

Dr hab. inż. Piotr Nikończuk, prof. ZUT
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Techniki Morskiej i Transportu
Katedra Technologii Ciepłych i Inżynierii Bezpieczeństwa
Al. Piastów 17, 70-310 Szczecin

Recenzja

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Anny Choma

pt.: *Hybrydowa sprężarkowa pompa ciepła napelniona czynnikiem chłodniczym R290*

pod kierunkiem dr hab. inż. Pawła Obstawskiego, prof. SGGW.

Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie pisemnego zlecenia Pana prof. dr hab. inż. Marka Gaworskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, zgodnie z uchwałą nr 13/IM-2025/25 podjętą przez powyższą Radę Dyscypliny w dniu 10 lutego 2026 roku.

Aktualność, geneza i ocena podjętego tematu

Systematyczny wzrost zapotrzebowania energetycznego, europejskie działania związane z neutralnością klimatyczną a także ogólnoswiatowa sytuacja geopolityczna prowadzą do prac nad zwiększeniem wykorzystania energii odnawialnej oraz poprawą efektywności energetycznej systemów energetycznych. Dotyczy to również pozyskiwania, transformacji i buforowania ciepła odpadowego na potrzeby ogrzewania budynków oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej.

Działania te wspierane są poprzez europejskie oraz krajowe regulacje prawne, które określają coraz bardziej rygorystyczne wymogi w zakresie efektywności energetycznej budynków oraz urządzeń grzewczych wykorzystujących energię odnawialną. W odniesieniu do sprężarkowych pomp ciepła regulacje prawne dążą do zminimalizowania oddziaływania na środowisko w odniesieniu do stosowanych czynników chłodniczych poprzez dążenie do stosowania naturalnych czynników o jak najniższych współczynnikach GWP (Global Warming Potential) oraz zerowym ODP (Ozone Depletion Potential). Określona w aktach prawnych jest również maksymalna

masa czynnika chłodniczego w układzie wynikająca z palności naturalnych czynników chłodniczych.

Opisane powyżej działania formalnoprawne wskazują na konieczność rozwoju technologii odzysku i ponownego wykorzystania ciepła odpadowego w instalacjach budynków mieszkalnych. Doktorantka wskazała, iż celem pracy jest opracowanie konstrukcji hybrydowej, sprężarkowej pompy ciepła bazującej na współpracy ze centralą wentylacyjną z odzyskiem ciepła, co doskonale odnosi się do tej potrzeby. Uważam, iż podjęta tematyka pracy jest aktualna i wychodzi naprzeciw współczesnym wyzwaniom. W rozprawie Autorka podjęła odważną próbę sformułowania, a następnie rozwiązania aktualnego i bardzo złożonego problemu badawczego.

Struktura formalna

Recenzowaną pracę zredagowano i wydrukowano na 310 stronach z afiliacją Instytutu Inżynierii Mechanicznej Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.

Pierwsze strony pracy zawierają streszczenie w języku polskim i angielskim oraz wykaz stosowanych skrótów i nazw własnych. Część merytoryczna rozprawy składa się ze Wstępu, dwunastu rozdziałów obejmujących 162 strony oraz rozdziału trzynastego zatytułowanego Podsumowanie i wnioski. Następnie zamieszczono Załączniki zawierające obszerny materiał wynikowy z prowadzonych przez Autorkę prac badawczych. Pracę zakończono Bibliografią.

Układ pracy jest dobrany stosownie do jej zakresu i sposobu rozwiązania problemu badawczego, z logicznym następstwem rozdziałów.

Ocena merytoryczna rozprawy

We Wstępie oznaczonym jako rozdział pierwszy Autorka wskazuje na trendy związane z dekarbonizacją oraz obecnie obowiązujące krajowe i europejskie akty prawne, które definiują wymogi stawiane współczesnym budynkom mieszkalnym w zakresie ich efektywności energetycznej oraz minimalizacji udziału nośników nieodnawialnej energii na potrzeby pokrycia obciążenia cieplnego budynku z tytułu c.o. i c.w.u. Wskazuje również na regulacje związane ze sprężarkowymi pompami ciepła, które prowadzą do zastępowania syntetycznych czynników chłodniczych poprzez naturalne czynniki o niskich wartościach współczynnika GWP oraz zerowym ODP. Przytacza także regulacje związane z maksymalną masą naturalnego czynnika chłodniczego w układzie, ze względu na jego właściwości palne. Wskazuje, iż w odpowiedzi na powyższe wymogi *„Celem rozprawy jest zaprojektowanie, wykonanie i przetestowanie kompaktowej, hybrydowej pompy ciepła z czynnikiem chłodniczym R290, integrującej funkcje wentylacyjne i grzewcze, przy jednoczesnej minimalizacji*

masy czynnika chłodniczego oraz zachowaniu wysokiej wydajności chłodniczej układu.”.

