

Kraków, 19.06.2023r.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Energetyki i Paliw
Al. A. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
wnowak@agh.edu.pl
Tel: 604410913

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Pacak
„Modelowanie dystrybucji powietrza w płytowych wymiennikach ciepła o
wysokiej sprawności stosowanych w systemach klimatyzacyjnych”

Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej z 30 marca 2023 r (pismo W9/PW/370/2023).

Zasadność tematyki

Systemy pośredniego chłodzenia wyparnego stanowią atrakcyjną dla środowiska alternatywę dla konwencjonalnej klimatyzacji sprężarkowej. W pośredniej chłodnicy wyparnej powietrze produktu przechodzi przez suchy kanał płyty, a powietrze robocze przepływa przez przeciwległy kanał mokry. Powietrze z kanału mokrego pochłania ciepło z

Wydział Mechaniczno-Energetyczny
48/481/2023

Wpłynęło dnia ..03.07.23..

kanalu suchego przez płytę, gdy woda dodana do uszkodzonej powierzchni w kanale mokrym odparowuje, a tym samym chłodzi suche powietrze kanału, podczas gdy ciepło z suchego powietrza kanału ciepło z suchego kanału powietrza jest przekształcane w utajone ciepło odparowanej wody w kanale mokrym i jest odprowadzane do atmosfery wraz z powietrzem roboczym.

Oczywiście, niższe zapotrzebowanie energetyczne jest główną zaletą systemu chłodzenia wyparnego w porównaniu z tradycyjnym systemem sprężania pary. System ten pozwala na obniżenie temperatury powietrza poniżej temperatury termometru mokrego temperatura, nawet blisko temperatury punktu rosy, bez dodawania wilgoci do powietrza co powoduje, że jest on szczególnie atrakcyjny w gorących i suchych obszarach. Jednak w wilgotnych obszarach, a nawet w gorących regionach o stosunkowo długiej porze deszczowej, poziom wilgotności jest bardzo wysoki, co poważnie osłabia zdolność parowania. Dlatego też założeniem chłodzenia wyparnego jest usuwanie wilgoci z wilgotnego powietrza w takich obszarach. Najbardziej reprezentatywnym osuszaczem stałym jest napędzany termicznie osuszacz obrotowy. Niestety w przeszłości poświęcano niewiele uwagi zastosowaniu wstępnego chłodzenia powietrza przed osuszaniem w rotorze sorpcyjnym.

Pomimo zalet systemu wyparnego stosowanego w obszarach o wysokiej temperaturze i wysokiej wilgotności, wydajność chłodzenia systemu nadal stoi przed wyzwaniem w ekstremalnych warunkach ich pracy. Aby zoptymalizować wydajność operacyjną całego systemu konieczne jest opracowanie kompleksowego modelu obejmującego stałe koło osuszające, wymiennik ciepła i pośrednią chłodnicę wyparną.

Tematyka pracy doktorskiej bezpośrednio odnosi się do nowych trendów poszukiwania i wdrażania takich procesów, które umożliwiają zwiększenie efektywności otwartych systemów sorpcyjnych. Naukowy problem został prawidłowo zdefiniowany i rozwinięty za pomocą zaprezentowanych tez pracy. Zarówno cel, jak i zakres badania adekwatnie wynikają z wykonanej analizy literatury naukowej oraz problemu zdefiniowanego przez Doktorantkę.

Układ pracy

Praca podzielona jest na 17 rozdziałów i liczy 127 stron. Bibliografia zawiera 85 pozycji, w tym 7 artykułów, w których Doktorantka jest współautorem. Doktorantka

zaszczyca się stanowiącym osiągnięcie współautorstwem w serii publikacji o globalnym zasięgu.

