

Dr hab. inż. Sabina Rosiek-Pawłowska, prof. Uczelni
Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Politechnika Wroclawska
Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
Tel.: +48 (71) 320 48 29

Wrocław 25.06.2020

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. PAWŁA PACYGI PT. MODELOWANIE ZJAWISK WYMIANY CIEPŁA W KOLEKTORZE SŁONECZNYM DWUSTRONNEGO DZIAŁANIA

(promotor: dr hab. inż. Jacek Kasperski, prof. Uczelni)

Podstawę formalną niniejszego opracowania stanowi pismo z dnia 13 maja 2020 r. Przewodniczącego Komisji ds. Stopni Naukowych w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej Pana dr hab. inż. Radosława Zimroza, profesora Uczelni z informacją o powierzenie mi przez Komisję roli recenzenta rozprawy doktorskiej „Modelowanie zjawisk wymiany ciepła w kolektorze słonecznym dwustronnego działania” Pana mgr inż. Pawła Pacygi, w związku z uchwałą Komisji ds. Stopni Naukowych w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej z dnia 6 maja 2020 roku.

I. Informacje ogólne

Rozprawa składa się z dziewięciu głównych rozdziałów uzupełnionych spisem treści oraz wykazem ważniejszych oznaczeń, obejmuje 193 strony, a układ rozprawy jest klasyczny. Składa się ona z wprowadzenia, omówienia literaturowego w zakresie słonecznych systemów energetycznych, prezentacji celu pracy, części modelowania matematycznego wybranych kolektorów słonecznych, części doświadczalnej, opisu wyników badań, analizy niepewności pomiarowych, walidacji przedstawionych modeli matematycznych, analizy numerycznej wpływu wybranych parametrów fizycznych na sprawność kolektorów słonecznych, wniosków, spisu cytowanej literatury oraz dorobku naukowego Doktoranta.

Tytuł rozprawy dobrze odzwierciedla analizowany problem badawczy. W rozprawie Autor rozważa zagadnienia energetyki słonecznej, w szczególności zaprojektowano, zamodelowano, skonstruowano oraz scharakteryzowano nowy typ kolektora słonecznego dwustronnego działania KDD, umożliwiającego dwa tryby pracy urządzenia w zależności od przewagi bezpośredniego (tryb pracy KDD-PTC) lub dyfuzyjnego promieniowania słonecznego (tryb pracy – KDD-ETC). Układ treści jest uporządkowany, poszczególne rozdziały są odpowiednio ze sobą połączone i tworzą logiczną całość.

Wydział Mechaniczno-Energetyczny
43/665/2020

Wpłynęło dnia 29.06.2020

II. Szczegółowa charakterystyka pracy

W opracowaniu literaturowym, obejmującym jeden rozdział z siedmioma podrozdziałami, obszernie omówiono kluczowe zagadnienia odnoszące się do globalnego kryzysu energetycznego, związanego z ograniczonymi zasobami konwencjonalnych źródeł energii, w połączeniu z ich negatywnym wpływem na zdrowie człowieka i środowisko naturalne oraz rosnącym, globalnym popytem na energię. Podkreślono ogromny potencjał energii słonecznej, będącej obiecującym wyborem w obliczu licznych, wyżej wspomnianych problemów. Na podstawie przeglądu publikacji krajowych i zagranicznych dokonano ciekawego, obszernego przeglądu literatury w zakresie słonecznych systemów energetycznych. Sklasyfikowano kolektory słoneczne z uwagi na ich konstrukcje oraz temperaturę pracy. Przedstawiono budowę, zasadę działania płaskiego, próżniowego oraz parabolicznego kolektora słonecznego. Przeprowadzony przegląd stanu wiedzy świadczy o dużym nakładzie pracy wniesionym w tę część pracy przez Doktoranta, zwłaszcza iż przekazane informacje są usystematyzowane i zawierają podsumowanie oraz wnioski wynikające z obecnego stanu badań.

