

Warszawa 10.08.2023

Dr hab. inż. Artur Rusowicz, prof. uczelni
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska
Ul. Nowowiejska 24
00-665 Warszawa

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Pacak pt.:

„Modelowanie dystrybucji powietrza w płytowych wymiennikach ciepła o wysokiej sprawności stosowanych w systemach klimatyzacyjnych

Recenzję wykonano na zlecenie Zastępcy Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej, w oparciu o pismo nr W9/PW/371/2023 z dnia 25.05.2023 r.

Rozprawa doktorska powstała i została zredagowana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Macieja Chorowskiego.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 126 stron. Rozprawa składa się z następujących części: spisu treści, listy skrótów i symboli, streszczenia w języku polskim i angielskim, 5 rozdziałów (oznaczenie rzymskimi liczbami), wykazu literatury oraz spisów rysunków i tabel.

Rozdział I **Część teoretyczna** składa się z 8 podrozdziałów, w których Doktorantka dokonała przeglądu stanu wiedzy dotyczącej urządzeń chłodniczych, a od podrozdziału 4 skupiła się na zagadnieniach dotyczących chłodzenia wyparnego.

Rozdział II **Cel, teza i zakres pracy** w sposób zwięzły opisuje zasadnicze dokonania Doktorantki.

Rozdział III **Badania wstępne** zawiera badanie eksperymentalne, rozpoczynając od szczegółowego opisu stanowiska eksperymentalnego chłodniczego sorpcyjnego urządzenia

wyparnego oraz wykonanych na nich badań. Do systemu wprowadzono dodatkowo pośredni wymiennik ciepła wyparny.

Rozdział IV **Metody wyznaczenia strat ciśnienia** wykonano w oparciu o badania eksperymentalne, które wykorzystano w walidacji stworzonego przez Doktorantkę modelu matematycznego i numerycznego. Eksperymenty pomiaru spadku ciśnienia wykonano przy wykorzystaniu komercyjnego wyparnego wymiennika ciepła. Zaproponowany model numeryczny wykorzystano w następnym rozdziale.

Rozdział V **Wykorzystanie metod numerycznych** to główne osiągnięcie Doktorantki. Zaprojektowała kompaktowy wymiennik wyparny z użyciem modelu numerycznego. Na podstawie symulacji numerycznych optymalizowała rozptyw powietrza w wymienniku oraz określiła podstawowe wymiary geometryczne tego wymiennika. Podrozdział 17 stanowi podsumowanie całej pracy i prezentowane są w nim wnioski końcowe.

2. Cel i zakres rozprawy

Głównym celem rozprawy jest zaprojektowanie pośredniego, wyparnego wymiennika ciepła, dostosowanego do wymiarów geometrycznych centrali klimatyzacyjnej. Ponadto wymiennik powinien charakteryzować się wysoką efektywnością energetyczną. Tezę pracy stanowi założenie, iż odpowiednio ukształtowany rozptyw powietrza w wymienniku znacząco wpływa na jego efektywność. Zakres pracy podzielono, racjonalnie na pięć etapów badawczych. W pierwszym zbudowano stanowisko badawcze i wykonano na nim pomiary komercyjnego wymiennika wyparnego. W drugim etapie zaproponowano model matematyczny i numeryczny, który zwalidowano w oparciu o dane uzyskane w poprzednim etapie. Etap trzeci to analiza rozptywu powietrza w wymienniku oraz określenie jego wpływu na efektywność wymiennika, a etap czwarty to przeprowadzenie szeregu symulacji numerycznych pozwalających na zaproponowanie geometrii nowego wymiennika i określenie jego parametrów użytkowych.

Cel, zakres rzeczowy oraz teza rozprawy zostały sformułowane na podstawie ogólnej analizy dotychczasowego stanu wiedzy przedstawionej w Rozdziale 1 rozprawy doktorskiej. Cel i zakres rozprawy Doktorantka w sposób jasny i klarowny przedstawiła. Biorąc pod uwagę zawarte w rozprawie rezultaty badań eksperymentalnych proponowanych rozwiązań wyparnych wymienników ciepła, uzyskane wyniki analiz teoretycznych oraz obliczeniowych – stwierdzam, że odpowiadają one sformułowanemu celowi rozprawy. Zakres rzeczowy

rozprawy oraz zaproponowany jej zakres korespondują ze sformułowaną tezą rozprawy i pozwalają na uzyskanie rezultatów umożliwiających jej udowodnienie.