Praca zaczyna się od Części Teoretycznej (Rozdział 1). Krytyczna analiza literaturowa wskazała na konieczność tworzenia systemów chłodniczych o wysokiej wydajności, napędzanych ciepłem, które mogą znaleźć zastosowanie w instalacjach klimatyzacyjnych. Wskazano, że poprzez podniesienie efektywności COP i integrację ich komponentów w centralnej jednostce klimatyzacyjnej, otwarte systemy sorpcyjne mogą stanowić konkurencyjną alternatywę dla tradycyjnych systemów sprężarkowych. Obecnie brakuje dostępnych metod, które pozwoliłyby na sprawdzenie równomierności dystrybucji powietrza w kanałach wymiennika. Istniejące modele wymiany ciepła i masy opierają się na założeniu o jednolitej dystrybucji powietrza w strukturach wymienników. Zatem konieczne staje się stworzenie metody, która pozwoliłaby na weryfikację tych koncepcji już na wczesnym etapie projektowania nowych struktur wymienników pośrednich wyparnej punktu rosy.

Rozdział 2 przedstawia cel, tezy i zakres pracy. Pokazano, iż zasadniczym celem pracy jest przeprowadzenie analizy dystrybucji powietrza w wymiennikach pośrednich wyparnej punktu rosy oraz opracowanie urządzenia o gabarytach i kształcie umożliwiającym podwyższenie efektywności otwartego systemu sorpcyjnego.

Rozdział 3 zawiera szczegółowy opis eksperymentalnej weryfikacji wpływu pracy wstępnego wymiennika pośredniego wyparnej punktu rosy na efektywność osuszania powietrza w rotorze sorpcyjnym. W rozdziale tym opisano stanowisko eksperymentalne. Głównymi elementami stanowiska są rotor sorpcyjny oraz wstępny wymiennik pośredni wyparnej punktu rosy. Zakresy parametrów eksploatacyjnych dla badań eksperymentalnych opisano w podrozdziale 9.1, a warunki prowadzenia pomiarów i analizowane warianty – w 9.2; natomiast wyniki pomiarów zawarto w podrozdziale 9.3. W podrozdziale 9.4 dla warunków ustalonych panujących w dniu 21 lipca 2023 przeanalizowano teoretycznie pracę systemu dla różnych temperatur powietrza regeneracyjnego (w zakresie od 40 °C do 60 °C co 5 °C).

Wynikiem kluczowym uzyskanym podczas wstępnych badań było potwierdzenie pozytywnego efektu wstępnego chłodzenia powietrza za pomocą pośredniego wymiennika wyparnej punktu rosy na efektywność procesu osuszania w otwartym systemie sorpcyjnym. Podczas tworzenia docelowej geometrii wysokoefektywnego wymiennika, niezbędne jest szczegółowe uwzględnienie strat ciśnienia. Są one istotne, ponieważ wpływają na konieczność zużycia dodatkowej energii do napędzenia wentylatora. Zagadnienie to zostało omówione w Rozdziale 4. Zaproponowana metoda numeryczna pozwoliła na wyznaczenie

strat ciśnienia oraz charakteru dystrybucji powietrza w obrębie każdej geometrii wymiennika pośredniego wyparnego. Model numeryczny umożliwił przeprowadzenie analizy dystrybucji powietrza w wymiennikach niezależnie od kształtu kanałów.

