

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Jakubiak

pt. „Wybór energooptimalnego odzysku ciepła i konfiguracji chłodziw w centralach systemów klimatyzacyjnych pomieszczeń czystych”

Wstęp

Podstawą przygotowania recenzji jest pismo (znak WISIE.63.59.2025 z 18.09.2025 r.) prof. dr hab. inż. Zbigniewa Nadolnego, Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiego, w związku z powołaniem mnie przez Radę Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Poznańskiej (uchwała z dnia 16.09.2025 r.) na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Jakubiak pt. „Wybór energooptimalnego odzysku ciepła i konfiguracji chłodziw w centralach systemów klimatyzacyjnych pomieszczeń czystych”.

Rozprawa doktorska została przygotowana pod opieką naukową Promotora - dr hab. inż. Mieczysława Porowskiego, prof. PP. Rozprawa składa się z następujących części: streszczenia w języku polskim i angielskim, spis oznaczeń, dziesięć rozdziałów głównych przedstawiających uzasadnienie podjęcia badań, przyjętą metodę badawczą, wyniki przeprowadzonych analiz a także podsumowanie zawierające główne wnioski z przeprowadzonych prac i kierunki dalszych prac badawczych, listę przywołanych pozycji literaturowych oraz trzy, bardzo rozbudowane załączniki, dokumentujące zmienne wprowadzone do modelu, wyniki obliczeń przeprowadzonych przy wykorzystaniu modelu oraz przykład zastosowania algorytmu w procesach decyzyjnych.

Ocena układu rozprawy doktorskiej

Trzon rozprawy stanowi dziesięć rozdziałów podzielonych na następujące części: wprowadzenie, opis stanu wiedzy w zakresie parametrów powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach czystych oraz metod optymalizacji energetycznej rozwiązań klimatyzacji stosowanych w tego rodzaju obiektach, definicja problemu badawczego, celu i tezy pracy, przedstawienie kroków podjętych w celu opracowania algorytmu służącego do określania nastaw związanych z recyrkulacją, urządzeniami do odzysku ciepła oraz chłodzenia powietrza, analiza algorytmu pod kątem specyfiki rozwiązań stosowanych w pomieszczeniach czystych, wyniki symulacji przeprowadzonych przy zastosowaniu opracowanego algorytmu oraz weryfikacja poprawności stosowania modelu a także podsumowanie przeprowadzonych analiz.

W pierwszym rozdziale przedstawiono ogólne wprowadzenie do tematu uzasadniające konieczność przeprowadzenia analiz, wykazując potrzebę dążenia do ograniczenia zużycia energii w pomieszczeniach czystych przy jednoczesnym zapewnieniu wysokich standardów odnośnie jakości środowiska wewnętrznego.

Drugi rozdział rozprawy stanowi przegląd literatury dotyczącej wymagań stawianych parametrom powietrza w pomieszczeniach czystych pod kątem klasy czystości pyłowej i mikrobiologicznej. Informacje te uzupełniono przytoczeniem wymagań dotyczących temperatury powietrza wewnętrznego, wilgotności względnej powietrza w obiektach służby zdrowia, fabrykach półprzewodników przemysłu lotniczym oraz produkcji leków. Rozdział trzeci stanowi niejako uzupełnienie informacji przedstawionych w rozdziale drugim, tj. omówione są kwestie związane z optymalizacją systemów klimatyzacji stosowanych w pomieszczeniach czystych pod kątem ograniczenia zużycia energii. Wprowadzono podrozdziały opisujące zarówno sposoby optymalizacji struktury systemów klimatyzacji, jak i optymalizację algorytmów sterowania systemami klimatyzacji, uzupełniając przeprowadzony przegląd wyraźnym zdefiniowaniem luki w wiedzy a także uzasadnieniem przyjętych założeń w dalszych analizach, tj. w pierwszej kolejności zdefiniowania możliwych struktur systemów klimatyzacji w danym obiekcie, następnie określenia relacji opisujących zależności między strukturami i algorytmami sterowania, aby finalnie móc przeprowadzić analizę wybranych wariantów dla danego obiektu i wyznaczyć warianty spełniające kryterium minimalnego rocznego zużycia energii.