3. Uwagi krytyczne redakcyjne i dyskusyjne do pracy.

Praca jest starannie zredagowana, podzielona na dwie główne części teoretyczną i badawczą. W części teoretycznej wykonano szeroki przegląd stanu wiedzy w oparciu o 85 pozycji literaturowych, które są aktualne i dobrze dobrane do poruszanej tematyki. Można z całą pewnością stwierdzić, że Doktorantka prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną. Stosowana jest ogólnie poprawna nomenklatura naukowa oraz techniczna, chociaż pojawiają się uchybienia terminologiczne. Przykładowo czy istnieje: energia cieplna, sprawność wymienników, sprawność termometru.

Poniżej zestawiono, drobne uchybienia redakcyjne dotyczące części teoretycznej

str. 7 błąd gramatyczny „*bazujące parowaniu*”

str.7 czy prawidłowym pojęciem jest „*energia cieplna*”

str.11 niejasne sformułowanie „*Przy czym w obecnie stosowanych systemach czynnik chłodniczy zasilający chłodnice, jest wytwarzany w agregatach sprężarkowych.*”

str.14-15 rysunek 4b) i opis do niego, jak nazywają się przemiany, a szczególnie 3-4

str.15 pomieszczenie pojęć czynniki chłodnicze, freony (chlorofluorowodory)

str.16 niejasny opis systemów VRF

str.17 pojęcie „*energii cieplnej*”

str.17 niepoprawne wzory chemiczne czynnik chłodniczy/absorbent, zakres temperatury desorberów odpowiada agregatom jednostopniowym, a zakres COP dla jedno- do dwustopniowych

str.26 nie znam pojęć sprawności termometrów (wzory 2 i 3), może chodzi o nazwę innego parametru

str.27 wzór 4 to jest prawdziwe tylko w przypadku mocy chłodniczej jawnej

str.36 raczej liczba płyt niż ilość

str.37 brak wymiaru średnicy hydraulicznej

str.37 podobnie jak wyżej liczba kanałów, a nie ilość

W przypadku części dotyczącej prac badawczych Doktorantki, to sposób opisu przypomina ściśle raport z wykonanych badań. Nie jest to zarzut, gdyż opis został wykonany bardzo

solidnie. Doktorantka przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, co jest bardzo ważnym elementem rozprawy.

Do części badawczej uwagi redakcyjne zamieściłem poniżej:

str.52 powtórzenie jednostek przy ciśnieniu powietrza (wzór 20)

str.55 ostatek 4 wiersze na stronie są dla mnie nie jasne

str.58 we wzorze 21 powinna być gęstość, a nie ciepło właściwe

str.61 nieokreślone pojęcia niska, wysoka lepkości, prędkość

str.62 wzór 23, brak jednostki średnicy hydraulicznej

str.62 kształt paraboli kwadratowej?

str.62 niejasne „*jak prezentuje rysunek 16, średnica hydrauliczna przyjmuje wartość*”

str.65 początek drugiego akapitu niejasny

str.69 jeżeli założono przepływ ustalony to po co prezentowane są wzory z przepływem nieustalonym

str.74 niejasno opisano co wymaga norma

str.76 przedostatni akapit, zdanie bez orzeczenia „*Model wymiany... ..*”

str.78 może należało sprawdzić czy można zastosować analogię wymiany masy do wymiany ciepła

str.79 błędna data badań eksperymentalnych – 14 lipca 2023

str.88 dlaczego obniżenie prędkości powietrza na wlocie do kanału wymiennika zwiększa intensywność wymiany ciepła