W Rozdziale 5 przeprowadzono analizę wpływu dystrybucji powietrza na efektywność wymienników pośrednich wyparnych oraz pokazano możliwość wykorzystania modeli matematycznych i numerycznych do projektowania wymienników wyparnych. Analiza dystrybucji powietrza w wybranej geometrii wymiennika pozwoliła ustalić, że dystrybucja powietrza w wymienniku istotnie wpływa na jego efektywność oraz że, przy projektowaniu wymienników wyparnych zalecane jest zapewnienie równomiernego stosunku strumienia pomocniczego do głównego w kanałach wymiennika. Pokazano, że zmniejszenie o 50% powierzchni otworów wlotowych umiejscowionych wewnątrz wymiennika nie wpływa znacząco na dystrybucję powietrza w jego wnętrzu. Dlatego zaleca się dążenie do minimalizacji powierzchni tych otworów w celu maksymalizacji powierzchni wymiany ciepła. Znaczące ograniczenia projektowe geometrii wymiennika wyparnego pojawiają się, gdy stosuje się doprowadzenie wody za pomocą dysz do mokrych kanałów wymiennika. Aby utrzymać przepływ przeciwpądowy i doprowadzanie wody grawitacyjnie, wymagane jest skomplikowanie struktury wymiennika. To jednak utrudnia utrzymanie równomiernego rozprowadzenia powietrza w urządzeniu i wymusza wprowadzenie zmian w geometrii samego urządzenia. Dlatego w podrozdziale 16 dokonano numerycznej weryfikacji geometrii wymiennika. Proponowaną geometrię wymiennika przeanalizowano pod kątem strat ciśnienia, dystrybucji powietrza oraz współczynników efektywności. Określono zalecaną wysokość kanału wymiennika, a także zaproponowano koncepcję zabudowy wymiennika w sekcji centrali. Analizowane wymienniki wyparne porównano w podrozdziale 16.3. Wymiennik III, zaproponowany przez Doktorantkę, wyróżnia się najwyższą mocą chłodniczą spośród wszystkich badanych. Jest to efekt optymalnego wykorzystania powierzchni centralnej sekcji klimatyzacyjnej oraz właściwego kształtu wymiennika, zbliżonego do wymienników rekuperacyjnych, gdzie wielkości przekrojów króćców wlotowych są porównywalne do rozmiarów głównej części wymiennika. Dzięki temu, urządzenie to posiada największy potencjał do zastosowania jako element przeznaczony do wstępnego chłodzenia powietrza dla potrzeb otwartego systemu sorpcyjnego.

W podrozdziale 17 zawarto podsumowanie i wnioski końcowe.

Elementy nowości naukowej rozprawy doktorskiej

Najważniejsze oryginalne osiągnięcia recenzowanej pracy doktorskiej to:

Doktorantka dokonała naukowego osiągnięcia, pogłębiając zagadnienia związane z dystrybucją powietrza w wymiennikach ewaporacyjnych wykorzystywanych w systemach klimatyzacyjnych. W szczególności, praca dowiodła, że:

- przy analizie nietypowych wymienników ewaporacyjnych, zastosowanie metod obliczeniowych opartych na współczynnikach tarcia okazuje się niewystarczające do uzyskania wyników zgodnych z danymi z eksperymentów,
- niezgodności wynikają z konieczności wprowadzania założeń do obliczeń, takich jak rodzaj przekroju kanałów, brak zmian kierunku przepływu czy uwzględnienia zmiennej wartości strumienia powietrza wzdłuż kanału,
- dodatkowo, na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury, Doktorantka zauważyła brak sprawdzonych metod, które umożliwiłyby określenie strat ciśnienia oraz charakterystyki dystrybucji powietrza w kanałach wymienników o małych wysokościach (poniżej 3 mm). W związku z tym, udało się uzupełnić brakującą lukę badawczą związaną z wyznaczaniem strat ciśnienia w wymiennikach ewaporacyjnych, poprzez efektywne wykorzystanie modelu bazującego na metodach obliczeniowej mechaniki płynów (ang. Computational Fluid Dynamics, CFD),
- imponujące osiągnięcia naukowe Doktorantki znajdują potwierdzenie w licznych publikacjach związanych z klimatyzacją, chłodzeniem ewaporacyjnym, wymianą ciepła i masy oraz dystrybucją powietrza. Wyniki uzyskane w ramach pracy zostały także opublikowane w artykułach z Listy Filadelfijskiej, dotyczących: przeglądu literatury związanej z pośrednimi wymiennikami ewaporacyjnymi i systemami klimatyzacji, weryfikacji metody numerycznej, analizy dystrybucji powietrza oraz eksperymentu badającego wpływ chłodzenia powietrza na efektywność osuszania powietrza w rotorze sorpcyjnym.
- Zastosowanie wymienników pośrednich wyparnych w systemach klimatyzacyjnych zostało przeanalizowane przez Doktorantkę w ramach równolegle prowadzonych badań. Doktorantka wykazała, że wymienniki pośrednie wyparne można wykorzystać w celu ograniczenia zużycia energii przez systemy klimatyzacyjne tworząc tzw. układy hybrydowe. Oszczędności wynikające z pracy hybrydowego systemu

klimatyzacyjnego w polskich warunkach klimatycznych zostały, określone w jednej z publikacji naukowych. Podczas międzynarodowej współpracy, Doktorantka dokonała szczegółowej analizy wykorzystania pośrednich wymienników ewaporacyjnych punktu rosy jako kluczowego elementu systemu sorpcyjnego, charakteryzującego się procesem usuwania ciepła sorpcji.