W rozdziale drugim Doktorantka przeprowadziła dogłębną analizę krajowych i europejskich aktów prawnych (Rozporządzeń i Dyrektyw) odniesieniu do obciążenia cieplnego budynków. Wskazuje na obowiązujące w Polsce od 2021 roku przepisy techniczno-budowlane, które między innymi definiują warunki techniczne (WT2021), określają wartości wskaźnika energii pierwotnej (EP) dla budynków o różnych przeznaczeniach oraz formułują wytyczne dla świadectw charakterystyki energetycznej budynków. Następnie przeprowadziła analizę literaturową w zakresie izolacyjności termicznej budynków oraz technicznych rozwiązań systemów wentylacji i źródeł ciepła w aspekcie uzyskania najlepszej efektywności energetycznej wraz z ograniczeniem emisji CO₂. Na podstawie analizy obowiązujących przepisów oraz literatury Autorka wskazała na konieczność opracowania hybrydowego urządzenia grzewczego, bazującego na współpracy sprężarkowej pompy ciepła z rekuperatorem, dedykowanego do pokrycia obciążenia cieplnego budynku z tytułu c.o. i przygotowania c.w.u. w indywidualnym lokalu mieszkalnym w budynku wielorodzinnym.

Rozdział trzeci zawiera rozwiązania sprężarkowych pomp ciepła. Doktorantka przedstawiła i omówiła obieg Lindego wraz z przebiegiem przemian fazowych. Omówiła podstawowe elementy konstrukcyjne oraz możliwe ich rozwiązania techniczne (parownik i skraplacz, sprężarka, zawór rozprężny). Przedstawiła kopertę pracy oraz wskazała na ich różnorodność w zależności od konstrukcji pompy ciepła i zastosowanego czynnika chłodniczego. W dalszej części przedstawiła podział pomp ciepła ze względu na dolne i górne źródło ciepła. Przeprowadziła analizę rozwoju rynku pomp ciepła oraz analizę obowiązujących aktów prawnych i normatywnych w zakresie szacowania wskaźników efektywności energetycznej pomp ciepła, ich klasyfikacji oraz ich oznaczania.

Czwarty rozdział koncentruje się na stosowanych czynnikach chłodniczych. Autorka przedstawiła proces zmian klimatycznych oraz wpływ czynników chłodniczych na jego przebieg. Przeprowadziła analizę aktów prawnych w myśl których wskazała ujednolicony harmonogram narzuconego procesu zastępowania fluorowanych gazów cieplarnianych naturalnymi czynnikami chłodniczymi. Dla czynników wycofywanych przedstawiła i scharakteryzowała alternatywne zamienniki. W odniesieniu do właściwości palnych czynników alternatywnych przeprowadziła kolejną analizę aktów prawnych i normatywnych w zakresie limitów stopnia napełnienia instalacji czynnikami chłodniczymi. W dalszej części rozdziału Autorka przeprowadziła wielowątkową analizę literaturową. Na podstawie przeglądu literatury wskazała, iż zastosowanie propanu w pompie ciepła oraz wykorzystanie mikrokanałowego parownika pozwala na osiągnięcie znacznie wyższej wartości COP układu niż w przypadku zastosowania

czynnika R134a. Zauważyła, że w przypadku pomp ciepła typu split, można bezpiecznie stosować propan jako czynnik chłodniczy, ponieważ wyciek całej ilości gazu nie stwarza zagrożenia wybuchowego. Wskazała, iż stosowanie mikrokanałowych wymienników ciepła w instalacjach z propanem prowadzi do podniesienia sprawności wymiany ciepła zarówno dla parownika jak i skraplacza. Następnie na potrzeby dalszych badań przeprowadziła analizę literaturową zastosowań testowych komór chłodniczych do badań wymienników ciepła, wskazując na możliwość symulacji w komorach zróżnicowanych warunków klimatycznych.

W rozdziale piątym Autorka słusznie zauważyła, iż wymagania stawiane budynkom w zakresie efektywności energetycznej wynikające z aktów prawnych Unii Europejskiej oraz krajowych warunków technicznych wykluczają możliwość stosowania wentylacji grawitacyjnej w obiektach o wysokiej szczelności budowlanej. Prowadzi to do stosowania wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła.

Przeanalizowała normatywne wymogi w zakresie funkcjonalności systemów wentylacji oraz intensywności wymiany powietrza w pomieszczeniach zależnie od ich przeznaczenia. W ślad za cytowaną literaturą przedstawiła porównanie wyników badań w sypialniach w dwóch domach: z wentylacją grawitacyjną i z wentylacją mechaniczną wraz odzyskiem ciepła. Zwróciła uwagę na wzrost stężenia CO₂ oraz wilgotności w sypialni z wentylacją grawitacyjną.

