



prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz

Katedra Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok,
tel. 571 443 089
505 835 170
e-mail: d.butrymowicz@pb.edu.pl

Białystok, 29.09.2020

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Pawła Dorosza

Badanie procesów zachodzących w chłodziarkach Joule'a-Thomsona wykorzystujących mieszaniny gazów jako czynnik roboczy

Opinia została opracowana na zlecenie Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej, reprezentowanej przez Przewodniczącego w osobie Pana Dr hab. inż. Radosława Zimroza, Prof. Uczelni, pismo W9/PW/699/2020 z dnia 13 lipca 2020.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest Prof. dr hab. inż. Maciej Chorowski, zaś promotorem pomocniczym jest Dr inż. Agnieszka Piotrowska.

I. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 116 stron. Rozprawa składa się z następujących części: zestawienia oznaczeń, zestawienia źródeł dofinansowania pracy, wstępu (rozdział 1), opisu działania chłodziarki Joule'a-Thomsona wraz ze wskazaniem tezy pracy (rozdział 2), rozdziałów 3-6 prezentujących własny materiał badawczy, podsumowania (rozdział 7) oraz zestawienia bibliograficznego. Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

1. **Wstęp**, w którym Autor dokonał przeglądu stanu ogólnej wiedzy dotyczącej układów kriotechnicznych z wykorzystaniem efektu Joule'a-Thomsona.
2. **Chłodziarki Joule'a-Thomsona zasilane mieszaniną gazów**. W rozdziale przedstawiono przegląd aktualnej wiedzy w przedmiotowym zakresie, a także zawarto sformułowanie tezy rozprawy.
3. **Dobór składu mieszaniny roboczej realizującej obieg w chłodzience J-T**. W rozdziale tym Doktorant przedstawił autorską procedurę doboru składu mieszaniny gazów jako czynnika roboczego w chłodzience Joule'a-Thomsona wraz z prezentacją uzyskanych wyników.
4. **Analiza egzergetyczna chłodziarki Joule'a-Thomsona zasilanej mieszaniną gazów**. W rozdziale tym Doktorant zamieścił kompleksową analizę egzergetyczną chłodziarki Joule'a-Thomsona wraz z analizą start egzergetycznych generowanych w poszczególnych

elementach tej chłodziarki dla przypadku zastosowania mieszaniny gazów jako czynnika roboczego.

5. **Badania eksperymentalne.** W rozdziale zaprezentowane zostały badane układy chłodziarek, metodyka badawcza oraz uzyskane rezultaty.
6. **Rekondensacja skroplonego gazu ziemnego (LNG) – perspektywiczne wykorzystanie chłodziarek J-T zasilanych mieszaninami gazów.** W rozdziale zaprezentowano analizę potencjalnego zastosowania chłodziarki Joule’a-Thomsona w zastosowaniu do rekondensacji pary generowanej w wyniku zysków ciepła w systemach LNG.
7. **Wnioski.** W Rozdziale tym Doktorant dokonał syntetycznego podsumowania uzyskanych wyników i wskazał rekomendacje w zakresie praktycznego ich wykorzystania.
8. **Bibliografia** zawierająca wykaz 105 pozycji literatury, obejmująca głównie najnowsze publikacje z renomowanych czasopism międzynarodowych. W spisie literatury znalazło się 63 artykułów naukowych z renomowanych czasopism specjalistycznych z listy JCR oraz międzynarodowych czasopism specjalistycznych, 6 referatów z konferencji międzynarodowych, 18 pozycji książkowych i monograficznych, dalsze pozycje to raporty techniczne, publikacje w literaturze technicznej, dokumentacja techniczna oprogramowania oraz sprzętu, a także akty prawne. Autor cytuje cztery własne publikacje współautorskie: dwa artykuły opublikowane w *International Journal of Refrigeration* (pozycja [17]) oraz *Entropy* (pozycja [24]) - czasopisma indeksowane w bazie JCR), a także dwa referaty konferencyjne *IOP Conference Series: Materials Sciences and Engineering* (pozycje [18, 94]).

