

Dr hab. inż. Joanna Wilk, prof. PRZ
Zakład Termodynamiki
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
al. Powstańców Warszawy 12
35 – 959 Rzeszów

Rzeszów, 28 marca, 2023r.

RECENZJA rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Mirosława Neski pt. *Badanie efektywności dwusekcyjnego, cieczowego wymiennika ciepła, będącego elementem układu konwersji niskotemperaturowego ciepła na energię elektryczną,*

w dyscyplinie INŻYNIERIA MECHANICZNA,
sporządzona na zlecenie Rektora Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im.
Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, pana profesora Sławomira Bukowskiego,
z dnia 9 lutego 2023 roku

I. Ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona praca, zgodnie z tytułem, dotyczy badań eksperymentalnych płaskiego, dwusekcyjnego, cieczowego wymiennika ciepła stanowiącego element układu do przekształcania niskotemperaturowej energii cieplnej na energię elektryczną. Rezultatem badań jest określenie efektywności takiego wymiennika. Zakres pracy został poszerzony o badania całościowe układu z termogeneratorami, które pozwoliły również na wyznaczenie sprawności konwersji energii cieplnej na elektryczną w rozpatrywanym przypadku.

W ramach pracy zostało zaprojektowane i zbudowane kompleksowe stanowisko badawcze. Wybrane wyniki eksperymentu porównano z rezultatami obliczeń bazujących na opracowanym analitycznym modelu procesów wymiany ciepła zachodzących w układzie z termogeneracją.

Podjęta w rozprawie tematyka jest istotna i aktualna z punktu widzenia coraz większego zainteresowania efektywnym wykorzystaniem energii odpadowej stanowiącej często niskotemperaturowe źródła ciepła możliwe do zastosowania w układzie z termogeneratorami. Podjęta w pracy problematyka jest interesująca również pod względem poznawczym. Przeprowadzone badania eksperymentalne i modelowe pozwalają na lepsze zrozumienie zjawisk zachodzących w rozpatrywanym urządzeniu, a także rozpoznanie ich wzajemnych zależności.

Rozprawa liczy 170 stron łącznie ze spisem treści, wykazem oznaczeń, spisem rysunków i tabel oraz bibliografią, w której zamieszczono 266 pozycji literaturowych. Wszystkie zostały zacytowane w pracy. Główną część rozprawy składającą się z ośmiu rozdziałów poprzedza streszczenie w języku polskim i angielskim oraz podziękowania Autora.

W rozdziale pierwszym stanowiącym wprowadzenie do zasadniczej części rozprawy zawarto sformułowanie problemu oraz cele, w tym cele szczegółowe, a także zakres prac przeprowadzonych w ramach doktoratu.

W rozdziale drugim opisano model ustalonej wymiany ciepła w systemie z generatorami termoelektrycznymi. Zaprezentowano również algorytm obliczeniowy oparty na prezentowanym modelu oraz przykładowe wyniki obliczeń przeprowadzonych w środowisku Matlab. Rezultaty symulacji porównano z odpowiednimi wynikami eksperymentu.

Rozdział trzeci zawiera przegląd literatury problemu. W kolejnych podrozdziałach tej sekcji zaprezentowano mechanizmy występujących zjawisk termoelektrycznych, a następnie opisano elementy systemów z termogeneratorami stosowane w różnych konfiguracjach technicznych.

W rozdziale czwartym Autor przeprowadził skrótową ocenę ekonomiczną w odniesieniu do zastosowania technologii termoelektrycznych oraz adsorpcyjnych technologii chłodniczych.

Kolejny rozdział piąty przedstawia metodykę badań elementu systemu z termogeneratorami – cieczowego wymiennika ciepła.

Szeroki rozdział szósty zawiera szczegółowy opis prototypowego stanowiska przeznaczonego do badań eksperymentalnych elementów systemu z termogeneratorami.

W rozdziale siódmym zatytułowanym „Badania weryfikacyjne” zostały zaprezentowane wyniki przeprowadzonych badań, głównie w postaci wykresów zależności zmian odpowiednich temperatur od różnych parametrów systemu. Określono efektywność zastosowanego wymiennika ciepła oraz sprawność konwersji energii cieplnej na elektryczną w module z termogeneratorami.

Rozdział ósmy stanowi ogólne podsumowanie prezentowanej pracy oraz wnioski.