Podsumowując rozdział 5 Doktorantka prawidłowo oceniła, iż zgodnie z wymaganiami WT2021 oraz obowiązującymi normami, zapewnienie odpowiednich warunków higienicznych i komfortu cieplnego użytkowników nie jest możliwe bez wymuszonej i kontrolowanej wymiany powietrza, a integracja ich z zawansowanymi rozwiązaniami odzysku ciepła umożliwia jednocześnie zapewnienie wymaganej jakości powietrza wewnętrznego, pokrycie zapotrzebowania na ciepło oraz ograniczenie zapotrzebowania na energię końcową.

Powyższe rozdziały stanowiły jasną podstawą do przedstawienia w rozdziale szóstym celu i zakresu recenzowanej rozprawy doktorskiej. Autorka wskazała, iż współcześnie stawiane wymogi prawne i normatywne sektorowi budownictwa wielorodzinnego wymagają termoizolacji budynków, której skutkiem jest konieczność stosowania wentylacji mechanicznej. Natomiast obniżenie energochłonności źródeł ciepła może stanowić stosowanie pomp ciepła z zapewnioną wysoką temperaturą dolnego źródła ciepła.

Autorka wskazała, iż celem pracy jest *„opracowanie konstrukcji hybrydowej, sprężarkowej pompy ciepła bazującej na współpracy z centralą wentylacyjną z odzyskiem ciepła.”* Następnie zauważyła, że *„rozwiązaniem spełniającym wymienione założenia była by sprężarkowa pompa ciepła współpracująca z centralą wentylacyjną z odzyskiem ciepła – rekuperatorem. Koncepcja takiego hybrydowego urządzenia*

grzewczego bazuje na założeniu, że dolnym źródłem ciepła dla parownika pompy ciepła jest powietrze wywiewane, z którego odzyskano już ciepło w wymienniku. W przypadku takiej koncepcji korzystnym wydaje się zastąpienie wodnej instalacji centralnego ogrzewania instalacją powietrzną."

W rezultacie przeprowadzonych analiz Doktorantka sformułowała 5 następujących hipotez badawczych:

- 1. Jest możliwe opracowanie konstrukcji hybrydowego urządzenia grzewczego bazującego na współpracy sprężarkowej pompy ciepła z centralą wentylacyjną – rekuperatorem, które zapewni pokrycie obciążenia cieplnego z tytułu centralnego ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej w indywidualnym lokalu budynku wielorodzinnego.*
- 2. Procesy termodynamiczne w obiegach pomp ciepła można opisać z większą dokładnością przy użyciu modeli uwzględniających nieliniowe zależności strat energii i wzrost entropii, co pozwoli lepiej przewidywać efektywność pracy urządzeń w zmiennych warunkach.*
- 3. Nowe, naturalne i niskoemisyjne czynniki robocze charakteryzują się parametrami termodynamicznymi umożliwiającymi osiągnięcie porównywalnej lub wyższej sprawności pomp ciepła niż w przypadku tradycyjnych czynników HFC.*
- 4. Modele matematyczne wymiany ciepła i masy w elementach pompy ciepła, w szczególności w mikrokanalowych wymiennikach ciepła, pozwalają na dokładniejsze odwzorowanie procesów rzeczywistych niż klasyczne modele empiryczne.*
- 5. Spadek efektywności pomp ciepła w warunkach niskiej temperatury zewnętrznej wynika głównie z ograniczeń wymiany ciepła w parowniku i zjawisk oblodzenia; identyfikacja tych procesów umożliwi wskazanie kierunków ich ograniczenia.*

Na potrzeby realizacji celu pracy oraz weryfikacji powyższych hipotez badawczych zaplanowała bardzo obszerny zakres pracy:

- 1. Dokonać analizy teoretycznej procesów termodynamicznych w obiegach pomp ciepła, z uwzględnieniem strat energii i zmian entropii w różnych warunkach pracy dla różnych czynników chłodniczych.*
- 2. Zbadać właściwości fizykochemiczne i termodynamiczne nowych czynników roboczych, w szczególności naturalnych i niskoemisyjnych, w kontekście ich potencjału zastosowania w pompach ciepła.*
- 3. Opracować i zweryfikować modele matematyczne opisujące wymianę ciepła i masy w elementach konstrukcyjnych pompy ciepła (parowniku, skraplaczu, sprężarce).*
- 4. Zidentyfikować zjawiska ograniczające sprawność pomp ciepła w niskich temperaturach zewnętrznych i przeanalizować mechanizmy ich minimalizacji.*