II. Cel i zakres rozprawy

Doktorant sformułował cel oraz zasadniczy zakres rozprawy w Rozdziale 2.4 wskazując na potrzebę opracowania rozwiązania chłodziarki Joule’a-Thomsona pobierającej w temperaturze 90 K wydajność chłodniczą od kilku do kilkudziesięciu watów, uzasadnił potrzebę zastosowania mieszaniny gazów jako czynnika roboczego w takim urządzeniu.

Doktorant sformułował tezę w postaci jawnej w Rozdziale 2.5 w następującej postaci: „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”. Tak postawiona teza nie dotyczy kwestii o dobrze ugruntowanym charakterze i jej udowodnienie stanowi rzeczywiste wyzwanie nie tylko o charakterze poznawczym, lecz także metodycznym oraz technicznym. Szczególnie istotny jest także walor aplikacyjny tkwiący w tak postawionej tezie, co stanowi szczególnie cenną okoliczność w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych.

Cel, zakres rzeczowy oraz teza rozprawy zostały sformułowane na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy w zakresie zagadnień dotyczących układów kriotechnicznych wykorzystujących efekt Joule’a-Thomsona. Niewątpliwie sformułowany cel oraz wskazany szczegółowy zakres rozprawy ze sobą w pełni korespondują, program prac o charakterze analitycznym oraz eksperymentalnym zaproponowany przez Doktoranta ze sformulowanym celem oraz postawioną tezą w pełni korespondują. Co więcej, w układzie pracy, przy tak postawionym celu oraz zakresie - znajdują się zarówno wątki o charakterze prac w zakresie modelowania analitycznego układów kriotechnicznych, modelowania własności termodynamicznych oraz szerokiego zakresu badań eksperymentalnych. Należy wziąć pod

uwagę, że rozprawa podejmuje zagadnienia rozważane w literaturze, wobec czego uzyskanie znaczących poznawczo oraz metodycznie rezultatów stanowi rzeczywiste wyzwanie. W tym kontekście wskazany cel oraz tezę postawioną w rozprawie uznaję za w pełni adekwatne.

Biorąc pod uwagę zawarte w rozprawie rezultaty badań eksperymentalnych proponowanych rozwiązań chłodziarki Joule'a-Thomsona, uzyskane wyniki modelowania analitycznego w zakresie efektywności egzergetycznej układu kriotechnicznego oraz doboru adekwatnego roztworu gazowego jako czynnika roboczego – stwierdzam, że odpowiadają one sformułowanemu celowi rozprawy. Zakres rzeczowy rozprawy oraz zaproponowana metodyka badawcza w pełni korespondują ze sformułowaną tezą rozprawy i pozwalają na uzyskanie rezultatów pozwalających na jej udowodnienie.

III. Treść rozprawy

Wstęp do rozprawy Doktorant rozpoczął przedstawiając w sposób ogólny rodzaje urządzeń wykorzystywanych w kriotechnice oraz podkreślając rolę i znaczenie układów wykorzystujących efekt Joule'a-Thomsona. Następnie został w sposób szczegółowy omówione podstawy fizyczne efektu Joule'a-Thomsona, a także obieg realizowany w chłodziarce Joule'a-Thomsona wykorzystującej jednorodny czynnik roboczy. W sposób szczegółowy Doktorant przeanalizował konsekwencje zastosowania azotu jako jednorodnego czynnika roboczego w odniesieniu do końcowej różnicy temperatur oraz maksymalnego ciśnienia roboczego w układzie. Zostały przedstawione elementarne zagadnienia analizy egzergetycznej rozważanego obiegu termodynamicznego oraz zamieszczone i omówione rezultaty dla przypadku czystego azotu jako czynnika roboczego.

W Rozdziale 2 został przedstawiony obieg realizowany w układzie Joule'a-Thomsona z zastosowaniem roztworu gazowego. Doktorant uzasadnił w oparciu o dotychczasowe osiągnięcia naukowe konieczność zastosowania roztworu gazowego jako czynnika roboczego w układzie Joule'a-Thomsona. Przedstawiony został krytyczny przegląd literatury w zakresie zagadnień doboru składu roztworu gazowego, uwzględniając także zagadnienia związane z restrykcjami prawnymi w zakresie zastosowań czynników roboczych w technice chłodniczej i kriotechnice. Na tym tle Doktorant przedstawił zasadniczy cel pracy, jakim jest opracowanie w urządzeniu chłodniczego wykorzystującego odpowiednio dobrany roztwór gazowy jako czynnik roboczy, zdolnego do wytworzenia wydajności chłodniczej rzędu od kilku do kilkudziesięciu watów i zarazem uzyskującego efektywność energetyczną nie gorszą od innych typów urządzeń, a przy tym złożonego z elementów i urządzeń stosowanych w konwencjonalnej technice chłodniczej. Rozdział ten kończy sformułowanie tezy rozprawy doktorskiej.