II. Uwagi merytoryczne

Przedstawiona do oceny praca doktorska polegała w głównym stopniu na konstrukcji stanowiska pomiarowego do badań układu z termogeneratorami. Jest to oczywiście bardzo istotny element pracy i świadczy o dobrym przygotowaniu Autora do budowy szeroko-opomiarowanych stanowisk badawczych oraz do prowadzenia badań eksperymentalnych z ich wykorzystaniem. Samo jednak ujęcie zagadnienia dotyczącego budowy stanowiska budzi pewne wątpliwości. Przede wszystkim, w rozdziale szóstym zatytułowanym „Stanowisko do badania wymienników ciepła gorącej strony modułu z termogeneratorami”, brakuje jednego integralnego schematu umożliwiającego zrozumienie funkcjonowania całego stanowiska wraz z zestawieniem wykorzystanej aparatury. Brakuje również schematu badanego wymiennika ciepła z wyszczególnieniem jego geometrii. Powoduje to dużą uciążliwość dla czytelnika w kwestii kompleksowej analizy procesów zachodzących podczas prowadzonych badań. Natomiast rozdział ten zawiera bardzo dużo schematów i zdjęć, które można by zredukować dla większej przejrzystości opisu. Niektóre rysunki wręcz się powtarzają, np. rysunki 6.37 oraz 6.39, na których przedstawiono model i widok absorbera walcowo-krzyżowego. Znajduje się tu również sporo tabel z charakterystykami urządzeń i aparatury pomiarowej, niekoniecznie ważnych dla istoty zagadnienia. One także zaciemniają ważne informacje dotyczące konstrukcji stanowiska, będącego znaczącym elementem pracy doktorskiej, a tym samym istotnym osiągnięciem Doktoranta.

Inną kwestią wymagającą wyjaśnienia są główne cele pracy, które Autor sformułował jako: „Eksperymentalna weryfikacja możliwości konwersji niskotemperaturowego ciepła na energię elektryczną z wykorzystaniem generatorów termoelektrycznych oraz ocena możliwości poprawy ich efektywności poprzez dobór parametrów geometrycznych kanałów przepływowych w wymienniku ciepła od gorącej strony generatorów termoelektrycznych i natężenia przepływu gorącego płynu”. Jakkolwiek wpływ natężenia przepływu w wymienniku na efektywność systemu został przedstawiony (wykresy na rysunkach 7.2 i 7.14), trudno doszukać się odniesienia do parametrów geometrycznych kanałów. Parametry geometryczne kanałów przepływowych to przede wszystkim ich kształt, długość, wzajemne ułożenie oraz przekrój poprzeczny, który identyfikuje średnicę hydrauliczną. W prezentowanej pracy nie bardzo można znaleźć takie ujęcie, co w związku z tym Autor miał na myśli formułując cel pracy jak podano wyżej?

W rozdziale drugim pracy Autor prezentuje przyjęty model do opisu procesów wymiany ciepła w rozpatrywanym module z termogeneratorami. Pojawia się tu zależność (2.14), niezbędna do późniejszych obliczeń przekazywanego strumienia ciepła z wykorzystaniem wyników pomiarów odpowiednich temperatur i natężenia przepływu. Przedstawiony model posłużył do obliczeń efektywności rozpatrywanego wymiennika. Wyniki obliczeń porównano z danymi uzyskanymi z eksperymentu. Dobra zgodność wyników może świadczyć zarówno o poprawności przyjętych założeń w modelu, jak również stanowi walidację metody badawczej zastosowanej na skonstruowanym stanowisku pomiarowym. Nie jest jednak jasne która konfiguracja przepływów w wymienniku została uwzględniona w analizie porównawczej.

Rozdział siódmy zatytułowany „Badania weryfikacyjne” stanowi istotną część pracy, która prezentuje rozwiązanie problemu naukowego w postaci uzyskanych wyników badań prowadzonych na własnym oryginalnym stanowisku badawczym. Jednym z nich jest określenie wspomnianej wyżej efektywności wymiennika, drugim – wyznaczenie sprawności konwersji energii cieplnej na elektryczną w testowanym module (zależność (7.9)). Zgodnie z równaniem (7.10) określono niepewność wyznaczenia sprawności konwersji. Niezbędna to tych obliczeń niepewność pomiaru generowanej mocy została podana w rozdziale 6.5 (równanie (6.1.)). Jak była liczona i ile wyniosła niepewność pomiaru strumienia ciepła? Ponieważ strumień ciepła był określany na podstawie pomiaru natężenia przepływu (wzór (2.14)) przy pomocy przepływomierzy impulsowych, które charakteryzują się stosunkowo niedużą dokładnością pomiaru, jaki to miało wpływ na końcową wartość niepewności sprawności konwersji?