Rozdział czwarty opisuje problem badawczy, wskazując, że praca skupia się na analizie rozwiązań z obszaru recyrkulacji powietrza, zastosowania urządzeń do odzysku ciepła oraz konfiguracji chłodziw w centrali klimatyzacyjnej. Przedstawiono również tezę pracy a także opisano pięć zadań badawczych, których realizacja jest niezbędna do weryfikacji przedstawionej tezy.

W rozdziale piątym przedstawiono autorskie zagadnienie optymalizacji wielopoziomowej oraz metodykę jego rozwiązania, opracowaną na potrzeby aplikacji do wyznaczania energooptymalnych struktur systemów klimatyzacji pomieszczeń czystych. Zaprezentowano algorytm ogólny postępowania, obejmujący systematyczne przejście od zbioru wszystkich możliwych wariantów strukturalnych do zbioru rozwiązań dopuszczalnych i optymalnych, z uwzględnieniem ograniczeń normowych, technologicznych i eksploatacyjnych. System klimatyzacji opisano za pomocą wektorów parametrów stałych i zmiennych decyzyjnych oraz macierzy binarnych, co umożliwiło jednoznaczne odwzorowanie relacji pomiędzy strukturą systemu a jego efektywnością energetyczną. Kluczowym elementem rozdziału jest zdefiniowanie funkcji celu jako minimum rocznego zapotrzebowania na energię pierwotną oraz wskazanie narzędzi obliczeniowych – całorocznych modeli symulacyjnych i metody bezpośredniego przeszukiwania – jako podstawy wyznaczania wariantów optymalnych.

W rozdziale szóstym przedstawiono prace związane ze szczegółową identyfikacją dopuszczalnych struktur systemów klimatyzacji dla pomieszczeń czystych, stanowiącą kluczowy etap procesu optymalizacji. Rozdział obejmuje jednoznaczne zdefiniowanie parametrów stałych normowanych oraz zmiennych decyzyjnych opisujących system, a następnie systematyczne wygenerowanie zbioru wszystkich teoretycznie możliwych wariantów strukturalnych. W dalszej części wprowadzono rozbudowany układ warunków ograniczających (technologicznych, higienicznych, energetycznych, akustycznych, materiałowych oraz związanych z bezpieczeństwem i niezawodnością), które pozwoliły na eliminację rozwiązań niespełniających wymagań projektowych i eksploatacyjnych. Efektem przeprowadzonych analiz jest wyznaczenie zbioru wariantów dopuszczalnych, stanowiącego podstawę dalszych etapów optymalizacji układów recyrkulacji, odzysku ciepła oraz konfiguracji chłodziw.

W rozdziale siódmym skupiono się na analizie i wyznaczeniu optymalnych struktur układów recyrkulacji powietrza w systemach klimatyzacji pomieszczeń czystych. W oparciu o zbiór wariantów dopuszczalnych,

zdefiniowany w poprzednim rozdziale, przeprowadzono wielokryterialną ocenę rozwiązań recyrkulacyjnych w funkcji kluczowych parametrów projektowych, takich jak klasa czystości pomieszczenia, udział powietrza zewnętrznego oraz jednostkowe obciążenie chłodnicze. Wykazano, w sposób usystematyzowany, wpływ zastosowania różnych form recyrkulacji (brak recyrkulacji, recyrkulacja wewnętrzna, zewnętrzna oraz mieszana) na zapotrzebowanie na energię pierwotną systemu klimatyzacji. Wyniki analiz umożliwiły wyznaczenie energooptymalnych wariantów strukturalnych układów recyrkulacji, które stanowią bazę wejściową dla kolejnych etapów optymalizacji, obejmujących dobór odzysku ciepła i konfiguracji chłodnic. Rozdział wnosi istotny wkład poznawczy w zakresie racjonalnego kształtowania struktur recyrkulacyjnych w systemach klimatyzacji pomieszczeń czystych, łącząc rygor formalny z jednoznacznymi wnioskami aplikacyjnymi.