W Rozdziale 3 przedstawiono autorską propozycję doboru składu roztworu gazowego adekwatnego do zastosowania jako czynnik roboczy w układzie chłodniczym Joule'a-Thomsona - celem uzyskania temperatury około 90K przy maksymalnym ciśnieniu roboczym adekwatnym do wykorzystania konwencjonalnych sprężarek stosowanych w technice chłodniczej, tj. do ciśnienia około 35 bar, wraz z ograniczeniami wynikającymi z tzw. koperty pracy sprężarki, w tym granicznej temperatury końca sprężania. Doktorant uzasadnił przyjętą bazę gazów do sporządzenia roztworu, w tym obejmującą węglowodory. Przyjęte zostało do wykonywania analiz termodynamicznych równanie stanu Penga-Robinsona. Doktorant przedstawił metodykę obliczania temperatury, entalpii i składu roztworu w fazie ciekłej i parowej na liniach nasycenia dla wrzenia oraz skraplania. Zastosowaną metodę Doktorant

zastosował do obliczenia minimalnej różnicy entalpii właściwych – zdefiniowanej w sposób adekwatny do wyznaczenia jednostkowej wydajności chłodniczej urządzenia pracującego według obiegu Joule'a-Thomsona.

W Rozdziale 4 zamieszczono analizę strat egzergii generowanych w poszczególnych procesach składowych obiegu rozważanego urządzenia, czyli w procesie sprężania, schładzania gazu, wewnętrznej wymiany ciepła zachodzącej w wyniku rekuperacyjnym, w procesie dławienia oraz odparowania czynnika w parowniku. Do analizy strat egzergii generowanych podczas wewnętrznej wymiany ciepła zastosowane zostało własne jednowymiarowe ujęcie opisu modelowego z uwzględnieniem strat egzergii wywołanych oporami przepływu. Następnie zostały wykonane analizy strat egzergii oraz sprawności egzergetycznej urządzenia chłodniczego Joule'a-Thomsona dla pięciu wybranych roztworów gazowych, uzyskane rezultaty pozwoliły także wskazać na wymiennik rekuperacyjny oraz sprężarkę jako dwa elementy generujące straty egzergii w największym stopniu niezależnie od dobranego składu roztworu.