Uzyskana w badaniach sprawność konwersji energii jest rzędu 0.5%. Zważywszy na to, że jest to mała wartość, jak na tym tle wyglądają sprawności innych typów układów z termogeneracją?

Kolejne uwagi zostały uszczegółowione poniżej.

1. Strona 18 – niejasne sformułowanie punktu koniecznego do realizacji określonych celów pracy „...dobór intensywności i wartości oddziaływań oraz ich kierunków wymuszanych w wymienniku...” – o jakie oddziaływania chodzi?
2. Równanie (2.15) – podana w takiej formie zależność na efektywność wymiennika równałaby się zeru, bo skoro $\dot{Q}_{Hin} \approx \dot{Q}_{HW}$ (2.12) oraz $\dot{Q}_{HW} \approx \dot{Q}_{HS}$ (2.13) to $\dot{Q}_{Hin} - \dot{Q}_{HS} \approx 0$ (licznik w równaniu (2.15)). Patrząc na przedstawienie efektywności za pomocą temperatur (dotyczy to również równania (7.1)), zgodnie z opisem pod równaniem (2.15), temperatura jest w stopniach Celsjusza. W zależności Carnota, na którą powołuje się Doktorant, obowiązuje temperatura bezwzględna w kelwinach. Na str.33 został

podany literaturowy wzór (3.7) również z wykorzystaniem zależności Carnota, tym razem temperatura jest w kelwinach. Jak więc liczona była efektywność wymiennika?

3. Schemat na rys.2.6 – co oznacza symbol $\frac{dq_H}{d\tau}$ w równaniu pierwszym (wymiennik HSHE), skoro q_H to natężenie przepływu w [kg/s]? W kolejnych równaniach występują pochodne temperatury po czasie $\frac{dt_{HS}}{d\tau}$ oraz $\frac{dt_{CS}}{d\tau}$. Jak należy to rozumieć, skoro jest rozpatrywana ustalona wymiana ciepła?
4. Tabela 2.1 – podano wymiar $\frac{dq_H}{d\tau}$ w [kg/s]. Jest to nieścisłość (jak wyżej - p.3), przy takim zapisie wymiar ten będzie [kg/s²].

Skoro ciepło właściwe jest podane w [kJ/(kg K)], a współczynniki λ oraz k odpowiednio w [W/(m K)] i [W/(m²K)], to nie ma zgodności w wymiarze jednostek.

W tabeli znajduje się parametr δ_{P1} – brak dla niego opisu.

Podana jest średnica d_s - należy się domyślać, że chodzi o średnicę hydrauliczną kanału wymiennika, nie wiadomo nic o przekroju poprzecznym kanału, czy był on okrągły? (Może eliptyczny?). Na jedynym rysunku wymiennika 7.4 nie da się tego stwierdzić.

III. Uwagi redakcyjne i edytorskie

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Mirosława Neski została napisana bardzo starannie, poprawnym, niebudzącym zastrzeżeń, językiem polskim. Niemniej, w trakcie czytania pracy, nasunęło się kilka ogólnych uwag związanych z konstrukcją pracy, użytą terminologią, a także zauważono kilka błędów edytorskich.

Jeśli chodzi o terminologię to w równaniach (2.7), (2.10), (2.11) – symbol k jest użyty do przedstawienia przewodności cieplnej jak podano w opisie, przypisany wymiar to W/K. Przewodność cieplna (thermal conductivity) czy inaczej „współczynnik przewodzenia ciepła” to właściwość materiałowa o wymiarze W/(mK). Wspomniana wielkość nie jest przewodnością cieplną, można ją nazwać jako „przewodnictwo cieplne” (thermal conductance), jak podają autorzy w publikacji [15], na którą powołuje się Doktorant.