W rozdziale ósmym przedstawiono wyniki badań dotyczących wyznaczania energooptymalnych układów odzysku ciepła w systemach klimatyzacji pomieszczeń czystych. Analizy przeprowadzono dla zbioru struktur dopuszczalnych, wyłonionych w poprzednich etapach optymalizacji, z uwzględnieniem zmiennych decyzyjnych opisujących typ i sposób pracy urządzeń odzysku ciepła oraz wpływu warunków klimatu zewnętrznego. Rozdział zawiera szczegółowy opis modeli symulacyjnych pracy systemu klimatyzacji w ujęciu całorocznym, definicję funkcji celu oraz metodykę obliczania zapotrzebowania na energię pierwotną. Wykazano istotne zróżnicowanie efektywności energetycznej poszczególnych rozwiązań odzysku ciepła w zależności od klasy czystości pomieszczenia, udziału powietrza zewnętrznego oraz strefy klimatycznej. Na podstawie uzyskanych wyników wskazano układy odzysku ciepła o najwyższej efektywności energetycznej oraz sformułowano jednoznaczne wnioski dotyczące zasadności ich stosowania w określonych konfiguracjach systemowych. Rozdział stanowi istotny wkład aplikacyjny pracy, dostarczając praktycznych przesłanek do projektowania energooszczędnych systemów klimatyzacji dla pomieszczeń czystych.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono zagadnienie optymalizacji konkretnych konfiguracji układów chłodnic powietrza w centralach klimatyzacyjnych systemów klimatyzacji. Analizy przeprowadzono dla zbioru wariantów dopuszczalnych, obejmujących struktury systemowe z wcześniej wyznaczonymi energooptymalnymi opcjami recyrkulacji oraz odzysku ciepła. Rozdział zawiera opis zmiennych decyzyjnych charakteryzujących konfigurację układów chłodnic, w tym rozwiązań jedno- i dwutemperaturowych, a także szczegółową prezentację modeli symulacyjnych pracy central klimatyzacyjnych w ujęciu całorocznym. Funkcję celu zdefiniowano jako minimum rocznego zapotrzebowania na energię pierwotną, co umożliwiło jednoznaczną ocenę efektywności energetycznej analizowanych wariantów. Uzyskane wyniki pozwoliły na identyfikację obszarów uzasadnionego energetycznie stosowania chłodzenia dwutemperaturowego, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu warunków klimatu zewnętrznego. Rozdział dostarcza spójnych i praktycznie użytecznych wniosków projektowych, stanowiąc istotne uzupełnienie całościowej metodyki doboru energooptymalnych rozwiązań chłodniczych w systemach klimatyzacji tego rodzaju obiektów.

W rozdziale dziesiątym przedstawiono procedurę weryfikacji wyników obliczeń symulacyjnych uzyskanych w ramach opracowanej metody optymalizacji. W pierwszej części rozdziału określono założenia weryfikacji oraz zestaw danych wejściowych, obejmujących parametry geometryczne, eksploatacyjne i klimatyczne analizowanych systemów. Następnie przeprowadzono obliczenia referencyjne na podstawie danych literaturowych, które posłużyły jako punkt odniesienia do dalszych analiz. W kolejnym etapie wykonano obliczenia z wykorzystaniem autorskiego modelu symulacyjnego, opracowanego na potrzeby niniejszej

rozprawy, dla analogicznych warunków brzegowych i parametrów pracy systemu klimatyzacji. Uzyskane wyniki obejmują m.in. roczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania, chłodzenia, nawilżania oraz zużycie energii elektrycznej przez urządzenia pomocnicze. W końcowej części rozdziału zestawiono i porównano wyniki obliczeń uzyskane z obu podejść obliczeniowych, analizując różnice w wartościach zapotrzebowania na energię oraz charakterystyki pracy systemu. Przeprowadzona procedura weryfikacyjna stanowi uzupełnienie wcześniejszych rozdziałów obliczeniowych i zamyka cykl analiz symulacyjnych realizowanych w pracy.