5. Wykonać analizę techniczną oraz audyt budynku referencyjnego.
6. Opracować model matematyczny układu chłodniczego hybrydowej pompy ciepła oraz przeprowadzić badania symulacyjne mające na celu wyznaczenia niezbędnej powierzchni wymiany ciepła parownika i skraplacza oraz wydajność urządzenia dla założonych parametrów pracy.
7. Określić założenia konstrukcyjne dla wymienników ciepła hybrydowej pompy ciepła – parownika i skraplacza.
8. Zaprojektować wymienniki ciepła oraz dokonać analiz ciepłno - przepływowych.
9. Zbudować prototyp.
10. Przeprowadzić badania eksploatacyjne hybrydowej pompy ciepła dla założonych punktów pracy.
11. Porównać wyniki badań symulacyjnych z wynikami rzeczywistymi.

Dla powyższego zakresu prac Doktorantka w rozdziale siódmym przedstawiła metodykę badań, która jest logiczna i merytorycznie zgodna z kolejnymi rozdziałami przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

W rozdziale ósmym wskazała budynek, w którym znajduje się referencyjny lokal mieszkalny, dla którego opracowała system mechanicznej wentylacji wraz z odzyskiem ciepła ze sprężarkową pompą ciepła. Scharakteryzowała oraz wykonała audyt energetyczny dla lokalu referencyjnego oraz całego budynku. Wskazała, iż wybrany do badań lokal to „mieszkanie zlokalizowane w środkowej części kondygnacji, na parterze (M2). Mieszkanie referencyjne składa się z hallu (9,13 m²), otwartego na pokój dzienny (18,15 m²), kuchni (10,10 m²), łazienki (4,91 m²) i sypialni (14,14 m²). Zgodnie z projektem budowlanym, jego całkowita powierzchnia mieszkalna to 56,44 m². Wysokość wszystkich wynosi 2,58 m.” Przeprowadziła obliczenia zapotrzebowania na moc cieplną za pomocą oprogramowania Audytor OZC v. 7.0 Pro. Następnie z użyciem tego samego oprogramowania przeprowadziła analizę możliwych kombinacji rozwiązań systemów grzewczych i wentylacyjnych oraz porównała uzyskane dla nich wartości wskaźników zapotrzebowania na energię użytkową (EU), końcową (EK) oraz pierwotną (EP) w odniesieniu do całego budynku wielorodzinnego jak i lokalu referencyjnego. W podsumowaniu, stwierdziła, iż najefektywniejszym wariantem systemu grzewczo-wentylacyjnego jest pompa ciepła + wentylacja mechaniczna z odzyskiem ciepła + ogrzewanie powietrzne, oraz że dostosowanie izolacyjności przegród budowlanych budynku do wymagań WT2021 pozwala na istotne obniżenie wszystkich analizowanych wskaźników energetycznych.

Na tej podstawie w rozdziale dziewiątym opracowała projekt hybrydowej sprężarkowej pompy ciepła współpracującej z systemem wentylacji mechanicznej. Wskazała, iż głównym problemem badawczym, jest obniżenie masy czynnika chłodniczego w instalacji z jednoczesnym utrzymaniem zakładanej wydajności cieplnej

urządzenia. Jako główne założenie konstrukcyjne wskazała wykorzystanie usuwanego powietrza za rekuperatorem w wentylacji mechanicznej jako dolnego źródła ciepła dla pompy ciepła. Dodatkowo założyła, że urządzenie będzie się mieścić w szafce o wymiarach 0,8 x 0,6 x 2 m.

