

## Recenzja

### Rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Pawła Dorosza pt. „Badanie procesów zachodzących w chłodziarkach Joule’a-Thomsona wykorzystujących mieszaniny gazów jako czynnik roboczy”

Recenzja ww. rozprawy doktorskiej została wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Komisji ds. Stopni Naukowych w Dyscyplinie Naukowej: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 13.07.2020r. Recenzowana rozprawa została zrealizowana w Katedrze Kriogeniki i Inżynierii Lotniczej Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Maciej Chorowski, promotorem pomocniczym jest dr inż. Agnieszka Piotrowska.

#### 1. Aktualność tematu pracy

Tematyka pracy doktorskiej pana mgr inż. Pawła Dorosza dotyczy zagadnienia chłodziarek Joule’a-Thomsona, zasilanych mieszaninami gazów, które pozwalają na osiągnięcie temperatur kriogenicznych. Chłodziarki tego typu nie posiadają żadnych części ruchomych pracujących w niskich temperaturach co skutkuje tym, że są niezawodne, ciche, a przede wszystkim tanie. Typowe ciśnienie robocze chłodziarek Joule’a-Thomsona zasilanych czystym gazem sięga kilkuset barów. Stąd ich typowa praca w układach otwartych czyli zasilania z butli. Zastosowanie mieszaniny gazów pozwala na obniżenie ciśnienia roboczego do wartości rzędu 20-30 barów, czyli ciśnienia pracy jakie oferują seryjnie produkowane jednostopniowe sprężarki chłodnicze. Ta obserwacja oraz przegląd dostępnych rozwiązań w literaturze doprowadziły do postawienia tezy pracy w następującym brzmieniu: „Możliwa jest budowa jednostopniowej chłodziarki Joule’a-Thomsona zasilanej mieszaniną gazów, wykorzystującej seryjne komponenty chłodnicze, wytwarzającej moc chłodniczą na poziomie kilkudziesięciu watów w zakresie temperatury 80-100 K oraz charakteryzującej się sprawnością egzergetyczną porównywalną ze sprawnościami chłodziarek gazowych.”

W przedstawionej do recenzji rozprawie doktorskiej przedstawiono kompletną ścieżkę badawczą. W części teoretycznej rozprawy: dokonano przeglądu dostępnej literatury, przygotowano algorytmy doboru składu mieszaniny roboczej gazów, wyznaczono sprawność egzergetyczną chłodziarki dla wybranych, za pomocą algorytmu, składów mieszanin roboczych oraz dokonano analizy strat egzergii w głównych komponentach chłodziarki. W części eksperymentalnej przedstawiono wyniki badań dwóch chłodziarek Joule’a-Thomsona, o mocach nominalnych odpowiednio 10 W i 50 W oraz przedziale temperatur 90-100 K. Chłodziarka o mocy nominalnej 50 W została zmodyfikowana poprzez dodanie systemu chłodzenia oleju co pozwoliło na uzyskanie stanu ustalonego i wytworzenie 80 W mocy chłodniczej. W oparciu o wyniki pomiarów wyznaczono sprawności egzergetyczne tych dwóch chłodziarek. Potencjał do zastosowań aplikacyjnych badanego rozwiązania upatruje się między

innymi w stosowaniu chłodziarek Joule'a-Thomsona zasilanych mieszaninami gazów w systemach rekondensacji skroplonego gazu ziemnego (LNG).

Podsumowując, tematyka badań prowadzonych przez pana mgr inż. Pawła Dorosza w jego pracy doktorskiej jest aktualna. Osiągnięte wyniki są nową wiedzą i mają duży potencjał aplikacyjny. Temat pracy został wybrany prawidłowo. Treść zawarta w rozprawie odpowiada kryteriom pracy doktorskiej.

## 2. Charakterystyka rozprawy i jej struktura

Praca ma 116 stron, zawiera 7 rozdziałów głównych podzielonych na podrozdziały nawet do piątego poziomu. Praca nie posiada załączników. Praca napisana jest w języku polskim. Układ rozdziałów i ich zawartość należy uznać za prawidłowy. Ocenie nie podlegała poprawność stylistyczna oraz gramatyczna pracy. Jest ona napisana językiem zrozumiałym.

