

Warszawa 13.08.2022

Prof. dr hab. inż. **Dorota Chwieduk**

Politechnika Warszawska  
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa  
Instytut Techniki Ciepłej  
00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 21/25

PK/WM/BW/8/88/2022  
22. 08. 2022

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej

**„Badanie wpływu wybranych parametrów geometrycznych i materiałowych na intensyfikację konwekcyjnej wymiany ciepła w pasywnym powietrznym kolektorze słonecznym”**

Pana mgr inż. Jacka Jana Fiuka

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę formalną opracowania niniejszej recenzji stanowi pismo Pani dr hab. Danuty Zawadzkiej prof. PK, Rektora Politechniki Koszalińskiej z dnia 01.06.2022 r. z informacją o powołaniu mnie, zgodnie z Uchwałą Senatu Politechniki Koszalińskiej podjętą w dniu 25 maja 2022 r., na recenzenta rozprawy doktorskiej p.t. „*Badanie wpływu wybranych parametrów geometrycznych i materiałowych na intensyfikację konwekcyjnej wymiany ciepła w pasywnym powietrznym kolektorze słonecznym*” pana mgr inż. Jacka Jana Fiuka.

Merytoryczną ocenę dokonałam na podstawie treści przedłożonej rozprawy.

### 2. Charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

#### 2.1. Opisane treści rozprawy

Rozprawa doktorska „*Badanie wpływu wybranych parametrów geometrycznych i materiałowych na intensyfikację konwekcyjnej wymiany ciepła w pasywnym powietrznym kolektorze słonecznym*” pana mgr inż. Jacka Jana Fiuka została wykonana pod promotorstwem dr hab. inż. Krzysztofa Dutkowskiego, prof. PK i dr hab. inż. Małgorzaty Sikory, prof. PK, jako promotora pomocniczego.

Rozprawa składa się z ośmiu głównych numerowanych rozdziałów, wykazu tabel i rysunków, bibliografii i pięciu załączników (oznaczonych od A do E). Stanowi ją 297 stron. W pierwszej części rozprawa zawiera także „Streszczenie”, „Abstract” (w języku angielskim), „Dedykację”, „Podziękowania”, „Spis treści” i „Listę symboli”. Pierwszym numerowanym rozdziałem jest krótkie „Wprowadzenie” (4 strony). Rozdział 2 stanowi „Przegląd literatury” (57 stron). W rozdziale 3 „Hipotezy badawcze” dyplomant na podstawie przeprowadzonego obszernego przeglądu literatury sformułował trzy główne hipotezy badawcze (1 strona). W rozdziale 4 „Cel pracy” (2 strony) sformułował główny cel badań. Rozdział 5 „Objekt badań” zawiera opisy obiektów badań eksperymentalnych i komputerowych (12 stron). Rozdział 6 „Badania eksperymentalne” przedstawia w sposób szczegółowy pokrótce zasygnalizowany wcześniej obiekt badań, a następnie opisuje stanowisko badawcze, zakres badań eksperymentalnych i mierzone wielkości. Autor opisuje metodę wyznaczania podstawowych parametrów i charakterystyki pracy powietrznego kolektora słonecznego,

a także wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych (cały rozdział liczy 44 strony). Kolejny rozdział 7 „Badania numeryczne” przedstawia przedmiot rozważań, zastosowane metody opisu numerycznego analizowanych zjawisk fizycznych odpowiednio zamodelowanych matematycznie, a także wyniki symulacji numerycznych funkcjonowania różnych wariantów (geometrycznych i materiałowych) słonecznych kolektorów powietrznych w różnych warunkach działania (łącznie 96 stron). Ostatni numerowany rozdział „Podsumowanie” (liczy 3 strony) i zawiera wnioski końcowe, opis możliwości aplikacji wyników i kierunków dalszych badań. „Spis tablic” zestawia tytuły 19 tabel zawartych w głównej części pracy i 2 tabel w załącznikach. „Spis rysunków” odnosi się łącznie do 189 rysunków. W rozdziałach 1-2 znajduje się 53 rysunków, z czego 41 rysunków zostało zaczerpniętych z literatury. Bibliografia liczy 386 cytowanych pozycji literaturowych. Dodatek A zawiera zestawienia tabelaryczne wybranych modyfikacji powietrznych kolektorów słonecznych. Dodatek B przedstawia świadectwo wystawione dla szkła Press Glass, jako szkła słonecznego (Solar Glass) do zastosowań w fotowoltaice. Dodatek C dotyczy analizy niepewności pomiarowej przeprowadzonych badań eksperymentalnych wybranych parametrów pracy kolektora powietrznego. Z kolei Dodatek D zawiera stabelaryzowane dane emisyjności różnych materiałów. Ostatni Dodatek E zawiera charakterystykę widmową lamp halogenkowych zastosowanych do badań eksperymentalnych.