W dalszej części przeprowadziła analizę rekuperatora pod względem sprawności temperaturowej i sprawności odzysku i opracowała model symulacyjny rekuperatora w środowisku MATLAB w pakiecie Simulink. Model uwzględnia zmiany temperatury i wilgotności strumieni powietrza. Z użyciem modelu przeprowadziła analizę zmienności temperatury powietrza nawiewanego w funkcji wydajności wentylatorów po stronie pierwotnej i wtórnej rekuperatora przy założeniu maksymalnej wydajności wentylatora 150 m³/h. Na podstawie analizy wyników stwierdziła, iż dla wentylacji mechanicznej przy zerowym bilansie strumieni powietrza nawiewanego i wywiewanego dla temperatury zewnętrznej -20 °C, uzyskano temperaturę powietrza nawiewanego do pomieszczenie na poziomie 14 °C. Co wskazuje, iż do osiągnięcia projektowej temperatury 20 °C, konieczne jest dogrzewanie powietrza nawiewanego przez sprężarkową pompę ciepła. Następnie przedstawiła i opisała schemat blokowy modelu hybrydowej sprężarkowej pompy ciepła składający się z obiegu czynnika chłodniczego, strumieni powietrza nawiewanego i wywiewanego oraz rekuperatora krzyżowego. Przedstawiła metodę obliczania mocy mechanicznej sprężarki, wskazała iż sprężarkę zamodelowano jako element inercyjny. Model symulacyjny hybrydowej sprężarkowej pompy ciepła zaimplementowała w pakiecie Simulink środowiska MATLAB i przeprowadziła szereg symulacji dla zmienności wolumenu strumieni powietrza w zakresie 75 – 150 m³/h, temperatury kondensacji w przedziale 30 – 60 °C oraz temperatury powietrza z zewnątrz w przedziale -20 do +15 °C. Wyniki symulacji zawierały zmiany temperatury strumieni powietrza nawiewanego i wywiewanego po przejściu przez kolejne wymienniki ciepła, moc rekuperatora, moc parownika, moc skraplacza, moc sprężarki, temperaturę czynnika chłodniczego R290 na wejściu i wyjściu skraplacza. Na podstawie analizy wyników symulacji wykazała, iż współczynnik COP zmieniał się w przedziale 2,8 do 7,2 oraz moc sprężarki wynosiła od 90 do 150 W. Uznała, że urządzenie powinno być oparte o sprężarkę inwerterową z szerokim zakresem regulacji prędkości obrotowej wału.

Doktorantka słusznie zauważyła, że konstrukcja hybrydowej sprężarkowej pompy ciepła umożliwiła uzyskanie mocy parownika i skraplacza wyższej niż wymagana do ogrzewania powietrza nawiewanego, a nadwyżkę można wykorzystać do przygotowania c.w.u.. Na tej podstawie zmodernizowała konstrukcję urządzenia poprzez zastosowanie skraplacza z podziałem mocy na ogrzewanie c.w.u. oraz ogrzewanie powietrza nawiewanego. Model zmodyfikowanej konstrukcji zaimplementowała w pakiecie Simulink oraz ponownie przeprowadziła szereg

symulacji dla zmienności parametrów jak w poprzednim modelu symulacyjnym. Wyniki zostały rozszerzone o moc wysokotemperaturowej i niskotemperaturowej sekcji skraplacza. Na podstawie wyników symulacji określiła wartości współczynników transferu ciepła wymienników, co stanowiło główne wytyczne projektowe do opracowania konstrukcji wymienników dla zredukowanej masy czynnika chłodniczego w układzie.

W rozdziale 10 Doktorantka przeprowadziła prace projektowe urządzenia w zakresie wymienników ciepła oraz doboru sprężarki. Z użyciem oprogramowania SOLIDWORKS zaprojektowała lamelowy wymiennik ciepła oraz przeprowadziła analizę obliczeniową dla różnych materiałów lameli, zmiennej liczby lameli, zmiennej odległości między lamelami oraz napełnienia wymiennika czynnikiem R410a oraz R290. Przeprowadziła również analizę parametrów pracy mikrokanalowego wymiennika ciepła napełnionego czynnikiem R290 z uwzględnieniem zmian mocy wymiennika w odniesieniu do geometrii przekroju poprzecznego mikrokanalów oraz różnych strumieni masowych czynnika chłodniczego i przepływu objętościowego powietrza. Po przeprowadzeniu wielu obliczeń i analiz Autorka stwierdziła, iż *„pomimo korzystnych wyników badań symulacyjnych, konstrukcja mikrokanalowa okazała się niemożliwa do wdrożenia w warunkach prototypu. Z tego powodu podjęto decyzję o opracowaniu nowej koncepcji wymiennika, dostosowanej do realiów zabudowy w instalacji wentylacyjnej oraz dostępnych metod produkcji.”* Doktorantka zdecydowała się na opracowanie konstrukcji grzebieniowego wymiennika ciepła pracującego w roli parownika i skraplacza. Podobnie jak poprzednie wymienniki został on zaprojektowany i zweryfikowany symulacyjnie w programie SOLIDWORKS z użyciem biblioteki Flow Simulation. Zostały określone parametry konstrukcyjne oraz eksploatacyjne dla pracy parownika i skraplacza. Przeanalizowała zmienność mocy chłodniczej w zależności od zmian parametrów pracy dla parownika i skraplacza. Na podstawie wyników obliczeń oszacowała moc wymienników adekwatną do wymogów prototypu.

Rozdział 11 przedstawia budowę fizycznego prototypu hybrydowej sprężarkowej pompy ciepła i jego badania z zastosowaniem komory klimatycznej. Przeprowadzono pomiary dla symulowanej temperatury powietrza zewnętrznego -10°C , 0°C oraz 10°C . Otrzymane wyniki pomiarów temperatury strumieni powietrza oraz uzyskanych mocy skraplacza i współczynnika COP porównano z wartościami uzyskanymi w modelach numerycznych. Omówiono powstałe różnice oraz potwierdzono poprawność działania układu.