W drugim rozdziale Autor formułuje tezę pracy: „*Możliwym jest zaprojektowanie i wykonanie kolektora słonecznego dwustronnego działania, umożliwiającego dwa tryby pracy urządzenia*”. Następnie sygnalizuje plan badań dla dalszej części pracy:

1. Przegląd literatury w zakresie słonecznych systemów energetycznych z naciskiem na kolektory słoneczne: płaskie, próżniowe i paraboliczne.
2. Zgłoszenie patentowe kolektora słonecznego dwustronnego działania.
3. Opracowanie czterech oryginalnych modeli matematycznych kolektorów słonecznych, opisujących złożone procesy wymiany ciepła.
4. Projekt oraz realizacja stanowiska doświadczalnego, umożliwiającego badanie prototypowych kolektorów słonecznych w oparciu o patent RP.
5. Badania eksperymentalne trzech różnych kolektorów słonecznych w tym kolektora dwustronnego działania w dwóch trybach pracy.
6. Walidacja modeli matematycznych.
7. Analiza wpływu wybranych parametrów fizycznych na wymianę ciepła.
8. Podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych prac.

W kolejnym rozdziale Autor przedstawił koncepcję własnego wynalazku kolektora dwustronnego działania KDD. Opisano tu w sposób szczegółowy schematy koncepcji kolektora. Autor wskazuje, iż w przypadku gdy promieniowanie słoneczne bezpośrednie jest większe od promieniowania słonecznego dyfuzyjnego, kolektor słoneczny obracany jest do pozycji pozwalającej wykorzystać docierające do jego powierzchni promieniowanie bezpośrednie, poprzez jego skoncentrowanie powierzchnią wklęsłą, pokrytą warstwą zwierciadlaną. Natomiast w sytuacji, gdy promieniowanie słoneczne dyfuzyjne jest większe od promieniowania słonecznego bezpośredniego, kolektor obracany jest do pozycji pozwalającej efektywnie wykorzystać promieniowanie dyfuzyjne pochłaniane przez powierzchnię wypukłą, pokrytą warstwą absorbującą.

Przejsięcie od koncepcji do projektu kolektora słonecznego KDD, wymagało stworzenia modelu matematycznego, tak by móc wstępnie określić parametry konstrukcyjne i właściwości omawianego urządzenia. Za punkt wyjściowy do opracowania szczegółowych modeli matematycznych posłużył Dyplomantowi model Hottela-Whilliera-Blissa, który został przedstawiony w rozdziale czwartym niniejszej dysertacji. Rozdział ten, podzielony

został na pięć podrozdziałów, w których kolejno wprowadzono czytelnika w zagadnienia podstawowych założeń modelu. Pierwszy podrozdział opisuje charakterystykę modelu Hottela-Whilliera-Blissa jak dla kolektora płaskiego, niezwykle użytecznego przy modelowaniu złożonej wymiany ciepła na drodze radiacji, konwekcji i przewodzenia, gdyż pozwala na sprowadzenie równań różniczkowych i algebraicznych równań nieliniowych do algebraicznych równań liniowych. Dzięki temu, po zastosowaniu metod iteracyjnych, możliwe jest znalezienie rozwiązania dla założonych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych oraz zadanych warunków początkowych i brzegowych. W niniejszym podrozdziale Autor wyprowadził wzory na strumień energii użytecznej, jaki uzyskiwany jest podczas pracy kolektora, a także ogólną sprawność kolektora słonecznego, przedstawioną jako stosunek całkowitego strumienia energii użytecznej do całkowitego strumienia energii promieniowania słonecznego, docierającego do powierzchni kolektora w określonym czasie Δt . Autor podkreśla, iż powyższe rozważania dotyczyły klasycznego, płaskiego kolektora słonecznego i nie mogły być bezpośrednio wykorzystane przy tworzeniu szczegółowych modeli matematycznych, które dedykowane będą specyficznym konstrukcjom kolektorów słonecznych, omawianych w niniejszej rozprawie doktorskiej. Zatem w kolejnych podrozdziałach przedstawia sposób tworzenia modelu Hottela-Whilliera-Blissa dla próżniowego kolektora rurowego ETC z płaską płytą absorbera. Będzie stanowił on fundament, na podstawie którego zamierza opracować wieloaspektowe algorytmy obliczeniowe, prowadzące do uzyskania zależności na sprawność energetyczną kolektorów ETCO (próżniowy kolektor rurowy z filmem olejowym) oraz KDD (kolektor słoneczny dwustronnego działania) – w dwóch trybach pracy KDD-PTC i KDD-ETC – uwzględniających wiele parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. W dalszej części Autor wyznaczył rozkład temperatury absorbera w przekroju poprzecznym, opisał rozkład temperatury płynu w kierunku przepływu, przedstawił zależności współczynnika F' oraz F_R , a także wyprowadził wzory na średnie temperatury medium roboczego T_{wm} i absorbera T_m , niezbędnych przy tworzeniu szczegółowych modeli matematycznych kolektorów słonecznych ETC, ETCO oraz KDD.