Na stronie 23 – równania (2.16) i (2.17) przedstawiają współczynniki przenikania ciepła, a nie, jak podaje Autor, „konwekcyjne” współczynniki przenikania ciepła – nie można ich nazwać tylko „konwekcyjnymi”.

W rozdziale 7.3 Autor omawia sprawność konwersji energii, którą również nazywa „efektywnością” (opis pod wzorem (7.9) oraz podpis pod rysunkiem 7.15), a także „wydajnością”.

Konstrukcja pracy jest na ogół poprawna, jednak pewne zastrzeżenia budzi podana przez Autora bibliografia. Zawiera ona aż 266 pozycji literaturowych, w których znajdują się karty katalogowe urządzeń, kart i czujników pomiarowych – 45 pozycji, a także inne prace nie związane bezpośrednio z celem naukowym rozprawy, np. normy dotyczące rur i kotłów, encyklopedie czy też poradniki obsługi sterowników.

Rozdział czwarty dotyczący aspektów ekonomicznych nie bardzo wpasowuje się w naukowy charakter pracy ściśle związany z zagadnieniami dyscypliny, w zakresie której realizowany jest doktorat – inżynierii mechanicznej (zagadnienia mechaniki płynów i wymiany ciepła).

Wykaz oznaczeń jest nieuporządkowany – przy niektórych parametrach podane są jednostki, przy innych – nie. Oznaczenie „h” to jednostka czasu, w wykazie pojawia się jako „godzina”. Przy oznaczeniu czasu „ τ ” powinien pojawić się jego wymiar. Tym bardziej, że Autor w opisie osi wykresów (np. rys.7.17, 7.18) używa formy „godz.” jako jednostki czasu.

Jak wspomniano w uwagach merytorycznych, w części pracy dotyczącej stanowiska badawczego jest za dużo schematów i zdjęć, również tabel z charakterystykami. Występuje wiele powtórzeń, opis urządzeń powinien być bardziej zwarty.

IV. Ocena pracy

Autor podjął w swojej pracy, istotny w zagadnieniach współczesnych problemów energetyki, temat dotyczący możliwości konwersji energii w sposób niekonwencjonalny – poprzez zastosowanie układu z termogeneratorami. Działanie termogeneratorów polega na odebraniu energii termicznej ze źródła górnego (wykorzystującego m.in. ciepło odpadowe), za pomocą odpowiednio skonstruowanego wymiennika ciepła i przeprowadzeniu jej w wyniku różnicy temperatur, do źródła dolnego, poprzez strukturę elementów półprzewodnikowych, które, w wyniku powstałych zjawisk termoelektrycznych, zamieniają jej część bezpośrednio na energię elektryczną. Doktorant skoncentrował się na badaniach nad zwiększeniem efektywności wymienników ciepła mających zastosowanie w układach z termogeneratorami.

Przedstawiona do oceny praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim było określenie wpływu parametrów procesowych na pracę rozpatrywanego systemu. Autor rozwiązał postawiony problem poprzez budowę kompleksowego stanowiska i przeprowadzenie na nim szeregu badań eksperymentalnych. Doktorant przedstawił również model wymiany ciepła oraz wykonał odpowiednie obliczenia, które umożliwiły walidację zaproponowanego modelu.

Autor wykazał się adekwatną wiedzą na temat zagadnień teoretycznych opisujących mechanizmy zjawisk fizycznych występujących w rozpatrywanym układzie, oraz urządzeń i ich elementów mających w nim zastosowanie.

Na uwagę zasługuje zawarta w wykazie literatury znaczna ilość artykułów, również w renomowanych czasopismach, współautorstwa Doktoranta, w których zostały opublikowane częściowe wyniki prowadzonych badań.

Autor wykazał się dużymi umiejętnościami w zakresie konstrukcji stanowiska jak i samych badań eksperymentalnych. Przedstawione w recenzji uwagi merytoryczne i redakcyjne nie przesłaniają istotnych wartości pracy i znaczenia dla zastosowań praktycznych.

Praca doktorska Pana mgr. inż. Mirosława Neski spełnia wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Przedstawione badania eksperymentalne są oryginalne. Uzyskane wyniki mają znaczenie praktyczne, mogą znaleźć zastosowanie w projektowaniu i optymalizacji systemów z termogeneratorami. Moja ocena pracy jest pozytywna. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Mirosława Neski do publicznej obrony swojej rozprawy doktorskiej.