W Rozdziale 5 przedstawiono badania eksperymentalne zrealizowane przez Doktoranta dla dwóch urządzeń: chłodziarki o wydajności chłodniczej nominalnej 10 W oraz chłodziarki o wydajności nominalnej 50 W, zbudowanych z zastosowaniem urządzeń i elementów stosowanych w konwencjonalnym chłodnictwie. Są to autorskie rozwiązania techniczne tych urządzeń, Doktorant przedstawił budowę tych urządzeń, a w tym własne rozwiązanie części niskotemperaturowej. W układzie o wydajności chłodniczej 10 W, obciążeniem cieplnym dla układu była moc dostarczana przez odpowiednio wykonany element grzałki elektrycznej, a oprócz tego rozwiązanie części kriotechnicznej umożliwiała bezpośrednie badania urządzenia w zastosowaniu do skraplania azotu. Zostało przedstawione oprzyrządowanie pomiarowe wraz z oceną błędów pomiarowych, a także procedura przygotowania urządzenia do badań eksperymentalnych. Badania dla układu chłodniczego o mocy 10 W wykonane zostały dla 5 wytypowanych roztworów gazowych. Przeanalizowano w oparciu o wyniki pomiarów pracę układu w fazie najeżdżania oraz pracę układu w warunkach ustalonych. W oparciu o uzyskane rezultaty Doktorant dokonał wyboru roztworu umożliwiającego uzyskanie najwyższej efektywności energetycznej urządzenia COP. Dla tego roztworu został przeanalizowany obieg zrealizowany w badanym urządzeniu, a ponadto zostały wykonane badania eksperymentalne w warunkach wykorzystania generowanej wydajności chłodniczej do skraplania azotu przy ciśnieniu około-atmosferycznym. Szczególną uwagę Doktorant poświęcił analizie pracy sprężarki w aspekcie zidentyfikowanego punktu końca sprężania, który wskazuje na politropowy przebieg procesu sprężania. Zostały wykonane przez Doktoranta unikalne badania eksperymentalne identyfikujące rozkład temperatury w krytycznych punktach sprężarki hermetycznej. W oparciu o uzyskany materiał wyjaśnione zostały fizyczne aspekty uzyskiwania obniżonej temperatury końca sprężania w odniesieniu do procesu izentropowego, w tym wynikające z wymiany ciepła zachodzącej wewnątrz sprężarki. Następnie Doktorant przeanalizował straty egzergii zachodzące w wymienniku rekuperacyjnym z zastosowaniem ujęcia jednowymiarowego. W końcowej części rozdziału zostały zamieszczone rezultaty uzyskane dla układu o nominalnej wydajności chłodniczej 50 W. Uzyskane wyniki wskazały na ograniczenia w zastosowaniu do konwencjonalnego rozwiązania układu z uwagi na przekroczenie granicznej temperatury końca sprężania. Problem ten Doktorant przeanalizował pod kątem zastosowania chłodzenia oleju z zastosowaniem wymiennika wewnętrznego w sprężarce bądź zastosowania dodatkowego układu chłodzenia oleju. W ostateczności Doktorant zdecydował się na zastosowanie tego drugiego rozwiązania wraz z dodatkowym układem odolejaczy. W ostateczności działania podjęte w tym zakresie zostały uwieńczone

sukcesem, zostały zaprezentowane wyniki badań eksperymentalnych tak zmodyfikowanego układu w warunkach najeżdżania oraz w warunkach stanu ustalonego. Została wykonana analiza efektywności energetycznej oraz egzergetycznej badanego układu wskazująca na uzyskanie pożądanego jej poziomu – adekwatnego w odniesieniu do rozwiązań konkurencyjnych układów kriotechnicznych w podobnych warunkach pracy.

W Rozdziale 6 podjęte zostały zagadnienia oceny możliwości zastosowania opracowanego rozwiązania układu chłodniczego Joule'a-Thomsona dla celów rekondensacji pary generowanej w wyniku zysków ciepła w systemach LNG. Dobrany został optymalny skład roztworu dedykowanego do zastosowania w układzie chłodniczym rekondensacji pary metanu na podstawie analizy sprawności egzergetycznej. Przeanalizowano także możliwość zastosowania układu z dwustopniowym sprężaniem, dla którego oceniono także straty egzergii generowane w poszczególnych elementach składowych układu. Przeprowadzona została także analiza 4-stopniowego układu kaskadowego, dla którego dobrano adekwatne czynniki robocze w poszczególnych kaskadach, przeanalizowano straty egzergii występujące w elementach składowych poszczególnych kaskad oraz porównano efektywność egzergetyczną układu kaskadowego oraz układu Joule'a-Thomsona z zastosowaniem optymalnie dobranego roztworu gazowego jako czynnika roboczego.

W Rozdziale 7 Doktorant dokonał podsumowania przeprowadzonych prac badawczych oraz sformułował rekomendacje w zakresie aplikacji proponowanych rozwiązań do budowy układu chłodniczego Joule'a-Thomsona o mocy kilku kilowatów w oparciu o konwencjonalne elementy składowe. W szczególności Doktorant w podsumowaniu wykazał w oparciu o uzyskane wyniki badań eksperymentalnych oraz analiz termodynamicznych, że postawiona teza pracy doktorskiej została w pełni udowodniona.