Rozdział piąty podzielony na cztery podrozdziały poświęcony jest w całości czterem modelom matematycznym, opisującym procesy wymiany ciepła w zaprojektowanych i skonstruowanych przez Dyplomanta kolektorach słonecznych: ETC, ETCO oraz KDD. Kolektor KDD posiada możliwość pracy w dwóch trybach – KDD-PTC oraz KDD-ETC dla których Autor przedstawił dwa osobne modele matematyczne. W podrozdziale pierwszym opisano budowę kolektora ETC, zilustrowaną schematycznie na rysunku 5.1. Wspomniany rysunek stanowi przekrój poprzeczny kolektora ETC, na którym zaznaczono wszystkie najważniejsze wielkości fizyczne mające wpływ na mechanizm transportu ciepła w omawianym kolektorze. Autor kolejno przybliży zasadę działania kolektora ETC, a następnie na rysunku 5.2 przedstawia schemat sieci cieplnej dla omawianego kolektora oraz proponuje następującą jej interpretację: kolektor słoneczny ETC generuje strumień energii użytecznej, podczas gdy jego absorber pochłania strumień energii promieniowania słonecznego; gradient temperatury, występujący między absorberem a otoczeniem stanowi potencjał, wywołujący straty energii cieplnej od absorbera do otoczenia. Następnie wskazuje, iż zgodnie z prawem Ohma dla układów termicznych, wyżej opisane straty ciepła zapisuje się w postaci wyrażenia, w którym licznikiem jest gradient temperatury, występujący między absorberem a otoczeniem, a mianownikiem zastępcza rezystancja cieplna R_z . Po przedstawieniu interpretacji fizycznej zastępczego współczynnika strat ciepła U_L i sieci rezystancji cieplnych dla kolektora ETC, Dyplomant zaprezentował dalszą część modelu matematycznego: zdefiniowanie rezystancji cieplnej R_1 do R_5 , wyznaczenie konwekcyjnego współczynnika

wnikania ciepła oraz temperatury powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej osłony przezroczystej, określenie sprawności żebra, współczynnika efektywności absorbera, współczynnika odprowadzenia ciepła z kolektora, określenie energii promieniowania słonecznego zaabsorbowanego przez absorber, wyznaczenie strumienia energii użytecznej, średniej temperatury medium roboczego, średniej temperatury powierzchni absorbera, temperatury medium roboczego na wylocie kolektora słonecznego oraz sprawności energetycznej kolektora słonecznego.

Podrozdział drugi poświęcono omówieniu konstrukcji i zasadzie działania próżniowego kolektora rurowego z filmem olejowym ETCO. Autor przedstawia schemat przekroju poprzecznego omawianego kolektora, a następnie wskazuje, iż wymiana ciepła od płyty absorbera do otoczenia oraz interpretacja graficzna rezystancji cieplnej są tożsame z analizą przeprowadzoną dla kolektora ETC. Dyplomant podkreśla, iż podstawowa różnica pomiędzy modelem kolektora ETCO a modelem kolektora ETC, wynika z istnienia dodatkowych oporów przekazywania ciepła od płyty absorbera do przepływającego medium roboczego i tym samym wpływa ona na postać wyrażenia na współczynnik efektywności absorbera kolektora ETCO, co przedstawia w kolejnych równaniach omawianego podrozdziału.

Następnie Doktorant przedstawia budowę kolektora KDD-PTC, zilustrowaną schematycznie na rysunku 5.7. Wspomniany rysunek przedstawia jego przekrój poprzeczny, na którym zaznaczono wszystkie najważniejsze wielkości fizyczne mające wpływ na mechanizm transportu ciepła w omawianym kolektorze. Zachodzące w niniejszym układzie procesy wymiany ciepła i ich wzajemne relacje przedstawione zostały w postaci sieci cieplnej dla kolektora KDD-PTC. Finalnie, Autor podkreśla uniwersalność zaproponowanych modeli matematycznych, co umożliwiło rozwiązywanie modelu kolektora KDD-ETC według wzorów zaprezentowanych w modelu kolektora KDD-PTC.