W rozdziale 1 – Wstęp – Doktorant przedstawił krótkie wprowadzenie do głównych zagadnień kriogeniki i obszerne wprowadzenie do tematyki chłodziarek kriogenicznych. Doktorant w tym wstępie przedstawił szerokie spektrum zastosowań kriogeniki w zakresie temperatur 80-120 K oraz potrzeb z tego wynikających. Tym samym wskazuje na potrzeby rynkowe jako uzasadnienie tematyki swojej pracy doktorskiej. Następnie Doktorant przedstawia teoretyczne wprowadzenie do efektu Joule'a-Thomsona oraz omawia zasadę działania, zastosowanie oraz wydajność chłodziarek Joule'a-Thomsona zasilanych czystym gazem. W tym rozdziale przedstawione zostały również podstawy teoretyczne egzergii i sprawności egzergetycznej oraz omówiona została sprawność egzergetyczna chłodziarki Joule'a-Thomsona. Finalnie Doktorant odniósł się do tematu chłodziarek Joule'a-Thomsona zasilanych czystymi gazami i pracujących w układach otwartych oraz ich ograniczeń.

Rozdział 2 poświęcony jest chłodziarkom Joule'a-Thomsona zasilanych mieszaniną gazów. Schemat chłodziarki oraz wykres T-s pokazujący przemiany zachodzące w chłodziarce przedstawiony jest w przystępny sposób na Rys. 2.1. Charakterystyka potencjalnych składników mieszaniny roboczej oraz zasady doboru składników do mieszaniny zostały opisane w podrozdziale 2.2. W podrozdziale 2.4 przedstawiono obecny stan wiedzy w zakresie chłodziarek Joule'a-Thomsona zasilanych mieszaniną gazów. Finalnie, podrozdział 2.5 stanowi teza pracy, którą doktorant sformułował w jednym zdaniu o długości 4 linijek tekstu, w sposób następujący: "Możliwa jest budowa jednostopniowej chłodziarki Joule'a-Thomsona zasilanej mieszaniną gazów, wykorzystującej seryjne komponenty chłodnicze, wytwarzającej moc chłodniczą na poziomie kilkudziesięciu watów w zakresie temperatury 80-100 K oraz charakteryzującej się sprawnością egzergetyczną porównywalną ze sprawnościami chłodziarek gazowych."

Najważniejszą częścią pracy są rozdziały 3, 4 i 5. Zawierają one element twórczy, który stanowi około 60% objętości pracy. Rozdział 3 jest poświęcony doborowi składu mieszaniny roboczej przy pomocy algorytmów stworzonych przez Doktoranta. Na podstawie literatury, w której rekomendowane są mieszaniny składające się z co najmniej 4 składników, Doktorant przyjął do analizy mieszaniny 4 i 5 składnikowe. Istnieje bogata literatura, przytoczona przez Doktoranta, w której przedstawione są metody wyznaczania udziałów poszczególnych składników. Własności mieszaniny w poszczególnych stanach zostały wyznaczone z wykorzystaniem równania Penga-Robinsona, rekomendowanego dla mieszanin węglowodorów. Rozdział 4 omawia analizę egzergetyczną chłodziarki Joule'a-Thomsona zasilanej mieszaniną gazów. Rozdział 5 bardzo obszernie przedstawia weryfikację eksperymentalną dobranych składów mieszaniny roboczej i przewidywanej sprawności egzergetycznej oraz strat egzergii w poszczególnych komponentach chłodziarki. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone na dwóch stanowiskach badawczych o mocach nominalnych odpowiednio 10W i 50W.