IV. Oryginalność i wartości poznawcze rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy z jednej strony rozpoznania zasadniczych kwestii związanych z osiągalnym poziomem efektywności energetycznej kriogenicznych układów chłodniczych, zaś z drugiej strony – podejmuje zagadnienia metodyczne stanowiące istotny postęp w zakresie rozwiązań technicznych tychże układów. Pierwszą kwestię Doktorant podjął z zastosowaniem analizy egzergetycznej oraz zaawansowanego modelowania własności roztworów także w warunkach nasycenia, opracowany został efektywny algorytm doboru najbardziej korzystnego składu roztworu gazowego jako czynnika roboczego dla układów kriogenicznych. Zwłaszcza ten ostatni aspekt stanowi o istotnym, oryginalnym osiągnięciu naukowym zawartym w recenzowanej rozprawie. Drugi z aspektów rozprawy, tj. propozycja rozwiązań technicznych układów kriotechnicznych w całości stanowi znaczące oraz w pełni oryginalne osiągnięcie metodyczne. W rozprawie podjęto w sposób oryginalny oraz innowacyjny zagadnienia budowy układów kriotechnicznych z zastosowaniem urządzeń i elementów właściwych dla konwencjonalnej techniki chłodniczej stawiając jako wyzwanie – osiągnięcie adekwatnego poziomu efektywności energetycznej oraz wydajności chłodniczej jak w rozwiązaniach konkurencyjnych. Powyższe sprawia, że recenzowana Rozprawa wnosi ważny wkład metodyczny w oparciu nie tylko o rozważania prowadzone drogą analityczną, lecz podstawą do oceny zasadniczych osiągnięć uzyskanych w tej pracy – jest eksperymentalna walidacja pracy zbudowanych przez Doktoranta układów kriotechnicznych potwierdzająca uzyskanie zakładanych celów. Niewątpliwie kwestie osiągania jak najwyższych efektywności energetycznych oraz wydajności chłodniczej w układach kriotechnicznych z zastosowaniem efektywnych ekonomicznie i racjonalnych technicznie

rozwiązań - należy do ważnych, a zarazem intrygujących problemów naukowych. Zostały one podjęte przez Doktoranta w sposób w pełni oryginalny, twórczy oraz z zastosowaniem właściwych narzędzi metodycznych.

W ramach rozprawy doktorskiej zostały podjęte prace o charakterze kompleksowym, wnoszące znaczący wkład w rozwój podejmowanego zagadnienia zarówno w aspekcie rzeczowym, jak i metodycznym. W ramach pracy doktorskiej podjęto zagadnienia w zakresie modelowania analitycznego, złożonego modelowania własności roztworów w warunkach przemian fazowych, prac konstrukcyjnych oraz kompleksowych badań eksperymentalnych. Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej zaprezentowano bardzo dojrzały warsztat pracy naukowej.

Za szczególne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- opracowanie racjonalnej metodyki doboru składu roztworu gazowego dedykowanego do zastosowania w układzie chłodniczym Joule'a-Thomsona;
- opracowanie własnych rozwiązań układów kriotechnicznych dedykowanych do uzyskania wydajności chłodniczej nominalnej 10 W oraz 50 W w warunkach temperatury ochładzanego ośrodka około 90 K przy korzystnej efektywności energetycznej oraz z zastosowaniem komponentów właściwych dla konwencjonalnej techniki chłodniczej;
- wykonanie kompleksowej analizy strat egzergii generowanych w układach kriotechnicznych, których działanie opiera się na efekcie Joule'a-Thomsona;
- wykonanie kompleksowej analizy aplikacji proponowanych rozwiązań technicznych do regazyfikacji pary w systemach LNG.

Prezentowane w rozprawie rezultaty prac mają niewątpliwie w pełni oryginalny charakter. Uzyskany materiał badawczy w pełni pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały w całości zrealizowane.

Zaprezentowane w rozprawie rezultaty wnoszą istotny wkład poznawczy w dziedzinie techniki cieplnej – zwłaszcza w zakresie zagadnień kriotechniki – mieszczących się w obszarze dotyczącym dyscypliny: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