Rozdział szósty dotyczy badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla trzech omawianych kolektorów słonecznych, przeprowadzonych w okresie letnim, na placu przylegającym do budynku hali maszyn Zakładu Podstaw Konstrukcji i Maszyn Przepływowych we Wrocławiu. Opis zaczyna się od przygotowania stanowiska do badań. Autor przedstawia zdjęcie stanowiska badawczego prototypowych kolektorów słonecznych, a także schemat układu hydraulicznego stanowiska doświadczalnego wraz z elementami grzejnymi. Następnie opisuje metodykę badań eksperymentalnych, przygotowaną na podstawie normy PN-EN ISO 9806 Energia Słoneczna – Słoneczne kolektory grzewcze. Przedstawia też podstawowe założenia procedury przeprowadzania badań eksperymentalnych oraz warunki i procedury prowadzenia badań eksperymentalnych. W kolejnym podrozdziale wyznacza niepewność pomiaru z jaką została określona sprawność energetyczna kolektora słonecznego, na przykładzie kolektora ETC. Finalnie Autor przedstawia kolejno cztery charakterystyki sprawności energetycznej: kolektora słonecznego ETC (rys. 6.3), ETCO (rys. 6.4) oraz kolektora KDD: KDD-PTC (rys. 6.5) i KDD-ETC rys. (6.6), w zależności od zredukowanej różnicy temperatur, uzyskanych na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Przedmiotem rozdziału siódmego jest walidacja modeli matematycznych na podstawie badań eksperymentalnych, polegająca na odpowiednim doborze wartości parametrów fizycznych dla każdego z czterech omawianych kolektorów słonecznych. Autor prezentuje odpowiadające im tabele, zawierające wykazy przyjętych w modelu wartości wielkości fizycznych oraz rysunki przedstawiające porównanie wyników badań eksperymentalnych z wynikami modelu matematycznego. Przedstawiona charakterystyka sprawności energetycznej danego kolektora słonecznego, uzyskana na podstawie zwalidowanego modelu

matematycznego, w postaci $y = ax+b$, oddaje charakter zmian sprawności energetycznej kolektora zgodnie z wynikami badań doświadczalnych.

W dalszej części dysertacji w rozdziale ósmym Dyplomant przedstawia analizy numeryczne wpływu wybranych parametrów fizycznych na sprawność kolektorów słonecznych (emisyjność absorbera, absorpcyjność absorbera, współczynnik przewodzenia ciepła absorbera, natężenie promieniowania słonecznego oraz strumień masy medium roboczego), pokazując ich istotny wpływ na pracę kolektorów ETC, ETCO, KDD-PTC i KDD-ETC. Zastosowanie parametrów optymalnych przyniosło wymierne korzyści w postaci istotnego wzrostu sprawności i mocy użytecznej rozpatrywanych kolektorów słonecznych.

Na zakończenie Doktorant dokonał podsumowania pracy i sformułował wnioski z przeprowadzonych badań, podkreślając praktyczne znaczenie badań, będących cennym źródłem informacji przy projektowaniu kolektorów słonecznych i związanych z nimi systemów.

III. Oryginalność rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy zastosowania metody sieci cieplnych i układów zastępczych rezystancji cieplnych, do stworzenia oryginalnych modeli matematycznych kolektorów słonecznych ETC, ETCO, KDD-PTC oraz KDD-ETC, opisujących złożone procesy wymiany ciepła na drodze radiacji, konwekcji i przewodzenia między czterema powierzchniami o nieznanych temperaturach, związanych ze sobą w układzie sieci cieplnej kolektora KDD. Zaproponowane modele umożliwiły wyznaczenie parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych omawianych kolektorów słonecznych, dając możliwość zaprojektowania i zbudowania stanowiska doświadczalnego do badania prototypowych kolektorów słonecznych. Po raz kolejny pokazano, iż badania eksperymentalne są konieczne, aby zrozumieć wiele problemów praktycznych, występujących podczas pracy złożonych systemów cieplnych, których nie można w pełni opisać matematycznie. Porównanie wyników doświadczalnych z wynikami analiz prowadzi do głębszego zrozumienia sposobów modelowania matematycznego. Autor porównuje otrzymane wyniki pomiarów z wynikami własnych obliczeń numerycznych dla analizowanych kolektorów słonecznych ETC, ETCO i KDD w dwóch trybach pracy KDD-PTC i KDD-ETC. Wyniki pomiarów i obliczeń numerycznych wykazują stosunkowo dobrą zgodność, a obszary rozbieżności są szczegółowo omówione w podrozdziale 6.3, dedykowanym analizie niepewności pomiarowych procedury eksperymentalnej. Zastosowanie parametrów optymalnych, dla których każdy z omawianych kolektorów słonecznych osiąga najwyższą sprawność energetyczną, przyniosło wymierne korzyści w postaci istotnego wzrostu sprawności i mocy użytecznej kolektorów słonecznych ETC, ETCO, KDD-PTC i KDD-ETC.