Rozdział jedenasty stanowi syntetyczne zestawienie rezultatów zrealizowanych prac badawczych i obejmuje podsumowanie kolejnych etapów postępowania badawczego, poczynwszy od sformułowania problemu optymalizacji systemów klimatyzacji pomieszczeń czystych, poprzez identyfikację struktur dopuszczalnych, aż do wyznaczenia wariantów energooptymalnych w zakresie recyrkulacji powietrza, odzysku ciepła oraz konfiguracji układów chłodnic. W sposób uporządkowany zestawiono kluczowe wyniki analiz symulacyjnych, wskazując zależności pomiędzy strukturą systemu klimatyzacji a kombinacją parametrów decydujących, takich jak klasa czystości pomieszczenia, udział powietrza zewnętrznego, jednostkowe obciążenie chłodnicze oraz warunki klimatu zewnętrznego. W rozdziale ujęto również końcowe rezultaty wielopoziomowej procedury optymalizacyjnej, prowadzącej do wyznaczenia rozwiązań minimalizujących roczne zapotrzebowanie na energię pierwotną. Końcowa część rozdziału obejmuje zebranie najważniejszych ustaleń wynikających z przeprowadzonych obliczeń oraz wskazanie zakresu zastosowania opracowanych wykresów i zestawień, przeznaczonych do wykorzystania w procesie doboru rozwiązań systemowych dla central klimatyzacyjnych pomieszczeń czystych. Rozdział zamyka zasadniczą część rozprawy, porządkując i konsolidując wyniki uzyskane w toku przeprowadzonych analiz.

Rozdział dwunasty zawiera bibliografię obejmującą 52 pozycje literaturowe, wykorzystane w realizacji pracy doktorskiej. Bibliografia odzwierciedla zakres tematyczny pracy i obejmuje źródła wykorzystywane do budowy podstaw teoretycznych, opracowania metodyki obliczeniowej oraz realizacji analiz symulacyjnych.

Pracę uzupełniają trzy załączniki przedstawiające szczegółowe informacje i dane liczbowe dot. opracowania algorytmu.

Podsumowując, rozprawa stanowi spójne i logiczne przedstawienie zrealizowanych, porządkując przedstawione oraz integrując wyniki przeprowadzonych analiz i badań. Zaprezentowana struktura umożliwia jednoznaczne prześledzenie toku rozumowania – od sformułowania problemu badawczego i przeglądu literatury, poprzez realizację kolejnych etapów prac własnych, aż po syntetyczne ujęcie uzyskanych rezultatów i wniosków końcowych. Przyjęty układ pozwala na klarowne przedstawienie zakresu zrealizowanych prac oraz wkładu własnego Kandydatki w rozwój analizowanej tematyki, w odniesieniu do wykorzystania wcześniej opracowanych algorytmów.

Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Zastosowane w rozprawie piśmiennictwo należy ocenić pozytywnie. Kandydatka wykorzystała aktualny i dobrze dobrany pod względem merytorycznym zestaw źródeł, obejmujący publikacje o zróżnicowanym charakterze, odpowiadające zarówno części teoretycznej, jak i obliczeniowo-aplikacyjnej rozprawy. W bibliografii ujęto: 24 artykuły naukowe z czasopism międzynarodowych z zakresu energetyki, klimatyzacji oraz pomieszczeń czystych, stanowiące zasadniczą część cytowanej literatury, 6 monografii i podręczników branżowych, w tym