W rozdziale 12 została przedstawiona wizualizacja zaprojektowanego urządzenia wraz z aranżacją w lokalu referencyjnym.

W rozdziale 13 zawarto podsumowanie i wnioski. We wnioskach szczegółowych Doktorantka wykazała prawdziwość postawionych hipotez badawczych.

Rozdział 14 rozprawy stanowi bardzo obszerny zbiór 24 załączników opracowanych samodzielnie przez Doktorantkę. Zawiera on dokumentację budynku i lokalu referencyjnego, świadectwa charakterystyki energetycznej, analizy wariantowe, wyniki obliczeń wydajności rekuperatora dla różnych wolumenów strumienia powietrza, wyniki symulacji projektowanego rozwiązania, rysunki techniczne wymienników ciepła oraz hybrydowej pompy ciepła.

Zamieszczony na końcu pracy wykaz przywołanych źródeł literaturowych zawiera 220 pozycji uporządkowanych według kolejności cytowania w tekście, z czego 160 pozycji stanowią krajowe i zagraniczne publikacje naukowe. Pozostałe 60 odwołań zawiera 2 patenty, 28 źródeł związanych z krajowymi i międzynarodowymi aktami normatywnymi, dyrektywami, rozporządzeniami oraz 30 pozycji literaturowych obejmujących raporty z badań i analiz, komercyjne poradniki i dane katalogowe, oraz źródła internetowe. W grupie cytowanych publikacji naukowych 48 pozycji została opublikowana po roku 2020 co stanowi 30 procent przywoływanych publikacji, w tej grupie zawiera się 20 pozycji nie starszych niż 3 lata. Oznacza to, że Autorka rozprawy doktorskiej w trakcie prowadzonych badań eksperymentalnych równolegle śledziła nowe pozycje literaturowe oraz aktualizowała swoją wiedzę w tematyce prowadzonych badań. Wskazuje to również na fakt, iż analizę istniejącego stanu wiedzy oparto na aktualnej literaturze.

Kolejność prowadzonych prac oraz ich merytoryczny zakres jest adekwatny do celu i zakresu pracy. Jednak w tekście rozprawy pojawiły się następujące nieścisłości:

- Na stronie 16 w opisie współczynnika EU zostało użyte nie w pełni zrozumiałe sformułowanie „*Jest to wartość teoretyczna, która obrazuje rzeczywiste potrzeby energetyczne wynikające z charakterystyki fizycznej obiektu...*”
- Na stronie 87 na rysunku 9.3 dla czynnika R290 za skraplaczem pompy ciepła wskazano temperaturę $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ jednak wartość ta nie wynika bezpośrednio z opisu rysunku w treści pracy.
- Na stronie 89 przedstawiono równanie 9.16 dynamiki sprężarki jako transmitancję operatorową liniowego obiektu inercyjnego, gdzie $u(s)$ opisano jako „*sygnał sterujący natężeniem przepływu*” natomiast $y(s)$ opisano jako „*opóźniony sygnał sterujący*”. Opis $y(s)$ nie jest w pełni zrozumiały, w mojej ocenie, adekwatnie do opisu $u(s)$ powinien odnosić się do natężenia przepływu masy. Dodatkowo nie wskazano wartości, jaką przyjęto dla stałej czasowej τ .
- Na stronie 99 zamieszczono rysunek 9.11 przedstawiający schemat blokowy hybrydowej pompy ciepła. Opis konstrukcji znajduje się na stronach 97-98. W opisie znajduje się zdanie: „*Na skutek wymiany ciepła między czynnikiem a nawiewanym powietrzem, temperatura czynnika chłodniczego zostaje obniżona do temperatury $16,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, a temperatura powietrza nawiewanego osiąga wartość*

18,5 °C (Rys. 9.12). Takie wartości również są oznaczone na rysunku 9.12. Opis nie wyjaśnia precyzyjnie, w jaki sposób czynnik chłodniczy w skraplaczu schładzany jest do temperatury niższej od temperatury powietrza nawiewanego do skraplacza.

- Na stronie 106 znajduje się tekst odwołujący się do rysunku 9.19. W opisie znajduje się sformułowanie „Maksymalne zapotrzebowanie na moc (400 W) sprężarka posiada przy najniższej temperaturze dolnego źródła...”. Z rysunku 9.19 wynika jednak, iż moc sprężarki przekracza 400 W.
- W rozdziale 11.2 na stronach 155 do 163 zamieszczono obszerny opis konstrukcji prototypu hybrydowej pompy ciepła, wraz z opisem układu automatyki, zabrakło jednak schematu blokowego układu regulacji oraz algorytmu sterowania.