W uwagach dyskusyjnych chciałbym podjąć temat współczynnika COP, który początkowo zdefiniowano na str.13 wzór 1. COP jest stosunkiem wytworzonej mocy chłodniczej do wymaganej mocy urządzenia zasilającego układ. W urządzeniach chłodniczych jest to parametr ważny i ogólnie stosowany. W pracy Doktorantka moc wentylatora (str.27 wzór 5) i moc chłodniczą wymiennika (tylko jawną) str.27 wzór 4 definiuje dla wymiennika. W następnych analizach COP wymiennika przyjmuje znaczące wartości na poziomie 30-175, czy należy tak wykorzystywać parametr COP do analiz. Okaże się, że otwarcie okna z wentylatorem, lub nawet bez jest najlepszym sposobem chłodzenia. Urządzenia chłodnicze sprężarkowe posiadają COP na poziomie 2-4, a absorpcyjne 0,5-1,2. Urządzenia chłodnicze wyparne (DEC) również mają całkowity COP na niskim poziomie. Jeżeli wyeliminuje się zużycie energii poprzez poszczególne elementy instalacji (nagrzewnice, napęd rotorów sorpcyjnych, napęd wymienników obrotowych, wentylatorów itp.) to o jakim COP my myślimy. W tym momencie każdy wymiennik ciepła będzie miał bardzo wysokie COP, czy takie podejście jest słuszne.

Elementem dyskusyjnym jest przyjęcie zależności 25 str.62 dla średnicy hydraulicznej. Formuły takie stosuje się dla przekroi niewiele odbiegających od kołowych, ale czy poprawne są dla szczelin. Może należało sprawdzić inne formuły stosowane dla średnic hydraulicznych. W pracy zamieszczono wiele informacji pozwalających na szczegółowe przeanalizowanie materiału badawczego. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź porządkowy i powinny być traktowane raczej jako pomoc w zakresie wykorzystania uzyskanego materiału w dalszej pracy nad bardzo złożonymi zagadnieniami ciepłno-przepływowymi w wyparnych wymiennikach ciepła. Uwagi powyższe nie pomniejszają wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

Ostatnia już kwestia dotyczy doboru liczby węzłów i generacji siatek obliczeniowych. Czy można inną metodą sprawdzić poprawność doboru siatki do symulacji numerycznych, niż ta zaproponowana w rozprawie?

4. Podsumowanie

Podsumowując, należy stwierdzić, że przedstawiona do recenzji praca doktorska charakteryzuje się pod względem merytorycznym znaczną nowością tematyczną. Zagadnienia związane z eksploatacją wyparnych systemów klimatyzacji wydają się być jednym z przyszłościowych rozwiązań prowadzących do zero emisyjnych budynków mających znikomy wpływ na środowisko. Metody podnoszenia efektywności energetycznej, czym zajmowała się Doktorantka, są obecnie priorytetowe, a jeżeli dodamy elementy ochrony środowiska poprzez eliminowanie syntetycznych czynników chłodniczych to można śmiało stwierdzić, że rozprawa prezentuje dokonania w najnowszych trendach badań. Działania w tym zakresie należy uznać za wpisujące się w ogólnoswiatową działalność na rzecz ochrony klimatu i obniżenia wykorzystania energii pierwotnej zawartej przede wszystkim w kopalinach.

Oceniając pracę pod względem redakcyjnym, stwierdzam jej bardzo wysoki poziom. Znajdują się w niej nieliczne błędy językowe i gramatyczne, które mogły powstać na etapie redakcji treści. Zastosowany język i terminologia mają w zupełności charakter techniczny, wymagany w tego typu opracowaniach.

5. Ocena pracy i wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest poważną, wnoszącą wkład poznawczy oraz metodyczny pracą naukową. Doktorantka wykazała się umiejętnością formułowania

problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla wymiany ciepła i mechaniki płynów. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa jednoznacznie spełnia zwyczajowe ramy stawiane pracom doktorskim, zarówno pod względem zakresu rzeczowego, jak poziomu oryginalności osiągnięć technicznych, konstrukcyjnych oraz metodycznych. Co więcej – istotnym walorem pracy są aspekty poznawcze dotyczące zagadnień naukowych o wciąż otwartym charakterze. Należy podkreślić, że Doktorantka realizując prace badawcze musiała zmierzyć się z koniecznością zdobycia wiedzy o charakterze interdyscyplinarnym, a rozwiązywanie wielu problemów natury konstrukcyjnej wymagało bardzo dużego poziomu kreatywności Doktorantki. Uwagę zwraca także bardzo dobrze opanowany, dojrzały warsztat pracy naukowej, czego efektem jest wiele krytycznych analiz zawartych w rozprawie. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Anny Pacak spełnia wymagania Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. 2018 z. 1668 z późn. zmianami) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