Tytuł rozprawy odzwierciedla analizowany problem badawczy. Istotne dla czytelności i jakości pracy są liczne rysunki, szczególnie te autorstwa Kandydata, które zamieścił w dwóch głównych rozdziałach merytorycznych pracy: 6 i 7, opisujących przedmiot i metodykę badań oraz uzyskane wyniki i ich analizę. Język rozprawy jest zgodny z poziomem wymaganym w publikacjach naukowych, chociaż w kilku miejscach występują pewne błędy związane z nazewnictwem.

Rozprawa doktorska jest napisana na wysokim poziomie i obrazuje ogrom pracy badawczej: przeglądowej, eksperymentalnej i symulacyjnej numerycznej włożonej w jej przygotowanie przez Kandydata. Przedstawienie przeprowadzonych badań, analiza uzyskanych wyników i sformułowane wnioski o charakterze podstawowym i aplikacyjnym stanowią istotną wartość pracy. Kandydat przeprowadza rozważania teoretyczne o charakterze podstawowym, identyfikuje obszary badawcze jeszcze zbyt mało rozpoznane, i na tej podstawie określa cel i zakres własnych badań, zarówno eksperymentalnych, jak i analiz numerycznych do prowadzenia badań symulacyjnych funkcjonowania wybranych wariantów powietrznego kolektora słonecznego. Problematyka badawcza koncentruje się na zagadnieniach cieplno – przepływowych w powietrznych kolektorach słonecznych występujących w czasie ich funkcjonowania w sposób pasywny. W szczególności Kandydat analizuje zjawiska konwekcji swobodnej i promieniowania cieplnego, występujące w obszarach szczelin/kanałów powietrznych wspomnianych kolektorów słonecznych.

Układ treści jest przejrzysty i uporządkowany. Kolejne rozdziały w sposób sukcesywny odnoszą się do kolejnych etapów pracy badawczej. Rozdziały są odpowiednio ze sobą połączone i tworzą logiczną całość.

W pierwszym rozdziale „Wprowadzenie” Autor pokrótce przedstawia klasyfikację kolektorów słonecznych i rozważa w szczególności kolektory powietrzne. Rozdział ten zawiera krótki rys historyczny rozwoju i zastosowań technologii powietrznych kolektorów słonecznych.

Rozdział drugi „Przegląd literatury” jest bardzo obszernym rozdziałem dotyczącym kolektorów słonecznych powietrznych, w tym głównie zjawisk cieplnych w nich zachodzących w sposób naturalny pasywny, bez wymuszania przepływu powietrza. Autor

koncentruje się na zagadnieniach konwekcji w przestrzeniach ograniczonych: szczelinach i kanałach kolektorów, w tym na ich rozwiązaniach geometrycznych, oraz na możliwościach intensyfikacji wymiany ciepła, ograniczeniu strat ciepła i poprawie sprawności cieplnej kolektorów. Przeprowadzony przegląd odnosi się zarówno do prowadzonych na świecie badań eksperymentalnych, jak i symulacji komputerowych. Jak zauważa Autor, niewiele prac badawczych odnosi się do zagadnień samej konwekcji swobodnej i wykorzystania tzw. „efektu kominowego” w różnych strukturach geometrycznych powietrznych kolektorów słonecznych. Na podstawie dokonanego przeglądu rozważa zjawiska konwekcji swobodnej w pionowych kanałach i pochylonych, uwzględniając stosowane i proponowane modyfikacje geometrii kanałów powietrznych. Kandydat wyodrębnia mniej rozpoznane obszary badań w odniesieniu do geometrii kolektorów powietrznych wykorzystujących zjawisko konwekcji swobodnej, w tym wpływ szerokości przestrzeni częściowo ograniczonej powierzchniami równoległymi na intensywność wymiany ciepła i masowe natężenie przepływu powietrza, a także wpływ innych parametrów geometrycznych na te zjawiska. Zauważa także niedocenianie wymiany ciepła przez promieniowanie cieplne przy opisie wymiany ciepła w kolektorach powietrznych w analizach symulacji komputerowych.

