

prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielwicz
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Energii
Zakład Systemów i Urządzeń Energetyki Ciepłej
80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12
tel. +58 347 2254
email: Dariusz.Mikielwicz@pg.edu.pl

Gdańsk, 27 września 2022 r.

R E C E N Z J A

pracy doktorskiej mgr inż. Ryszarda Buchalika pt.

"Experimental and simulation studies of steady- and transient-state operation of thermoelectric systems for cooling and electricity generation"

wykonana na podstawie zlecenia z 3 sierpnia 2022 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo, Energetyka Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo, Energetyka z dnia 21 lipca 2022 r.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Grzegorz Nowak, prof. PŚI.

1. Przedmiot rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca pod tytułem „*Experimental and simulation studies of steady- and transient-state operation of thermoelectric systems for cooling and electricity generation*” dotyczy analiz układów termoelektrycznych w ustalonych i przejściowych stanach pracy. Doktorant przeprowadził analizę pracy układów termoelektrycznych oraz przedstawił analizy czterech aplikacji układów termoelektrycznych w zastosowaniach technicznych. Przedstawiona do oceny praca jest zbiorem siedmiu współautorskich publikacji, z których cztery opublikowano w renomowanych czasopismach światowych o znaczącym współczynniku wpływu. W sześciu pracach udział autorski Doktoranta jest powyżej 75%, co przekonuje o jego sprawczym wpływie na ich powstanie. W każdej z tych prac Doktorant określa się jako pomysłodawca oraz badacz tematyki, co potwierdza jego istotny wpływ na kształt każdej z publikacji. Siódma praca jest określona przez Autora jako praca pomocnicza, w której jego udział został określony na poziomie 20%. Wstęp do tych prac jest podstawą przewodnika, napisanego podobnie jak wszystkie publikacje w języku angielskim, w którym Doktorant przedstawił w sposób monograficzny zagadnienia związane z modelowaniem i eksploatacją układów termoelektrycznych.

Jak nadmieniałem wcześniej, praca jest przedstawiona w postaci przewodnika do zapoznania się z treściami publikacji. W tym świetle wstęp to pracy potraktować jako wprowadzenie Czytelnika do tematyki pracy, a następnie rozwinięcia tez składających się na cel pracy w przekonujący wywód merytoryczny.

We **wstępnym rozdziale** do pracy czytelnik wprowadzony jest do tematyki ogólnej związanej z budową i pracą urządzeń termoelektrycznych. Przedstawione są zagadnienia

związane z generacją ciepła i prądu w takich elementach poprzez wyjaśnienie efektów Peltiera oraz Seebecka. Poglębiony jest aspekt korzystania z past przewodzących do ogólnego bilansu ciepła termoelementu. Uwaga jest też poświęcona połączeniom termoelementów. Kaskadowym. Doktorant zwraca także uwagę, że wskazana jest walidacja eksperymentalna parametrów pracy termoelementów ze względu na fakt, że odnotowuje się często rozbieżności pomiędzy danymi podawanymi przez producentów oraz rzeczywistymi wartościami. Przedstawione są cel i zakres pracy. Doktorant wskazuje, że celem jego jest analiza działania systemów wyposażonych w moduły termoelektryczne zarówno w odniesieniu do układów pracujących w celu wytwarzania energii elektrycznej, jak również w trybie pompy ciepła. Wskazuje, że wiele prac dotyczących systemów termoelektrycznych ignoruje występowanie oporu cieplnego oporu przy przepływie ciepła pomiędzy wymiennikami ciepła a węzłem termoelektrycznym, przyjmując temperatury wymienników jako temperatury węzłów. Prowadzi to do uproszczeń modelu obliczeniowego i w konsekwencji do niedokładności w szacowaniu rzeczywistych wskaźników pracy takiego układu. Prace jego były nakierowane na wypełnienie następujących celów:

- opracowanie i wykonanie w pełni skomputeryzowanego stanowiska badawczego przeznaczonego do badań układów termoelektrycznych,
- opracowanie metody szybkich pomiarów statycznych do oceny rezystancji styku termicznego i podstawowych parametrów modułów oporu styku termicznego i podstawowych parametrów modułów, opracowanie modelu układu termoelektrycznego uwzględniającego opór cieplny i pojemność cieplną elementów układu pojemność cieplną elementów systemu,
- opracowanie metody oceny rezystancji termicznej styku w temperaturze zbliżonej do otoczenia,
- opracowanie oprogramowania modelującego działanie w stanie ustalonym i przejściowym systemów z modułami termoelektrycznymi,
- opracowanie procedur numerycznych i badań eksperymentalnych jedno- i dwustopniowych systemów termoelektrycznych,
- symulacje numeryczne układów odzysku ciepła odpadowego i chłodzenia w układzie wydechowym symulacje numeryczne układów odzyskiwania ciepła odpadowego i chłodzenia w układzie wydechowym silnika spalinowego (łącznie z symulacją jego działania),
- symulacje numeryczne działania i ekonomiki stosowania termoelektrycznego systemu klimatyzacji systemu klimatyzacji termoelektrycznej,
- analiza i optymalizacja zjawiska superchłodzenia w jedno- i dwustopniowych systemach termoelektrycznych.