Powyższe uwagi nie mają jednak istotnego wpływu na ostateczną, bardzo wysoką ocenę merytoryczną pracy. Rozprawa obejmuje niezmiernie szeroki zakres prac badawczych poprzez modelowanie i symulację, projektowanie i prototypowanie. Dobór odpowiednich narzędzi informatycznych oraz metod badawczych i prototypowania wskazują na doskonałą wiedzę i umiejętności Doktorantki w zakresie formułowania i rozwiązywania problemów badawczych.

Uwagi ogólne

Treść pracy została zredagowana starannie, jednak znajdują się w niej pewne niedociągnięcia. Głównym mankamentem w rozdziale 14 (Załączniki) jest brak spisu 24 załączników z podaniem ich numerów stron.

Na początku rozprawy doktorskiej zamieszczono wykaz symboli i akronimów, jednak zabrakło kilku używanych w treści rozprawy np.:

- OZE - odnawialnych źródeł energii,
- HSZ - hybrydowe systemy zasilania,
- EU - energia użytkowa,
- EP - energia pierwotna,
- EK - energia końcowa,
- EUH – energia użytkowa na ogrzewanie,
- LCC – kosztów cyklu życia produktu,
- T_{in} - temperatura wlotowa gorącego strumienia [° C],
- T_{ci} - temperatura wlotowa zimnego strumienia [° C].

Wśród zamieszczonych w spisie symboli znajdują się pewne nieścisłości, na przykład:

- Dla strumienia ciepła wskazano trzy symbole: (1) Q – wymiana ciepła [W] (str. 9); (2) \dot{Q}_{env} – strumień ciepła do otoczenia [W] (str. 9); (3) \dot{Q} – rzeczywista wymiana ciepła [W] (str.10). Dla symbolu (1) brakuje oznaczenia pochodnej z

energii cieplnej, a w przypadku dodania znaku pochodnej stanie się on tożsamy z symbolem (3).

- Dla parametrów grubości d , średnicy g , długości h oraz promienia r wskazano jednostki [mm], powierzchnię przedstawiono w [m²] natomiast objętość wyrażono w [dm³].
- Dla oporu cieplnego R wskazano jednostkę miary [(m²*K)/W], powinno być [(m²*K)/W].
- Dla współczynnika przewodności cieplnej wskazano jednostkę miary [W/(m*kg)] powinno być [W/(m*K)].

W odniesieniu do stosowanych jednostek miar w treści pracy znajduje się kilka pomyłek, między innymi: na stronie 81 dla masowego natężenia przepływu wskazano jednostkę [ks/s] zamiast [kg/s]. Na stronach 94 i 103 użyto jednostek mocy [w] zamiast [W]. Na stronie 136 wskazano, iż „Średnica rur chłodniczych wynosiła 6,35 cm (1/4)” z rozmiaru podanego w calach wynika, iż powinno być „6,35 mm”. Na stronie 169 w Tabeli 11.5. Porównanie mocy skraplacza użyto jednostki [°C] zamiast [W]. Podobnie na stronie 170 w Tabeli 11.6. Porównanie współczynnika COP użyto jednostki [°C] zamiast [-].

W treści znajduje się kilka błędów edycyjnych:

- Na stronie 37 w ostatnim wierszu zamieszczono odwołanie do tabeli 4.2, jednak z kontekstu zdania wynika, iż koresponduje ono z tabelą 4.1.
- Na stronie 62 znajduje się odwołanie w treści do rysunku 3.6 – podejrzewam, że chodzi o rysunek 5.4
- Na stronie 64 opis Tabeli 5.2. brzmi następująco: „Zmniejszenie zużycia zapotrzebowania energii do ogrzewania wynikające z zastosowania odzysku ciepła” uważam, iż powinno być „Zmniejszenie zapotrzebowania energii do ogrzewania wynikające z zastosowania odzysku ciepła”
- Na stronie 82 użyto symbolu powierzchni „a” zgodnie z ogólnymi zasadami oraz zamieszczonym w pracy wykazem symboli powinno być „A”.
- Na stronie 88 – w opisie równania 9.12 wartość sterująca została opisana jako *Carl* zamiast *ctrl* jak w równaniu.
- Na stronie 175 w pkt.3 znajduje się sformułowanie „zmniejszy energochłonny proces jego oszraniania” – powinno być odszraniania.

Zamieszczone w pracy rysunki są czytelne i jasno opisane. Jedynie rysunki przedstawiające modele symulacyjne w pakiecie Simulink (rys. 9.1, 9.4 oraz 9.12) charakteryzują się ograniczoną czytelnością.