W rozdziale 3 „Hipotezy badawcze” na podstawie wniosków uzyskanych z przeglądu literatury Kandydat sformułował trzy główne hipotezy badawcze dotyczące wpływu wybranych parametrów geometrycznych powietrznego pasywnego kolektora słonecznego na intensyfikację konwekcyjnej wymiany ciepła w nim zachodzącej, co ma służyć zwiększeniu intensywności wymiany ciepła, a w konsekwencji sprawności cieplnej kolektora.

W rozdziale 4 „Cel pracy” Kandydat sformułował główny cel badań, którym jest poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych, w tym geometrycznych, powietrznego pasywnego kolektora słonecznego służących do poprawy wymiany ciepła i sprawności cieplnej kolektora.

Rozdział 5 „Obiekt badań” zawiera krótkie opisy obiektów badań eksperymentalnych i komputerowych oraz zaplanowane działania badawcze umożliwiające realizację postawionego celu.

W rozdziale 6 „Badania eksperymentalne” Dyplomant opisuje badania eksperymentalne trzech prototypowych konstrukcji kolektora powietrznego przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych. Przedstawia opisy konstrukcyjne kolektorów i samego stanowiska badawczego, zastosowane metody pomiarowe i uzyskane wyniki. W czasie badań Dyplomant koncentruje się na wyznaczeniu parametrów pracy kolektora, jego mocy użytecznej, sprawności cieplnej, współczynników równania charakterystyki cieplnej. Określa wpływ wybranych czynników materiałowych i geometrycznych oraz usytuowania badanych kolektorów słonecznych na ich funkcjonowanie i uzyski ciepłne. Otrzymane wyniki podsumowuje wnioskami ilościowymi.

Rozdział 7 „Badania numeryczne” jest zdecydowanie najbardziej obszerny, a jednocześnie najbardziej istotny dla wartości naukowych pracy. Doktorant opisuje przeprowadzone badania symulacji numerycznych funkcjonowania pasywnych powietrznych kolektorów słonecznych o wybranych wariantach geometrycznych i materiałowych. Do analiz symulacyjnych wykorzystuje metody obliczeniowe mechaniki płynów (CFD). Celem przeprowadzonych obliczeń i analiz było określenie, które z przyjętych struktur geometrycznych i materiałowych zapewniają uzyskanie najwyższej sprawności cieplnej i uzysków energetycznych dzięki zapewnieniu odpowiedniej intensyfikacji zjawisk konwekcji swobodnej w przestrzeniach wewnętrznych kolektora, przy zachowaniu niezmiennych wymiarów zewnętrznych kolektora. Doktorant w sposób szczegółowy opisuje matematyczne modele geometryczne (dwu i trójwymiarowe) struktur wewnętrznych

kolektorów poddanych symulacjom numerycznym. Rozważa różne szerokości i głębokości kanałów przepływowych oraz różne kształty (płaskie, faliste). Opisuje przyjętą metodę dyskretyzacji przestrzeni i siatki obliczeniowe. Rozważane przypadki struktur kolektorów są bogato ilustrowane. Przyjęte do rozważań warunki brzegowe zostały zapisane matematycznie odpowiednimi równaniami, przedstawione graficznie na przekrojach rozważanych wariantów struktur kolektorów, a także w sposób skompensowany zestawione w sposób tabelaryczny. Punkt 7.5 rozdziału przedstawia w sposób szczegółowy model matematyczny rozważanych zjawisk cieplno- przepływowych zachodzących w strukturze kolektorów powietrznych. Autor bardzo krótko wspominał o modelu oddziaływania promieniowania słonecznego (który nazwał modelem obciążenia słonecznego), ale nie opisał go matematycznie. Ponad połowę rozdziału 7 stanowi opis wyników badań numerycznych obszernie graficznie zilustrowanych. Na zakończenie Autor sformułował 13 wniosków z przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych.