opracowania o charakterze referencyjnym, 6 norm i wytycznych technicznych, w szczególności dotyczące klasyfikacji pomieszczeń czystych itp., 2 akty prawne i rozporządzenia krajowe, związane z metodologią wyznaczania charakterystyki energetycznej budynków, 7 źródeł internetowych i bazy danych, wykorzystywanych do pozyskania danych klimatycznych oraz informacji technicznych, 4 opisy oprogramowani specjalistycznych i bibliotek obliczeniowych, użytych w procesie modelowania i symulacji. Wśród cytowanych pozycji znajduje się jedna publikacja naukowa współautorska autorki rozprawy, opublikowana w czasopiśmie międzynarodowym *Energies*, dotycząca energooszczędnych struktur systemów klimatyzacji pomieszczeń czystych. Przedstawione podejście zapewnia właściwe osadzenie rozprawy w kontekście naukowym oraz potwierdza umiejętność selekcji literatury istotnej z punktu widzenia podjętej problematyki badawczej.

Podsumowując, należy stwierdzić, że zarówno dobór, jak i wykorzystanie literatury w rozprawie zostały zrealizowane na odpowiednim poziomie, a zastosowane piśmiennictwo jest adekwatne do zakresu oraz celów pracy.

Ocena celu pracy

Główny cel pracy został sformułowany jako: *Celem badawczym niniejszej rozprawy jest opracowanie procedury optymalizacyjnej i wyznaczenie struktur systemów HVAC pomieszczeń czystych realizujących energooszczędną obróbkę termodynamiczną powietrza. Cele szczegółowe, rozprawy obejmują:*

- *wyznaczenie energooszczędnych struktur układów odzysku ciepła w systemach HVAC pomieszczeń czystych,*
- *wyznaczenie energooszczędnych konfiguracji chłodziń powietrza w centralach klimatyzacyjnych systemów HVAC pomieszczeń czystych,*
- *wyznaczenie energooszczędnych algorytmów sterowania systemami HVAC pomieszczeń czystych o optymalnych strukturach, obejmujących optymalną opcję odzysku ciepła i optymalną konfigurację chłodziń powietrza.*

Cel pracy został sformułowany w sposób jasny, precyzyjny i mierzalny oraz ma charakter oryginalny, odnosząc się do obszaru badawczego dotychczas w ograniczonym zakresie rozpoznanego w literaturze. Jego realizacja umożliwia uzupełnienie luki naukowej w zakresie energooszczędnego kształtowania struktur systemów klimatyzacji pomieszczeń czystych oraz wnosi nowe elementy wiedzy do inżynierii środowiska. Cel pracy pozostaje w spójnej relacji z postawioną tezą rozprawy, zgodnie z którą struktury systemów klimatyzacji, w tym rozwiązania recyrkulacji powietrza, odzysku ciepła oraz konfiguracji układów chłodziń, są funkcją kombinacji kluczowych parametrów eksploatacyjnych i klimatycznych.

Ocena zastosowanych metod badawczych

W pracy zastosowano metody badawcze o charakterze analitycznym, symulacyjnym i obliczeniowym, ukierunkowane na rozwiązanie zagadnienia optymalizacji energetycznej systemów klimatyzacji pomieszczeń czystych. Podstawę metodyczną stanowi sformalizowany opis systemu klimatyzacji z wykorzystaniem zbiorów parametrów stałych oraz zmiennych decyzyjnych, umożliwiający jednoznaczną identyfikację wariantów strukturalnych systemu. Kluczową metodą badawczą były całoroczne modele symulacyjne pracy systemu klimatyzacji, oparte na bilansach masy i energii oraz analizie procesów obróbki termodynamicznej powietrza w ujęciu godzinowym. Modele te wykorzystano do wyznaczania zapotrzebowania na energię użytkową, końcową