Pracę zamykają rozdziały 6 i 7. Rozdział 6 zawiera opis możliwych zastosowań aplikacyjnych jednostopniowych chłodziarek Joule'a-Thomsona. Doktorant przedstawił najbardziej prawdopodobne zastosowanie badanych przez siebie chłodziarek. Są to instalacje do rekondensacji skroplonego gazu

ziemnego. Doktorant zwrócił uwagę na sterowanie chłodziarką Joule'a-Thomsona. Stosowanie mieszaniny jako czynnika roboczego powoduje trudności w kontrolowaniu procesów (poślizg temperaturowy) w chłodziarkach. Rozdział 7 przedstawia wnioski wyciągnięte z poszczególnych etapów realizacji badań naukowych.

### 3. Kluczowe osiągnięcia naukowe zawarte w rozprawie

W przedstawionej rozprawie mgr inż. Paweł Dorosz skoncentrował się na udowodnieniu tezy pracy doktorskiej przedstawionej w podrozdziale 2.5. Doktorant przeprowadził stosowne obliczenia numeryczne oraz badania eksperymentalne. Zostało wykazane, że jednostopniowe chłodziarki Joule'a-Thomsona, w których czynnikiem roboczym jest mieszanina gazów i generujące stosunkowo niewielką moc chłodniczą, mogą mieć zastosowanie w badaniach naukowych, medycynie oraz przemyśle. Jednym z trudniejszych i czasochłonnych zagadnień realizowanych w tej pracy był optymalny dobór gazów wchodzących w skład mieszaniny roboczej chłodziarki oraz analiza właściwości dobranej mieszaniny. Drugim takim czasochłonnym, ale bardzo ciekawym i wzorowo przeprowadzonym zadaniem była część eksperymentalna. Oba te osiągnięcia naukowe zostały zrealizowane wzorowo. Doktorant uzyskał zamierzony przez siebie cel, co zostało opisane w monografii oraz uzyskał pozytywną opinię recenzenta pracy.

### 4. Uwagi merytoryczne

- a) *Streszczenie, str. 8: moc nominalna badanych chłodziarek została wskazana jako 10 W i 80 W. W treści pracy moc nominalna drugiej skraplarki wynosi 50 W, zaś osiągnięcie mocy 80 W było możliwe po zastosowaniu dodatkowego obwodu chłodzącego.*
- b) *Wstęp, str. 9: Doktorant nie wskazał temperatury wrzenia ciekłego azotu, podczas gdy na tej samej stronie podaje temperaturę wrzenia metanu oraz temperaturę krytyczną YBCO. Temperatura wrzenia azotu pojawia się dopiero w drugim rozdziale, na str. 21.*
- c) *Wstęp, str. 12: zastanawia krzywa inwersji dla azotu na Rys. 1.1. Wydaje się, że podczas tworzenia tego rysunku program graficzny nie do końca spełnił oczekiwania Doktoranta, gdyż zarówno ciśnienie 380 bar jak i temperatura wrzenia azotu nie są prawidłowo zaznaczone.*
- d) *Wstęp, str. 16: Rys 1.4 nie do końca odzwierciedla stwierdzenie w tekście na tej samej stronie: „W przypadku azotu, takie ciśnienie pozwala na uzyskanie niezerowego efektu chłodniczego przy różnicy temperatury do 8 K”.*
- e) *Rozdział 2, str. 22: wyjaśnienie skrótu PFC (perfluorowęglowodory) jest dopiero na stronie 27, podczas gdy był on wspomniany wcześniej, na stronie 22 razem z HFC, którego wyjaśnienia nie znalazłem w tekście pracy.*
- f) *Rozdział 3, str. 28: zastosowano skrót myślowy: „Dobór składu mieszaniny roboczej został przeprowadzony z wykorzystaniem języka Python.” Czy w tym zdanie chodzi o oprogramowanie napisane w języku Python? Podobnie na str. 29 „...w przypadku obliczeń w języku Python”. Python to jest język programowania wysokiego poziomu.*
- g) *Rozdział 3, str. 30: algorytm zaprezentowany na stronie 30 wymaga wyjaśnienia co tak naprawdę oznacza skok  $\Delta z=0.5$ . Czy w jednym kroku zmienia się jeden składnik czy wszystkie?*