V. Wartości użytkowe rozprawy

Recenzowana rozprawa ma niewątpliwie bardzo duży walor aplikacyjny, wynikający wprost z jej tematyki, charakteru oraz zakresu rzeczowego. W rozprawie doktorskiej podjęto zagadnienia konstrukcji układów kriotechnicznych z zastosowaniem konwencjonalnych elementów składowych oraz opracowania racjonalnej i efektywnej metody doboru składu roztworu gazowego jako czynnika roboczego. W rozprawie podjęto szereg zagadnień o wprost aplikacyjnym charakterze, w tym przykładowo dotyczących pokonania bariery granicznej temperatury końca sprężania w chłodziarkach Joule'a-Thomsona. Znaczącym wkładem jest także szczegółowa analiza aplikacji zaproponowanego rozwiązania do regazyfikacji w systemach LNG. W pracy sformułowano szereg wartościowych rekomendacji aplikacyjnych bazujących na przeprowadzonych w sposób kompleksowy pracach badawczych. Niewątpliwie przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej prace badawcze otwierają nowe możliwości aplikacyjne w obszarze związanym z kriotechniką.

VI. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

VI.1. Uwagi o charakterze merytorycznym

W rozprawie zaprezentowano oryginalne oraz kompleksowe ujęcie podejmowanego zagadnienia. Zaprezentowany w rozprawie materiał analityczny oraz eksperymentalny wymagał znacznego nakładu pracy oraz inwencji i stanowi niewątpliwie oryginalne i twórcze osiągnięcia naukowe Doktoranta. Poniższe uwagi, mające w dużej mierze charakter komentarzy bądź sugestii - nie umniejszają mojej jednoznacznie pozytywnej oraz bardzo wysokiej oceny rozprawy doktorskiej i w znacznej mierze mają raczej charakter porządkowy, formalny bądź dyskusyjny. Zamieściłem je w kolejności zgodnej z układem rozprawy.

1. Rozdział 1.1.1, na str. 12 Autor dyskutuje kwestie dodatniej wartości współczynnika Joule'a-Thomsona i stwierdza, że dotyczą one stanów zlokalizowanych po lewej stronie krzywej inwersji, podczas gdy, bazując na Rys. 1.1 – powinno się raczej je określić jako leżące wewnątrz krzywej inwersji. Bazując na Rys. 1:1 Autor wskazał na hel, wodór i neon jako przykłady gazów dla których współczynnik Joule'a-Thomsona jest zawsze ujemny – jednakże na dyskutowanym rysunku pokazano krzywe inwersji dla tych gazów wewnątrz których współczynnik ten ma wartości dodatnie.
2. Rozdział 1.1.4, na str. 19 dyskutowana jest kwestia stosowalności obiegu zamkniętego Joule'a-Thomsona z czystymi gazami Autor stwierdza, że ze względu na wysokie ciśnienie robocze nie nadają się one do pracy. W pracy nie wskazano jednakże kryteriów określających zakres technicznie bądź ekonomicznie uzasadnionej stosowalności tychże układów, np. w postaci kryterium maksymalnego ciśnienia roboczego bądź końcowej różnicy temperatur w wymienniku rekuperacyjnym.
3. Niejasno przedstawiono kwestie modelowania własności termodynamicznych gazów w Rozdziale 3. W pracy wskazano, że do modelowania własności wykorzystuje się równanie stanu Penga-Robinsona. Na str. 28, Autor wskazał, że: „własności poszczególnych składników wchodzących w skład mieszaniny odczytano z bazy danych CoolProp”. Dalej, na str. 32 Autor wskazał, że: „wartości entalpii czystych gazów opisane są równaniami wielomianowymi” i podał źródła literaturowe. Jak należy zatem przypuszczać, własności termodynamiczne czystych gazów, a zwłaszcza entalpie właściwe nie są modelowane z zastosowaniem równania Penga-Robinsona lecz innych równań stanu, co nie zostało szerzej podjęte w rozprawie.
4. Rozdział 4.1.1, analizę strat egzergii w sprężarce opisano przy milczącym założeniu, że proces sprężania odbywa się adiabatycznie, choć faktycznie – jak to wykazano w dalszej części pracy – przemiana sprężania ma charakter politropowy i efekty związane z chłodzeniem sprężanego gazu mają istotne znaczenie.
5. Rozdział 4.1.3, proponowany opis modelowy wymiennika rekuperacyjnego w ujęciu jednowymiarowym, służący do oceny strat egzergii generowanych w tym wymienniku – zawiera opis właściwy dla obszaru jednofazowego, zwłaszcza w zakresie równań (4.13) oraz (4.14), a także opisu oporu przepływu – równanie (4.19). W wymienniku tym zachodzi jednakże w jego części przemiana fazowa, czego nie ujęto wprost w przedstawionym opisie modelowym.
6. Rozdział 5.1.4 – przeanalizowano zagadnienie granicznej dopuszczalnej temperatury końca sprężania z punktu widzenia koperty pracy sprężarki zdefiniowanej przez jej producenta. Należy przypuszczać, że kryterium temperatury dopuszczalnej dotyczy jednakże temperatury pary w króćcu tłocznym, nie zaś rzeczywistej temperatury osiągalnej wewnątrz sprężarki, w tym za jej głowicą bądź na tłumiku.