i pierwotną w funkcji przyjętych wariantów strukturalnych, parametrów eksploatacyjnych oraz warunków klimatu zewnętrznego. W celu identyfikacji rozwiązań energooptymalnych zastosowano metodę bezpośredniego przeszukiwania przestrzeni rozwiązań, realizowaną w ramach wielopoziomowej procedury optymalizacyjnej. Kolejne etapy obejmowały: wyznaczenie struktur dopuszczalnych systemów klimatyzacji, optymalizację układów recyrkulacji powietrza, dobór układów odzysku ciepła oraz optymalizację konfiguracji układów chłodnic w centralach klimatyzacyjnych. Uzupełnieniem analiz symulacyjnych była metoda porównawcza, zastosowana w procesie weryfikacji uzyskanych wyników poprzez odniesienie ich do danych literaturowych oraz obliczeń referencyjnych. Całość zastosowanych metod badawczych pozwoliła na systematyczne i spójne rozwiązanie postawionego problemu badawczego.

Podsumowując, zastosowany w pracy zestaw metod badawczych tworzy spójny i konsekwentny układ, adekwatny do charakteru oraz złożoności analizowanego problemu badawczego. Wykorzystanie metod analitycznych i symulacyjnych, uzupełnionych procedurą wielopoziomowej optymalizacji, umożliwiło kompleksowe ujęcie zagadnienia energooptymalnego kształtowania systemów klimatyzacji pomieszczeń czystych.

Ocena części rozprawy zawierających omówienie wyników badań

Wyniki pracy obejmują szczegółową prezentację rezultatów analiz symulacyjnych przeprowadzonych w ramach wielopoziomowej procedury optymalizacji systemów klimatyzacji pomieszczeń czystych. Wyniki przedstawiono w sposób uporządkowany, zgodnie z przyjętą sekwencją etapów badawczych, począwszy od analizy struktur dopuszczalnych, poprzez optymalizację układów recyrkulacji powietrza, odzysku ciepła, aż do doboru konfiguracji układów chłodnic w centralach klimatyzacyjnych. Omówienie wyników uzupełniono licznymi zestawieniami tabelarycznymi oraz wykresami, ilustrującymi zależności pomiędzy zapotrzebowaniem na energię a kluczowymi parametrami projektowymi, takimi jak klasa czystości pomieszczenia, udział powietrza zewnętrznego, jednostkowe obciążenie chłodnicze oraz warunki klimatu zewnętrznego. Analizy prowadzone są w ujęciu całorocznym, co pozwala na uwzględnienie zmienności warunków eksploatacyjnych w czasie.

Sposób prezentacji i omówienia wyników badań należy ocenić jako spójny i metodycznie konsekwentny. Kandydatka w czytelny sposób powiązała uzyskane rezultaty z przyjętą procedurą badawczą, umożliwiając jednoznaczne prześledzenie wpływu analizowanych parametrów na efektywność energetyczną systemów klimatyzacji. Zastosowanie różnorodnych form prezentacji wyników pomaga w ich interpretacji oraz ułatwia identyfikację rozwiązań energooptymalnych.

Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Uzyskane w rozprawie wyniki badań mają bezpośrednie zastosowanie w praktyce projektowej i analitycznej związanej z kształtowaniem systemów klimatyzacji dla pomieszczeń czystych. Opracowana wielopoziomowa procedura optymalizacji umożliwia systematyczny dobór struktury systemu klimatyzacji, obejmujący rozwiązania w zakresie recyrkulacji powietrza, odzysku ciepła oraz konfiguracji układów chłodnic, w funkcji kluczowych parametrów projektowych i eksploatacyjnych. Wyniki analiz symulacyjnych, przedstawione w postaci zestawień liczbowych, wykresów oraz obszarów energooptymalnych, mogą stanowić narzędzie wspomagające proces podejmowania decyzji projektowych na etapie koncepcji i doboru rozwiązań technicznych.