W treści pracy stosowana jest poprawna nomenklatura. Moje uwagi dotyczą jedynie dwóch sformułowań:

- Na przelomie stron 52 i 53 znajduje się zdanie „Zalecane jest stworzenie w urządzeniu warunków jak najmniejszego oporu przepływu czynnika oraz dostatecznie dużą prędkość przepływu środowiska chłodzonego lub ogrzewanego...”

W mojej ocenie, czytelniej brzmiałoby sformułowanie:

„Zalecane jest stworzenie w urządzeniu warunków jak najmniejszego oporu przepływu czynnika oraz dostatecznie dużą prędkość przepływu medium chłodzonego lub ogrzewanego...”

- W treści często stosowane jest sformułowanie „wartości temperatury nawiewanej” w mojej ocenie powinno być stosowane „wartości temperatury powietrza nawiewanego”

Wersję angielską streszczenia rozpoczęto od sformułowania „ *The paper presents*” W mojej opinii powinno brzmieć inaczej, np. „*The doctoral thesis presents...*” lub „*The doctoral dissertation presents...*”

Recenzowana rozprawa doktorska zawiera nie tylko wartość poznawczą, ale również bardzo wysoką wartość użyteczną. Dlatego dostrzegam w niej elementy, które inspirują do zadania Autorce następujących pytań:

1. Czy funkcjonalność opracowanej konstrukcji pozwala na schładzanie powietrza nawiewanego w okresie letnim oraz wykorzystanie ciepła odpadowego na potrzeby c.w.u.?
2. Czy w badaniach uwzględniono poziom hałasu emitowany podczas pracy urządzenia a w szczególności wynikający z przepływu powietrza przez wymienniki ciepła?
3. Czy dla opracowanej technologii istnieją ograniczenia stosowalności w zakresie kubatury lokali lub ich przeznaczenia?

Podsumowanie

Rozprawa wykazuje wysoki poziom umiejętności Doktorantki w zakresie formułowania i rozwiązywania problemu badawczego w oparciu o starannie dobrane narzędzia i metody badawcze oraz dogłębną analizę literatury naukowej wraz z innymi źródłami, w tym ustawodawczymi i normatywnymi. Na tej podstawie w podsumowaniu niniejszej recenzji przedstawiam następującą opinię:

1. Rozpatrywany w rozprawie problem badawczy poprawnie sformułowano, rozwiązano i szczegółowo opracowano wyniki z uwzględnieniem aspektów aplikacyjnych wynikających z aktualności badanego zagadnienia.
2. Recenzowana praca dokumentuje bogatą wiedzę i umiejętności praktyczne Autorki. Zaproponowane rozwiązanie hybrydowej sprężarkowej pompy ciepła z

podziałem skraplacza na część wysoko i niskotemperaturową jest niepodważalnie rozwiązaniem oryginalnym i autorskim dorobkiem naukowym Doktoranki.

3. Osiągnięcie naukowe w rozpatrywanym zakresie wiedzy wykazuje potencjał dla możliwych przyszłych badań poznawczych oraz prac wdrożeniowych.
4. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne nie mają istotnego wpływu na końcową, bardzo wysoką ocenę jakości rozprawy doktorskiej.

Znacząca przewaga wartości merytorycznych o charakterze naukowym i użytecznym nad drobnymi niedociągnięciami edytorskimi sprawia, iż recenzowaną pracę oceniam niezwykle pozytywnie.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że rozprawa Pani mgr inż. Anny Choma p.t. *„Hybrydowa sprężarkowa pompa ciepła napelniona czynnikiem chłodniczym R290”* spełnia wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. z dnia 10 marca 2023 r. Dz. U. 2023 poz. 742 ze zm.) i wnioskuję o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy.

Jednocześnie, mając na uwadze niezwykle wysoką jakość merytoryczną oraz edycyjną pracy, wnioskuję o jej wyróżnienie.

Dr hab. inż. Piotr Nikończuk prof. ZUT

Szczecin, 09.04.2026

dr hab. inż. Piotr Nikończuk, prof. ZUT w Szczecinie
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Techniki Morskiej i Transportu
Katedra Technologii Ciepłych i Inżynierii Bezpieczeństwa
Al. Piastów 17, 70-310 Szczecin
tel: +48 91 449 4746, tel. kom. +48 606 967694
e-mail: piotr.nikonczuk@zut.edu.pl

Szanowni Państwo,

W załączeniu przesyłam recenzję rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Anny Choma.
W przypadku potrzeby kontaktu jestem do dyspozycji.

Serdecznie pozdrawiam

Piotr Nikończuk