Najważniejsze osiągnięcia praktyczne to:

- Doktorantka współtworzyła prototyp systemu klimatyzacyjnego w ramach projektu LIDER X pt. „Wysokoefektywna jednostka wentylacyjno - klimatyzacyjna” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju - Numer umowy: U/0180/666/2019.
- opracowanie systemu klimatyzacyjnego w ramach projektu „Niskoenergetyczny dwustopniowy system klimatyzacyjny wykorzystujący strefowe wymienniki wyparne” realizowanego pod jej kierownictwem. Projekt ten jest finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach konkursu LIDER XII od 01 października 2022. Numer umowy: LIDER/29/0151/L-12/20/NCBR/2021.
- System rozwijany w ramach projektu jest przedmiotem patentu, zgłodzonego przez Doktorantkę.
- Osiągnięciem aplikacyjnym Doktorantki jest zaproponowanie nowego podejścia w analizie wymienników ewaporacyjnych, które obejmuje zalecenie, wykorzystania metody numerycznej opisującej charakterystykę dystrybucji powietrza już na wstępnych etapach projektowania nowych struktur wymienników ewaporacyjnych co umożliwia wyeliminowanie nieefektywnych wymienników na etapie koncepcyjnym.
- Kolejne znaczące osiągnięcie praktyczne Doktorantki to stworzenie unikalnej konstrukcji wymiennika ewaporacyjnego punktu rosy. Jego wymiary i kształt są tak zaprojektowane, że umożliwiają montaż bezpośrednio w sekcji centralnej jednostki klimatyzacyjnej, co jest autorską innowacją w tej dziedzinie. Strukturę wymiennika opracowano w oparciu o analizę różnych w tym autorskich geometrii wymienników wyparnych, na podstawie których zdefiniowano zalecenia dotyczące projektowania wymienników. Doktorantka wykazała w oparciu o przeprowadzony eksperyment oraz badania numeryczne, że zastosowanie wymiennika pośredniego wyparnego w otwartym systemie sorpcyjnym podwyższa efektywność osuszania powietrza co

korzystnie wpływa na efektywność energetyczną systemu klimatyzacyjnego. Wykorzystanie zaprojektowanego wymiennika, którego efektywność została określona na podstawie przeprowadzonych obliczeń, umożliwia przeprowadzenie dalszych prac mających na celu komercjalizację otwartego systemu sorpcyjnego zasilanego ciepłem. Dzięki temu, staje się on realną alternatywą dla tradycyjnych systemów klimatyzacyjnych, które wykorzystują sprężarki zasilane energią elektryczną.

Poziom warsztatowy

Rozprawa, którą oceniam, jest efektem skrupulatnych i żmudnych prac zarówno laboratoryjnych, jak i symulacyjnych. Doktorantka wykazała się znakomitym przygotowaniem do badań eksperymentalnych, posiada dogłębną wiedzę teoretyczną oraz niebywałe umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Szczególnie godne podkreślenia jest biegłe posługiwanie się przez Doktorantkę metodami badawczymi oraz interpretacja uzyskanych wyników. Zarówno wybór tematu, jak i analizowane źródła są adekwatne. Praca charakteryzuje się przejrzystym układem treści, konsekwentnym stosowaniem nazewnictwa oraz symboliki. Drobne uwagi redakcyjne, w tym dotyczące terminologii naukowej i używanych sformułowań, zaznaczyłem w maszynopisie. Te uwagi są całkowicie drugorzędne, a stosowane sformułowania ogólnie uznaję za adekwatne i poprawne. Nie mam żadnych zastrzeżeń do materiału ilustracyjnego, poza drobnymi kwestiami redakcyjnymi zaznaczonymi w tekście. Materiał ilustracyjny jest odpowiednio dobrany i celowy.