7. Rozdział 5.1.4, na podstawie zamieszczonego opisu należy rozumieć, że procedura wyznaczania lokalnych rozkładów temperatury w wymienniku rekuperacyjnym zakłada równomierność gęstości wymiany ciepła na całej powierzchni tego wymiennika. Jest to istotne założenie upraszczające z uwagi na występującą przemianę fazową w tymże wymienniku.
8. Rozdział 5.2, jednym z istotnych kryteriów technicznych zapewniających długotrwałą pracę układu jest kryterium zapewnienia cyrkulacji oleju w układzie, zwłaszcza powrotu oleju z parownika do sprężarki (z uwagi na sprawność pracy odolejaczy mechanicznych nie gwarantującej absolutnej skuteczności separacji oleju). Kryterium to nie zostało w pracy w sposób przejrzysty wskazane.

VI. 2. Uwagi porządkowe

Należy podkreślić staranne przygotowanie rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę przejrzystość tekstu, a także wysoka jakość rysunków. Poniżej zawarte uwagi nie wpływają na moją jednoznacznie bardzo wysoką ocenę rozprawy i mają w dużej mierze charakter sugestii, które pozwałam sobie wypunktować mając na uwadze potencjalne wykorzystanie materiału zawartego w rozprawie w dalszych publikacjach Doktoranta.

- W Rozdziale 1.1.4, str. 17 – COP powinien być określony raczej jako efektywność energetyczna chłodziarki. Z kolei symbolem η_C (zarezerwowanym do oznaczania sprawności) oznaczono efektywność energetyczną obiegu Carnota, którą konsekwentnie powinno się oznaczyć jako COP_C .
- Rozdział 3.1, str. 33, nie podano źródła dla równania (3.18) dla obszaru dwufazowego.
- Zestawienie literatury: dla pozycji 13, 16, 42, 46, 62, 64, 68, 90, 92 nie zostały zamieszczone pełne dane bibliograficzne w pełni identyfikujące te publikacje.

VII. Uwagi końcowe

Praca jest starannie zredagowana, stosowana jest poprawna nomenklatura naukowa oraz techniczna. W pracy zamieszczono w niej 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 przepływowymi zachodzącymi w rurze wirowej. Uwagi te nie pomniejszają bardzo wysokiej wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

VIII. Wniosek do Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest poważną, wnoszącą istotny wkład poznawczy oraz metodyczny pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla zagadnień badawczych termodynamiki, wymiany ciepła i mechaniki płynów. Wymaga szczególnego podkreślenia fakt opracowania analizy w sposób bardzo kompleksowy. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa jednoznacznie spełnia zwyczajowe ramy stawiane pracom doktorskim tak pod względem zakresu rzeczowego, jak i wysokiemu poziomowi oryginalności osiągnięć poznawczych oraz metodycznych. W moim przekonaniu Doktorant opanował doskonale warsztat pracy naukowej zarówno w zakresie badań

eksperymentalnych, jak również modelowania analitycznego, w pracy zamieszczono w pełni oryginalne osiągnięcia Doktoranta posiadające bardzo duży potencjał aplikacyjny, co jest rzadko spotykaną okolicznością. Doktorant posiada w dorobku artykuły opublikowane w prestiżowych czasopismach naukowych. 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. Pawła Dorosza spełnia wymagania Art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Z uwagi na znaczny potencjał aplikacyjny oraz unikalny charakter pracy wynikający z opracowanych rozwiązań technicznych układów, które zostały pozytywnie zwalidowane eksperymentalnie – wnoszę o wyróżnienie przedmiotowej rozprawy.
3. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