W następnych sekcjach przewodnika następuje skrócony opis kolejnych publikacji.

W rozdziałach od drugiego do siódmego Doktorant omawia poszczególne publikacje zgłoszone przez siebie do oceny. Każdy opis składa się z wprowadzenia, przedstawienia pracy oraz wynikających wniosków.

Rozdział ósmy to podsumowanie wyników pracy oraz wnioski.

2. Tezy badawcze pracy

Doktorant w swojej pracy nie stawia tez badawczych, jedynie definiuje zakres prac, który w pełni odpowiada wymaganiom prac kwalifikacyjnych, w tym doktorskiej. Zakres prac spełnia oczekiwania, czyli w pełny sposób wprowadza czytelnika w zagadnienia układów termoelektrycznych, identyfikuje ograniczenia produkowanych elementów oraz możliwości skorzystania z nich. Identyfikuje opór cieplny pasty przewodzącej jako istotny element

prowadzący do poprawy przyszłych analiz poprzez uwypuklenie tego elementu w modelowaniu.

W ramach przeprowadzonych prac i analiz za pomocą symulacji numerycznych w specjalnie opracowanych kodzie ThermoelectricCalc oraz porównaniach z posiadanymi danymi eksploatacyjnymi z analizowanych przypadków zastosowań Doktorant w pełni wykazuje wypełnienie nakreślonego zakresu prac i w pełni dokumentuje je wynikami zamieszczonymi w publikacjach.

3. Oryginalność pracy

W mojej ocenie oryginalne osiągnięcia pracy to:

1. opracowanie algorytmu do analizy systemów termoelektrycznych w różnych modach pracy, zarówno w obiegu pojedynczym jak i kaskadowym,
2. opracowanie modelu matematycznego powyższego algorytmu w kodzie ThermoelectricCalc,
3. zaprojektowanie i zbudowanie dedykowanego stanowiska do badań elementów termoelektrycznych oraz przeprowadzenie systematycznych badań eksperymentalnych,
4. opracowanie wyników symulacji numerycznych, dyskusja wyników i zalecenia do przyszłych prac.

4. Wartości użytkowe pracy

Przedstawiona do oceny praca doktorska charakteryzuje się przede wszystkim bardzo dużymi wartościami użytkowymi, gdyż zagadnienia poruszane w pracy dotyczą rzeczywistych elementów termoelektrycznych. Zaproponowane narzędzie badawcze umożliwia dogłębną analizę takich układów. Przeprowadzone analizy możliwości zastosowania układów termoelektrycznych w postaci generatora termoelektrycznego, układów kaskadowych, układu klimatyzacyjnego czy układu zagospodarowania ciepła z wydalanych spalin w samochodzie wzmacniają jakość przedstawionych analiz. Niemniej każde kolejne zastosowanie wymaga opracowania kolejnych dedykowanych algorytmów obliczeniowych. Nie jest więc możliwe stworzenie narzędzia ogólnego. Do każdego nowego przypadku potrzebna jest praca zamodelowania całej instalacji. Pomaga w tym lektura całości pracy, która może być potraktowana jako podręcznik przy modelowaniu układów termoelektrycznych. Projektowanie tego typu elementów instalacji bez wiedzy, która została przedstawiona przez Doktoranta wymaga dużego doświadczenia, które nabywa się latami analizując podobne przypadki. Dodatkowo brak takiego doświadczenia prowadzi do ułomności w modelowaniu oraz przewymiarowania lub niewłaściwej pracy modelowanych urządzeń, a co za tym idzie błędnego oszacowania ekonomicznego.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Przedstawiona do oceny praca w formie przewodnika, a prace opublikowane w uznanych czasopismach naukowych zostały gruntownie przeanalizowane przez recenzentów wydawniczych. Publikacje te wskazują, że Doktorant posiada wiedzę i potrafi ją przedstawić w kręgach naukowych o zasięgu międzynarodowym. Jest to niezwykle istotne dla ośrodków szkolnictwa wyższego i spełnia aktualne wymagania i oczekiwania przeprowadzonej reformy szkolnictwa wyższego. Praca jest ciekawa i wpisuje się w aktualne trendy stawiane młodym naukowcom. W mojej opinii praca jest wartościowa, niemniej nie wnosi dużej oryginalności do zagadnień modelowania obiegów termoelektrycznych. Wykazuje bardziej aspekty aplikacyjne układów termoelektrycznych. Wykorzystane zostały klasyczne narzędzia do