Umożliwiają one szybkie porównanie alternatywnych wariantów systemowych pod kątem zapotrzebowania na energię pierwotną, bez konieczności każdorazowego wykonywania rozbudowanych obliczeń symulacyjnych. Opracowane zależności pomiędzy efektywnością energetyczną systemów klimatyzacji a klasą czystości pomieszczenia, udziałem powietrza zewnętrznego, jednostkowym obciążeniem chłodniczym oraz warunkami klimatu zewnętrznego mogą być wykorzystywane w praktyce inżynierskiej do racjonalizacji rozwiązań technicznych w obiektach przemysłowych, farmaceutycznych, elektronicznych oraz medycznych. Wyniki te mogą znaleźć zastosowanie zarówno w nowych inwestycjach, jak i w analizach modernizacyjnych istniejących instalacji.

Informacja o ewentualnych nieprawidłowościach

W rozprawie zasadnicze elementy metodologiczne zostały opracowane na odpowiednim poziomie, jednak najistotniejszym ograniczeniem rozprawy jest zakres przeprowadzonej weryfikacji przyjętego modelu symulacyjnego. Proces weryfikacji oparto na porównaniu wyników uzyskanych z autorskiego modelu z rezultatami przedstawionymi w jednym artykule naukowym, który pełnił funkcję źródła referencyjnego. Uzyskane różnice pomiędzy wynikami obliczeń, mieszczące się w przedziale od 0,7% do 13%, zostały przez Autorkę uznane za akceptowalne po wskazaniu potencjalnych przyczyn rozbieżności, takich jak odmienne założenia obliczeniowe, sposób modelowania procesów pomocniczych czy zakres uwzględnionych strat energetycznych. Należy jednak zauważyć, że ograniczenie weryfikacji do jednego źródła literaturowego zawęża możliwość pełniejszej oceny uniwersalności i odporności modelu na zmienność warunków wejściowych. W opinii recenzenta weryfikacja modeli symulacyjnych powinna w pierwszej kolejności bazować na wynikach pomiarów prowadzonych w modelowych lub rzeczywistych obiektach, które umożliwiają bezpośrednie odniesienie wyników obliczeń do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych systemów klimatyzacji. Szersza procedura weryfikacyjna, obejmująca dane pomiarowe, porównania z wynikami kilku niezależnych publikacji lub zastosowanie alternatywnych narzędzi symulacyjnych, pozwoliłaby na bardziej kompleksowe potwierdzenie poprawności oraz zakresu stosowalności zaproponowanego modelu. Nie ma w pracy również uzasadnienia dlaczego rozbieżność na poziomie 13% została zaakceptowana i przyjęta jako dopuszczalna. Wskazane ograniczenie nie podważa zasadności przeprowadzonych analiz w przyjętym zakresie, jednak stanowi istotny obszar potencjalnych dalszych prac badawczych, których realizacja mogłaby wzmocnić wiarygodność i zwiększyć potencjał aplikacyjny opracowanego rozwiązania.

Ponadto można wskazać nieliczne niedociągnięcia o charakterze redakcyjnym i formalnym, które nie wpływają na wartość naukową rozprawy, a których ewentualna korekta mogłaby podnieść czytelność tekstu. Dotyczą one przede wszystkim powtarzalności opisów procedur obliczeniowych w kolejnych rozdziałach analitycznych oraz miejscami rozbudowanych komentarzy towarzyszących prezentacji wyników symulacyjnych. Zauważalne są również drobne różnice w sposobie zapisu oznaczeń i skrótów, które mogą wynikać z konieczności dostosowania ich do specyfiki omawianych wariantów systemowych. Mają one jednak charakter porządkujący i nie powodują niejednoznaczności interpretacyjnych. Jednocześnie pragnę podkreślić, że powyższe uwagi nie rzutują na moją ogólną pozytywną ocenę prac zrealizowanych przez Kandydatkę.