Otrzymane wyniki pozwalają na określenie, zarówno jakościowe jak i ilościowe, procesów wymiany ciepła, zachodzących podczas pracy kolektora słonecznego dwustronnego działania, umożliwiającego dwa tryby pracy urządzenia KDD-PTC i KDD-ETC.

Zaprezentowana w rozprawie autorska koncepcja innowacyjnej konstrukcji technicznej, umiejętność opracowania złożonych modeli matematycznych trzech kolektorów słonecznych: ETC, ETCO i KDD w dwóch trybach pracy KDD-PTC i KDD-ETC, metodyka i porównanie wyników badań eksperymentalnych z wynikami numerycznymi oraz analizy wpływu wybranych parametrów fizycznych na optymalną sprawność omawianych kolektorów słonecznych, wymagały inwencji oraz sporego nakładu pracy i stanowią oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta. Przesądza to, w mojej ocenie, o oryginalności pracy i

istotnym wkładzie w rozwój techniki obliczeniowej. Z punktu widzenia inżynierii, w ramach tworzenia opisów procesów złożonej wymiany ciepła, dla skomplikowanych geometrii o zróżnicowanych właściwościach fizycznych, świadczy o użytecznym aspekcie niniejszej pracy. Uzyskany materiał badawczy pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały w pełni zrealizowane.

IV. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi o charakterze merytorycznym

W rozprawie zaprezentowano oryginalne oraz kompleksowe ujęcie zagadnienia. Zaprezentowany przez Doktoranta materiał, dotyczący zastosowania metody sieci cieplnych i układów zastępczych rezystancji cieplnych do stworzenia oryginalnych modeli matematycznych kolektorów słonecznych ETC, ETCO i KDD, przeprowadzenie zarówno badań doświadczalnych na autorskim stanowisku badawczym, jak i licznych analiz numerycznych wpływu wybranych parametrów fizycznych na optymalną sprawność omawianych kolektorów słonecznych, jest główną osią dorobku naukowego Autora. Umiejętność zintegrowania złożonych modeli matematycznych, badań doświadczalnych, analiz numerycznych, jak i prac konstrukcyjnych jest jego szczególnym osiągnięciem. Pewne fragmenty pracy wykonanej przez Doktoranta wymagają skomentowania. Poniższe uwagi nie umniejszają mojej pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej.

Uwagi ogólne:

1. W rozdziale 3 Dyplomant opisuje koncepcję kolektora słonecznego dwustronnego działania KDD. Wskazuje, iż omawiany kolektor słoneczny umożliwia stosowne ustawienie absorbera profilowanego w zależności od przewagi bezpośredniego (tryb pracy KDD-PTC) lub dyfuzyjnego promieniowania słonecznego (tryb pracy – KDD-ETC). Rysunek 3.5 przedstawiający oba tryby pracy kolektora KDD oraz dalszy opis obu trybów pracy nie wskazują jednak, w jaki sposób kolektor jest obracany do pozycji, pozwalającej wykorzystać docierające do jego powierzchni promieniowanie bezpośrednie czy dyfuzyjne. Proszę o wskazanie, w jaki sposób mierzy się promieniowanie dyfuzyjne i jaki poziom promieniowania decyduje o zmianie trybu pracy.
2. Na stronie 70 w punkcie 5.2 Doktorant opisuje założenia konstrukcyjne próżniowego kolektora rurowego z filmem olejowym ETCO. Wskazano, iż różnica konstrukcyjna pomiędzy kolektorem słonecznym ETCO, a kolektorem ETC manifestuje się w postaci dodatkowej rury – tzw. rury zewnętrznej, wewnątrz której znajduje się rura medium roboczego. Podano, iż przestrzeń między wspomnianymi rurami wypełniona jest medium pośredniczącym w wymianie ciepła – smarem na bazie oleju syntetycznego. Proszę opisać, w jaki sposób wspomniana przestrzeń została wypełniona omawianym medium i wskazać jego zakres lepkości, w zależności od temperatury pracy skonstruowanego kolektora. Dyplomant wskazuje, iż *„podstawowa różnica pomiędzy modelem kolektora ETCO a modelem kolektora ETC wynika z istnienia dodatkowych oporów przekazywania ciepła od płyty absorbera do przepływającego medium roboczego i tym samym wpływa ona na postać wyrażenia na współczynnik efektywności absorbera F' kolektora ETCO....* brak jednak jakichkolwiek informacji na temat właściwości fizycznych zastosowanego