modelowania matematycznego układów termoelektrycznych. Niemniej praca bardzo dobrze zapoznaje czytelnika z informacjami koniecznymi do pełnego rozpoznania zagadnienia zastosowań układów termoelektrycznych. Ma tak naprawdę charakter podręcznika dla podobnych zagadnień. Jest zilustrowana licznymi wykresami i rysunkami. Zaproponowane i zastosowane metody analizy obiegu termoelektrycznego są dobrym przykładem przeprowadzania podobnych analiz za pomocą podejścia numerycznego. Przedstawiona analiza stanowi istotny wkład do problematyki projektowej i eksploatacyjnej związanej z rozwojem i wdrażaniem układów termoelektrycznych w zastosowaniach technicznych. Ogólna ocena pracy przez recenzenta jest więc pozytywna. Praca porusza ważny problem i przedstawia wartościowe rezultaty. Potwierdzone jest to także przez szereg opublikowanych prac, w których Doktorant jest współautorem.

Praktycznie trudno znaleźć mankamenty merytoryczne pracy. Praca napisana jest poprawnym językiem, z wykorzystaniem właściwej terminologii, a jej lektura nie nastreca większych trudności. Na uwagę zasługuje praktycznie idealna strona edytorska pracy, nieliczne są uchybienia językowe, a szata graficzna jest nienaganna.

Kwestie, które chciałbym wyjaśnić z Doktorantem dotyczą przede wszystkim możliwości uogólnienia opracowanego modelu dla innych przypadków:


1. Dziwi mnie niewprowadzenie do modeli zależności temperaturowej własności fizycznych materiałów półprzewodnikowych. Proszę określić rząd tych własności dla materiałów półprzewodnikowych wykorzystywanych w pracy. Autor wskazuje tutaj zastosowania wysokotemperaturowe. Czy będzie się to odbywało przy wykorzystywaniu innych materiałów półprzewodnikowych? W mojej ocenie zmiana własności półprzewodników w projektowanym zakresie pracy nie będzie zbyt duża.
2. Doktorant wskazuje na ważność zagadnień związanych z naprężeniami termicznymi. Ich analiza nie jest za bardzo skuteczna za pomocą metod z parametrami skupionymi. Powinno się wówczas modelować za pomocą metod bardziej zaawansowanych, np. 3D za pomocą np. komercyjnych kodów obliczeniowych. Czy może Doktorant wskazać ewentualne ograniczenia kodów komercyjnych do tego typu analiz?
3. Zjawisko termoelektryczne jest znane od dawna. Czy Kandydat może wskazać przyszłościowe trendy w rozwoju materiałów wykorzystywanych w tym celu?
4. Czy Doktorant może wskazać możliwości ograniczania utleniania materiałów termoelektrycznych w przyszłości?

W przewodniku do prac znajdują się nieliczne błędy edytorskie, których nie wymieniam. Jak powiedziałem wcześniej, praca jest bardzo przystępna w przyswajaniu.

6. Wniosek końcowy

Biorąc powyższe uwagi pod rozwagę stwierdzam, że w moim przekonaniu praca może stanowić rozprawę doktorską. Traktuję ją jako rzeczywisty wkład do teorii modelowania obiegów termoelektrycznych. Dotyczy ona systematycznych badań zarówno numerycznych jak i eksperymentalnych. Interpretacja wyników jest przekonująca, o wysokim poziomie kompetencji Doktoranta. Uzyskane wyniki obserwacji oraz przeprowadzona analiza wyników jest interesująca, ważna zarówno z punktu widzenia poznawczego jak też i praktyki inżynierskiej. Autor przeprowadził rzetelny przegląd literaturowy, analizę posiadanych danych doświadczalnych i obliczenia za pomocą własnego narzędzia numerycznego. Wykazał się umiejętnością analizy wyników badań eksperymentalnych i numerycznych oraz głęboką wiedzą dotyczącą zagadnienia. Ponadto wykazał się dużą samodzielnością w rozwiązaniu postawionego zagadnienia. Uzyskane wyniki budzą zaufanie.

Podsumowując stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez odpowiednie ustawy. Biorąc pod uwagę podstawowy charakter przedstawionych badań kwalifikowałbym ją do dyscypliny naukowej *inżynieria środowiska, górnictwo, energetyka*. Biorąc powyższe pod uwagę, **stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Ryszarda Buchalika do publicznej obrony.**


27.08.2022