Ocena, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Oryginalność rozprawy przejawia się przede wszystkim w opracowaniu autorskiej, wielopoziomowej procedury optymalizacji, umożliwiającej systematyczny dobór struktur systemów klimatyzacji z uwzględnieniem recyrkulacji powietrza, odzysku ciepła oraz konfiguracji układów chłodnic w centralach klimatyzacyjnych. Na podkreślenie zasługuje również sposób powiązania struktury systemu klimatyzacji z kombinacją kluczowych parametrów projektowych i eksploatacyjnych, takich jak klasa czystości pomieszczenia, udział powietrza zewnętrznego, jednostkowe obciążenie chłodnicze oraz warunki klimatu zewnętrznego. Zaproponowane rozwiązanie umożliwia przejście od analizy pojedynczych przypadków do uogólnionego podejścia systemowego, co stanowi istotny wkład do rozwoju metod optymalizacji systemów klimatyzacji pomieszczeń czystych. Można zatem stwierdzić, że rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, zarówno w aspekcie metodycznym, jak i aplikacyjnym, a uzyskane wyniki wnoszą nowe elementy wiedzy do obszaru badań nad energooszczędnymi systemami klimatyzacji dla pomieszczeń czystych.

Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Rozprawa doktorska prezentuje poprawny i spójny poziom wiedzy teoretycznej z zakresu inżynierii środowiska, w szczególności w obszarze funkcjonowania i energetycznej analizy systemów klimatyzacji. Kandydatka wykazuje dobrą orientację w aktualnym stanie badań, obowiązujących normach oraz rozwiązaniach technicznych stosowanych w praktyce projektowej. Część teoretyczna pracy stanowi odpowiednie zaplecze dla prowadzonych analiz obliczeniowych i symulacyjnych.

Jednocześnie należy zauważyć, że zakres pracy ogranicza się wyłącznie do badań o charakterze analitycznym i symulacyjnym. W rozprawie nie uwzględniono badań eksperymentalnych ani pomiarów prowadzonych w obiektach rzeczywistych lub modelowych, które mogłyby stanowić bezpośrednie potwierdzenie poprawności przyjętych założeń oraz uzyskanych wyników. Zastosowana metodyka badawcza bazuje również na podejściu rozwijanym we wcześniejszych pracach promotora, co zapewnia ciągłość i spójność merytoryczną prowadzonych badań, jednak Kandydatka wykazała zdolność samodzielnego wykorzystania i rozszerzenia tego podejścia, adaptując je do własnego problemu badawczego oraz rozwijając modele symulacyjne i procedury obliczeniowe w sposób niezależny i konsekwentny.

Pomimo wskazanego ograniczenia w postaci braku pomiarów, rozprawa potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, poprawnego planowania procesu badawczego oraz krytycznej analizy wyników obliczeń. Podsumowując należy uznać, że praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w zakresie prezentacji wiedzy teoretycznej i kompetencji badawczych Kandydatki, a wskazane niedostatki nie podważają ogólnej wartości naukowej rozprawy.

Wnioski końcowe

Rozprawa doktorska mgr inż. Moniki Jakubiak pt. „Wybór energooszczędnego odzysku ciepła i konfiguracji chłodnic w centralach systemów klimatyzacyjnych pomieszczeń czystych” spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. Przedstawiona rozprawa doktorska mieści się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*. Przedłożona praca stanowi kompleksowe, rzetelnie udokumentowane i naukowo wartościowe opracowanie

dotyczące rozwoju i oceny efektywności energetycznej struktur systemów klimatyzacji pomieszczeń czystych, ze szczególnym uwzględnieniem doboru odzysku ciepła oraz konfiguracji układów chłodnic w centralach klimatyzacyjnych. Kandydata w sposób twórczy i samodzielny przeanalizowała problem istotny z punktu widzenia współczesnej inżynierii środowiska, przedstawiając wyniki badań modelowych, które wnoszą oryginalny wkład do rozwoju tej dziedziny. Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Moniki Jakubiak do dalszych etapów przewodu doktorskiego.