- medium. Proszę wskazać, jak dobór użytego smaru mógł wpłynąć na wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ_{oil} , wymienionego w równaniu 5.55.
3. Na początku rozdziału 6 Dyplomant opisuje obiekt badań eksperymentalnych, czyli stanowisko badawcze prototypowych kolektorów słonecznych: ETC (próżniowy kolektor rurowy), ETCO (próżniowy kolektor rurowy z filmem olejowym) oraz kolektor słoneczny dwustronnego działania KDD. Opis badanego stanowiska hydraulicznego jest szczegółowy, wzbogacony o zdjęcie oraz schematy ideowe kolektora słonecznego dwustronnego działania KDD. Na przedstawionych schematach nie ma jednak wyraźnie wyodrębnionych trzech omawianych kolektorów. Ponadto, na schemacie przedstawiającym układ hydrauliczny omawianego stanowiska doświadczalnego wraz z elementami grzejnymi i elementami systemu monitoringu pracy instalacji, nie wskazano nazewnictwa poszczególnych elementów hydraulicznych. Brak także informacji na temat usytuowania pyranometru, służącego do pomiaru natężenia promieniowania słonecznego względem najbliższego kolektora oraz wpływu zacienienia projektowanego przez omawiany czujnik na prace wspomnianego kolektora.
 4. Na stronie 106 Dyplomant pisze: *...Kolektory słoneczne, w ilości sztuk 3, zbudowane zostały przy użyciu rur szklanych o średnicy zewnętrznej 100 mm...* proszę wskazać rodzaj użytego szkła i wyjaśnić jak jego dobór mógł wpłynąć na sprawność optyczną zaprojektowanych kolektorów słonecznych.
 5. W sposób szczegółowy Autor opisuje metodykę przeprowadzonych badań, aparaturę pomiarową, w tym system monitoringu. Brak natomiast informacji o sposobie zbierania danych. Wskazano jedynie model rejestratora KD7. Proszę podać więcej informacji na temat systemu akwizycji danych oraz czas próbkowania użyty podczas badań eksperymentalnych, mający wpływ na rozdzielczość zmierzonych danych, a co za tym idzie, jakoś walidacji zaproponowanych modeli matematycznych.
 6. Na stronie 108 w punkcie 4 przedstawionych założeń procedury przeprowadzania badań eksperymentalnych podano, iż natężenie promieniowania słonecznego mierzone jest za pomocą pyranometru w płaszczyźnie kolektorów słonecznych. Proszę wskazać model, producenta oraz dokładność użytego pyranometru. Dodatkowo Doktorant wskazuje, iż *...Badania eksperymentalne powinny odbywać się przy natężeniu promieniowania nie mniejszym niż 800 W/m^2 ...* Proszę sprecyzować o jakim rodzaju promieniowania mowa i wskazać liczbę godzin/dni eksperymentalnych spełniających powyższe warunki, które finalnie zostały wykorzystane do walidacji modeli matematycznych omawianych kolektorów słonecznych.
 7. Głównym celem omawianej dysertacji było zaprojektowanie i wykonanie kolektora słonecznego dwustronnego działania, umożliwiającego dwa tryby pracy urządzenia, tj. podczas przewagi promieniowania bezpośredniego oraz podczas przewagi promieniowania dyfuzyjnego. Proszę o opis, w jaki sposób podczas przeprowadzonych badań mierzone było promieniowanie dyfuzyjne.
 8. Proszę wyjaśnić w jakim środowisku programistycznym lub przy użyciu jakich narzędzi zostały rozwinięte procedury obliczeniowe, niezbędne do stworzenia modeli matematycznych, zaprojektowanych i skonstruowanych kolektorów słonecznych ETC, ETCO oraz KDD, dodatkowo pracującego w dwóch trybach: KDD-PTC oraz KDD-ETC, dla których przedstawiono dwa dodatkowe modele matematyczne. Doktorant wskazuje, iż implementacja przedstawionych modeli wymagała wprowadzenia około 150 (w przypadku modelu kolektora ETC) czy 430 (w przypadku kolektora KDD-PTC) niepowtarzających się równań, które następnie rozwiązywane były metodą iteracyjną, aż do momentu uzyskania zbieżności kolejnych wyników obliczeń: $\varepsilon < 0,001$. Proszę