- h) Rozdział 3, str. 30: „pochodna współczynnika  $a_m$  po temperaturze”. Powinno być pochodna współczynnika  $a_m$  względem temperatury.
- i) Rozdział 3, str. 34: Pojawiają się pojęcia oszacowania i obliczenia. Jak należy rozumieć np. „Na tej podstawie można oszacować nową wartość udziałów w fazie ciekłej ( $x_{i,n}$ ) z wykorzystaniem rów. 3.28”
- j) Rozdział 3, str. 38: „Iteracje można zakończyć, jeśli spełniony jest warunek, opisany rów. 3.45”. Można to znaczyć nie musimy. A jaka jest alternatywa, co jeśli nie skończymy iteracji?
- k) Rozdział 3, str. 41: Rys. 3.6 – w trzecim kroku algorytmu powinno być raczej  $f(p, z_i)$ . W przedstawionym algorytmie temperatury wrzenia i skraplania będą liczone tylko dla  $p_i$  i nie zadziała pętla  $p=p_n$ .
- l) Rozdział 4, str. 44: Dość niefortunnie sformułowane pierwsze zdanie, sugerujące, że analiza egzergetyczna chłodziarki została opisana w rozdziale 1.1.4. W tym rozdziale znajdują się podstawy teoretyczne do tej analizy.
- m) Rozdział 4, str. 49: „Można zauważyć, że suma strat egzergii w tych dwóch wymiennikach ciepła wynosi ponad 70%”. Rozumiem, że to 70% wszystkich strat?
- n) Rozdział 5, str. 75: Obserwacja Doktoranta o braku wpływu przekroczenia dopuszczalnej temperatury na sprężarkę – raczej naturalnym jest, że producent urządzenia zakłada 10 - 15% margines bezpieczeństwa i w tych badaniach nie został on przekroczony. Informacja ta jest powtórzona we wnioskach: „Lokalne przekroczenie dopuszczalnej temperatury wewnątrz sprężarki nie powoduje problemów eksploatacyjnych i nie wpływa na żywotność sprężarki, co zostało potwierdzone eksperymentalnie.

## 5. Uwagi edytorskie

- a) Doktorant kumuluje istotne informacje w bardzo długich zdaniach, często przekraczających 3 linijki. Czyni to pracę bardzo wymagającą podczas czytania, gdyż wielokrotnie konieczny jest powrót do początku zdania aby zrozumieć jego sens. Użycie krótszych zdań znacznie polepszyłoby przekaz informacji oraz komfort czytania.
- b) Doktorant zbyt często powtarza te same informacje, czasami nawet co drugie zdanie, jak na przykład na str. 13 i 14 „brak części ruchomych”, zdanie przerwy i „bez jakichkolwiek komponentów zawierających elementy ruchome”; na str. 42 dwa razy ta sama informacja: „Minimalna różnica entalpii ...”
- c) Na pierwszej stronie Wstępu podwójne „o” w wyrazie *posiadają*.
- d) Str. 38 i str. 39 : Rys. 3.4 i 3.5 - bardzo małe litery, jest nieczytelny.
- e) Str. 61 jest „moc chłodniczej” powinno być „mocy chłodniczej”
- f) Str. 64 jest „wynosi 3,81”, powinno być „3,81%”, tak jak to jest w tab. 5.2

## Wniosek końcowy

Pomimo wystąpienia kilku niedociągnięć, praca prezentuje materiał o dużej wartości poznawczej, wskazującej na oryginalne i twórcze podejście do problematyki przedstawionej w tezie pracy. Poziom zawartego w pracy materiału i zaprezentowane wyniki spełniają warunki stawiane rozprawom doktorskim.

Podsumowując, stwierdzam że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Dorosza spełnia warunki określone w art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65 poz. 595 z późn. zmianami) i wnioskuję do Komisji ds. Stopni Naukowych w Dyscyplinie Naukowej: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie mgr inż. Pawła Dorosza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

15.08.2020

.....  
data sporządzenia recenzji

Bocian

.....  
podpis recenzenta