Uwagi krytyczne

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się pewne uwagi krytyczne, które nie mają jednak istotnego wpływu na wysoką wartość merytoryczną przedstawionej rozprawy, a dotyczą zagadnień omówionych poniżej.

1. Podane wartości efektywności są prezentowane jako zakresy. Czy Doktorantka może dostarczyć więcej informacji na temat warunków, które prowadzą do wartości na górnej i dolnej granicy tych zakresów? Czy można zidentyfikować optymalne warunki operacyjne, które prowadzą do najwyższej efektywności?

2. Choć Doktorantka opisuje skuteczność swojego wymiennika w kontekście zastosowania go w centrali klimatyzacyjnej i otwartym systemie sorpcyjnym, nie ma tu konkretnych przypadków użycia lub studiów przypadku, które by to potwierdziły. Takie dane mogłyby znacznie wzmocnić argumenty Doktorantki.
3. Doktorantka zauważa, że obliczenia strat ciśnienia oparte na współczynnikach tarcia są niejednoznaczne dla nietypowych wymienników wyparnych. Choć to jest prawda, Doktorantka mogłaby bardziej szczegółowo opisać te założenia i jak wpływają na obliczenia. W szczególności, jak zmiana przekroju kanału, kierunku przepływu i zmiennej wartości strumienia powietrza wpływają na wyniki.
4. Doktorantka podkreśla istotność analizy dystrybucji powietrza na wczesnym etapie projektowania, co jest istotne. Jednak brakuje tutaj konkretów. Jak dokładnie można przeprowadzić taką analizę? Jakie narzędzia lub techniki są zalecane?
5. Zalecenie dotyczące stosowania innowacyjnych materiałów porowatych do konstrukcji kanałów mokrych jest cenne, ale brakuje konkretnych przykładów takich materiałów. Czy Doktorantka mogłaby podać przykłady takich materiałów oraz wyjaśnić, dlaczego są one korzystne?
6. Doktorantka zauważa potencjalne korzyści z zastosowania wymienników pośrednich wyparnych, brakuje informacji na temat potencjalnych wyzwań lub ograniczeń związanych z ich zastosowaniem. Czy są jakieś techniczne lub ekonomiczne przeszkody, które mogłyby utrudnić wdrożenie tych technologii?
7. Uwaga drobna – proszę nie używać „energia cieplna” – powinno być „ciepło”; to samo dotyczy „zużycie energii” – energia się nie zużywa tylko zmienia postać; lepiej można to nazwać jako zapotrzebowanie na energię.

Wnioski końcowe

Reasumując można stwierdzić, iż tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Pacak „Modelowanie dystrybucji powietrza w płytowych wymiennikach ciepła o wysokiej sprawności stosowanych w systemach klimatyzacyjnych” wiąże się bezpośrednio z koniecznością wprowadzenia nowego podejścia i rozwiązań w technologiach chłodniczych.

Praca mieści się w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.

Do najważniejszych walorów recenzowanej rozprawy zaliczam:

- poprawnie postawiony problem naukowy oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Doktorantki,
- rozprawa doktorska w pełni pokazuje ogromną wiedzę teoretyczną Doktorantki, podkreślając jej zdolność do dogłębnego zrozumienia skomplikowanych koncepcji naukowych. Jest to widoczne zarówno w jej systematycznym podejściu do analizy literatury, jak i w umiejętności stosowania tej wiedzy w praktyce. Dodatkowo, sposób, w jaki Doktorantka tłumaczy skomplikowane koncepcje naukowe i techniczne w swojej pracy, pokazuje jej umiejętność przekazywania wiedzy teoretycznej w sposób zrozumiały dla czytelnika, co jest kluczową cechą dobrego naukowca,
- praca dostarcza istotnego wkładu do badań nad wymiennikami pośrednimi wyparnymi i otwartymi systemami sorpcyjnymi, a jej wyniki są potencjalnie użyteczne dla praktyki inżynierskiej i przyszłych badań,
- rozprawa doktorska zawiera rozwiązanie ważnego zadania naukowego jakim jest szczegółowa analiza kluczowej kwestii efektywności i rozkładu powietrza w wymiennikach wyparnych, dostarczając jednocześnie wartościowego wkładu naukowego w tej specjalistycznej dziedzinie,
- przeprowadzenie trudnych prac eksperymentalnych na wysokim poziomie naukowym, co podkreśla zdolność Doktorantki do samodzielnego prowadzenia badań naukowych,
- oryginalne rozwiązanie problemu naukowego przedstawione przez Doktorantkę polega na opracowaniu unikalnej konstrukcji wymiennika ewaporacyjnego punktu rosy, który może być skutecznie zintegrowany z centralą klimatyzacyjną. Poprzez precyzyjne modelowanie i obliczenia, Doktorantka była w stanie zaprojektować wymiennik o optymalnym kształcie i gabarytach. Jest to oryginalne podejście, ponieważ większość istniejących rozwiązań koncentruje się na poprawie efektywności wymienników na istniejących platformach, nie biorąc pod uwagę możliwości ich całkowitego przeprojektowania. Dodatkowo, Doktorantka wykorzystwała zaawansowane techniki obliczeniowej mechaniki płynów (CFD), aby dokładnie zmodelować

przepływ i dystrybucję powietrza w proponowanym wymienniku. Jest to oryginalne podejście, ponieważ tradycyjne metody obliczeniowe często nie są wystarczające do uzyskania dokładnych wyników w nietypowych konfiguracjach wymienników, jak te proponowane przez Doktorantkę.

- Szczególnie doceniam zaangażowanie Doktorantki w opracowanie geometrii wymiennika z wykorzystaniem modeli numerycznych. To ambitne zadanie, które Doktorantka wykonała skutecznie, dostarczając w ten sposób praktyczne narzędzia, które mogą być wykorzystane w dalszych badaniach i praktyce inżynierskiej,
- na koniec warto zauważyć, że Doktorantka zadbała o właściwą strukturę i klarowność prezentacji wyników, co znacznie ułatwia zrozumienie pracy.

Reasumując, stwierdzam że oceniona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych. Wobec powyższego *wniosuję, by Wysoka Rada Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej dopuściła mgr inż. Annę Pacak do dalszego etapu postępowania doktorskiego.*

Biorąc pod uwagę zarówno znaczące walory naukowe, jak i praktyczne powyżej opisane, zdecydowanie rekomenduję *wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej*. Bezspornie ma ona bardzo wysoką wartość naukową. Praca dostarcza solidny wkład w badania dotyczące wymienników ewaporacyjnych punktu rosy. Dotychczasowe badania w tej dziedzinie były ograniczone, a praca Doktorantki wprowadza nowe, istotne perspektywy.

Nacisk, jaki Doktorantka kładzie na opracowanie konstrukcji wymiennika, który można skutecznie zintegrować z centralą klimatyzacyjną, jest nie tylko ważny z punktu widzenia badań naukowych, ale także ma duże znaczenie praktyczne. Może to przyczynić się do znaczącego zwiększenia efektywności otwartych systemów sorpcyjnych, co ma potencjalnie olbrzymie implikacje dla przemysłu klimatyzacyjnego.

Ponadto, Doktorantka wykazała się zdolnością do prowadzenia badań na wysokim poziomie, co potwierdzają jej liczne publikacje naukowe. Jej osiągnięcia są szczególnie imponujące, biorąc pod uwagę skomplikowany charakter badanego tematu.

Podsumowując, praca Doktorantki jest wyjątkowym wkładem w dziedzinę badania wymienników ewaporacyjnych punktu rosy i zasługuje na najwyższe uznanie i wyróżnienie.