wskazać jak długo trwało rozwiązywanie wyżej wymienionych modeli matematycznych i czy można byłoby ten czas skrócić, biorąc pod uwagę wcześniej przytoczoną liczbę równań.

9. W celu oceny jakości zaproponowanych modeli matematycznych dla każdego z kolektorów: ETC, ETCO, KDD-PTC i KDD-ETC proszę porównać błędy RMSE (Root Mean Square Error) oraz MBE (Mean Bias Error), przedstawiające porównanie wyników badań eksperymentalnych z wynikami modeli matematycznych.
10. Na ostatniej stronie omawianej dysertacji, Dyplomant prezentuje podsumowanie publikacji swojego dorobku naukowego, jakie m. in. ukazały się w renomowanych czasopismach z listy filadelfijskiej - (3 publikacje), na recenzowanych konferencjach - (17 artykułów) oraz 6 rozdziałów w monografiach i 8 rozdziałów w książkach, ogółem 44 publikacje o sumarycznym Impact Factor 8,2. Proszę o wskazanie pełnej listy publikacji uwzględnionych w niniejszej tabeli.

Uwagi drobniejsze:

1. Brak jest streszczenia w języku polskim oraz w języku angielskim. Przydatny byłby także wykaz tabel i rysunków.
2. Rysunki 8.9, 8.10, 8.31, 8.32, 8.33, 8.34: proszę rozważyć zmianę skali osi y, tak aby przedstawione porównania były bardziej czytelne, a profile przedstawionych parametrów mogły zostać bardziej zauważalne przy zwiększonej skali.

V. Uwagi końcowe

Praca napisana jest bardzo starannie i w sposób zrozumiały, opracowana z dużą starannością graficzną. Materiał pochodzący z modelowania numerycznego jak i z badań eksperymentalnych zawiera dużo szczegółowych informacji. Podane wcześniej uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być traktowane raczej jako pomoc w zakresie wykorzystania uzyskanego materiału w dalszej pracy. Uwagi te nie pomniejszają jednak wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

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

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest ciekawą i wartościową pracą naukową. Autor wykazał się umiejętnością przedstawienia wybranych zagadnień energetyki słonecznej, zdefiniowania problemu badawczego a następnie rozwiązywania go. Zastosowane przez niego podejście do pracy naukowo-badawczej uważam za właściwe. Praca stanowi w pełni oryginalny wkład do badań w zakresie modelowania zjawisk wymiany ciepła w kolektorach słonecznych, przy zastosowaniu metody sieci cieplnych i układów zastępczych rezystancji cieplnych. Zakres prac Doktoranta obejmuje zarówno modelowanie, prace konstrukcyjne i eksperymentalne, jak i liczne analizy numeryczne, co pozwala na stwierdzenie, że opanował on dość szeroki zakres umiejętności badawczych. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej opinie, uwzględniające

wybór tematu rozprawy, sposób jego analizowania, osiągnięte wyniki i zastosowane metody badawcze oraz ilość publikacji w renomowanych czasopismach z listy filadelfijskiej, stwierdzam, że Pan mgr inż. Paweł Pacyga wykazał, że jest naukowcem dojrzałym, potrafiącym w swojej pracy wykorzystywać, formułować i rozwiązywać problemy badawcze, umiejącym wyciągać wnioski z otrzymanych wyników. Stwierdzam także, że posiadana wiedza oraz umiejętności pozwalają Doktorantowi na prowadzenie badań w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka (dawniej: energetyka), dlatego też spełnia warunki do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych.

Wnoszę, zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14. 03. 2003 r., o dopuszczenie Pana mgr inż. Pawła Pacygi do obrony pracy i nadanie stopnia doktora nauk technicznych.



Dr hab. inż. Sabina Rosiek-Pawłowska, prof. Uczelni

