przy wyznaczeniu struktur dopuszczalnych dla systemów HVAC założono;

- temperaturę,
- wilgotność względną powietrza,
- dopuszczalne stężenie zanieczyszczeń,
- ‘klasę czystości,
- ‘nadciśnienie w pomieszczeniu,
- ‘udział powietrza zewnętrznego w strumieniu powietrza klimatyzacyjnego.

Rozdział 7. Optymalne struktury układów recyrkulacji powietrza w systemach HVAC pomieszczeń czystych

Układy tzw . optymalne z recyrkulacją powietrza opracowano na podstawie prac Porowskiego [44] i Jakubiak {45}’ W opracowaniu systemów HVAC tutaj warianty z są tutaj wariantami dopuszczalnymi.

Rozdział 8. Optymalne układy odzysku

. Optymalne układy konfiguracji chłodnic powietrza w centralach klimatyzacyjnych w systemach HVAC pomieszczeń czystych. W rozdziale tym Doktorantka opisała zbiór rozwiązań dopuszczalnych . Doktorantka stwierdziła m, in, iż parametrami stałymi jest m.in. parametr czystości powietrza, udział powietrza zewnętrznego,..

Rozdział 9. Optymalne układy konfiguracji chłodnic powietrza w centralach klimatyzacyjnych systemów HVAC \pomieszczeń czystych. Były to struktury dopuszczalne systemów HVAC,

W modelach symulacyjnych przyjęto minimalne zapotrzebowanie na energię pierwotną .

Zgodnie z algorytmem optymalizacji (rys 5.1). na etapie wyznaczania optymalnych konfiguracji układu chłodnic w centralach kolimacyjnych są systemy z optymalnymi układami odzysku ciepła i optymalnymi układami recyrkulacji. Parametrami

stałymi na tym etapie były m.in. klasa czystości, udziału powietrza zewnętrznego, jednostkowego obciążenia chłodniczego. Zmiennymi decyzyjnymi są chłodzenie, opcje klimatu, .

Schemat ogólny struktur konfiguracji chłodnic powietrza przedstawiono na schemacie 9.1 (str. 82)

Rozdział 10 Weryfikacja wyników obliczeń symulacyjnych

W wyniku obliczeń na podstawie modeli symulacyjnych otrzymano wartości energii u użytkowej, energii końcowej i energii pierwotnej. dla poszczególnych wariantów systemów HVAC pomieszczeń czystych. Weryfikacji tych obliczeń dokonano na podstawie porównania otrzymanych wyników z wynikami badań dostępnych w literaturze. Jako źródło danych wykorzystano publikacje [16] w spisie literatury.

ROZDZIAŁ 11 podsumowanie pracy i wnioski.

W pracy Doktorantka zaprezentowała zagadnienie wyboru energooszczędnego odzysku ciepła i konfiguracji chłodnic w centralach klimatyzacyjnych pomieszczeń czystych. Na podstawie badań literaturowych i oceny aktualnego stanu wiedzy zidentyfikowano problem badawczy, Zdefiniowano problem badawczy, zdefiniowano cele badawcze oraz zdefiniowano cele badawcze oraz sformułowano tezę rozprawy zgodnie z którą Energooszczędne struktury systemów HVAC pomieszczeń czystych, w tym opcje układów odzysku ciepła i konfiguracji chłodnic powietrza są funkcjami kombinacji kluczowych parametrów; klasy czystości powietrza, udziału powietrza zewnętrznego, jednostkowego obciążenia oraz parametrów klimatu zewnętrznego. Do odowodnienia postawionej tezy sformułowano zadania badawcze, a jako narzędzia badawcze wykorzystano analizę systemową, modelowanie symulacyjne i optymalizację wielopoziomową w której funkcją celu było minimum jednostkowego zapotrzebowania na energię pierwotną E_p .

Doktorantka w podsumowaniu wskazała na opłacalność zastosowania odzysku ciepła dla systemów bez recyrkulacji powietrza. Podsumowując, uzyskane wyniki potwierdziły zasadność postawionej tezy badawczej.

Rozdział 12-ty Bibliografia

Rozdział Bibliografii autorka powołuje się na 52 pozycje literaturowe.

Rozdział 11-ty -Załączniki

Autorka zamieściła z wynikami symulacji, w formie zestawień tabel,

Recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Moniki Jakubiak go pt: **”Wybór energooptimalnego odzysku ciepła i konfiguracji chłodziw w centralach systemów klimatyzacyjnych pomieszczeń czystych”** jest opracowana kompleksowo i dobrze uporządkowana. Na podkreślenie zasługuje jasno sprecyzowana funkcja celu w obliczeniach symulacyjnych.

Uwagi i zapytania do autora

- 1, Przy modelowaniu systemu HVAC dla pomieszczeń na stronie podaje Pani , że udział powietrza zewnętrznego w strumieniu powietrza wentylacyjnego jest parametrem stałym.
- 2., Jak zmieniała się sprawność odzysku ciepła w analizowanych systemach odzysku ciepła z różnymi rodzajami wymienników ciepła? Sprawność odzysku ciepła stała czy zmienna w sezonie?
3. Przy analizach odzysku ciepła wskazała Pani, że w niektórych strefach i rodzajach central opłacalność stosowania odzysku ciepła była wątpliwa? Jak to można wytłumaczyć, co by lo decydujące, temperatury, wilgotność powietrza?

Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa Pana mgr inż. Moniki Jakubiak jest rozprawą dobrze opracowaną, usystematyzowaną, z jasno sprecyzowanymi funkcjami celu w zagadnieniach optymalizacyjnych. Jest to szczególnie cenne w aspekcie rozwoju naukowego dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Podsumowując, recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego mieszczące się w zakresie dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka . Osiągnięcie naukowe spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Prawie o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z dnia 20 lipca 2018r z późniejszymi zmianami).

Na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie rozprawy Pani Moniki Jakubiak do publicznej obrony.

27.11.2025

Paulina