W rozdziale „Podsumowanie” Autor sformułował wnioski końcowe zarówno z badań eksperymentalnych, jak i symulacji numerycznych. Ostatni wniosek (nr 5) jest potwierdzeniem postawionych na początku rozprawy hipotez badawczych. W rozdziale tym, skrótowo przedstawił możliwości aplikacji uzyskanych wyników i kierunki dalszych badań.

## 2.2. Ocena merytoryczna

Praca ma charakter badań podstawowych, symulacji numerycznych i badań eksperymentalnych rozwiązania postawionego problemu badawczego i udokumentowania prawdziwości postawionych hipotez. **Efektom przeprowadzonych prac jest zarówno wkład w rozwój badań naukowych podstawowych z zakresu wymiany ciepła na drodze konwekcji swobodnej w przestrzeniach powietrznych kolektorów słonecznych, jak i w rozwój prac aplikacyjnych służących poprawie sprawności cieplnej i zwiększeniu zysków energetycznych tych kolektorów, dzięki zaproponowaniu nowych rozwiązań materiałowych i modyfikacji geometrii struktur wewnętrznych pasywnych powietrznych kolektorów słonecznych.**

Rozprawa dotyczy bardzo istotnego zagadnienia nie tylko badawczo – naukowego, ale i aplikacyjnego, a mianowicie zagadnień wymiany ciepła zachodzących w powietrznych kolektorach słonecznych, które obecnie są coraz częściej stosowane w wielu sektorach gospodarki w szczególności w budownictwie i służą ograniczeniu energochłonności budynków.

We „Wprowadzeniu” Autor przedstawił podstawowe rodzaje kolektorów słonecznych, a w szczególności opisał kolektory powietrzne. Drugi akapit stanowi definicję kolektora słonecznego, jako wymiennika ciepła. Jednakże, opis ten jest mało przejrzysty, a jest on dość istotny przy analizie energetycznej przedmiotu badań. Proszę więc o:

1. podanie właściwej definicji cieplnego kolektora słonecznego i wyjaśnienie dlaczego jest on wymiennikiem ciepła.

We wprowadzeniu zabrakło chociażby krótkiej wzmianki o słonecznych systemach pasywnych stosowanych w budownictwie i systemach słonecznych zintegrowanych z obudową budynku. Systemy słoneczne pasywne w postaci ściany Tromba, Tromba-Mitchella, ściany kolektorowej należą do rozwiązań powietrznych kolektorów słonecznych, w których zagadnienia konwekcji swobodnej stanowią podstawę fizyczną ich działania.

Rozdział drugi przedstawia przeprowadzony przez Dyplomanta przegląd literatury obrazujący obecny stan wiedzy w zakresie konstrukcji, podstaw działania, stosowanych metod badawczych; eksperymentalnych i symulacyjnych, oraz poprawy sprawności cieplnej

powietrznych kolektorów słonecznych. Rozdział ten jest istotną częścią rozprawy wskazującą na innowacyjność prac badawczych prowadzonych przez doktoranta. Przeprowadzony przegląd odzwierciedla bardzo dobre rozeznanie dyplomanta w rozważanej tematyce, w szczególności w zagadnieniach cieplnych powietrznych kolektorów słonecznych. Jednakże, występują pewne niejasne lub nieprecyzyjne sformułowania. Proszę o zwrócenie uwagi na pojawiające się czasem w pracy, a napisane na przykład na str. 24 w pierwszym akapicie rozdziału 2.2.2. , następujące sformułowanie:

2. „ ... poprzez wzrost strumienia ciepła promieniowania słonecznego docierającego do absorbera. ”,

lub też zapis w dalszej części tego akapitu:

„ ... skupiając promieniowanie słoneczne .... możliwe jest nawet czterokrotne zwiększenie gęstości strumienia ciepła.”

Otóż promieniowanie słoneczne, to nie strumień ciepła, ale strumień energii przenoszony przez fale elektromagnetyczne (fotony) o małych długościach fali – promieniowanie krótkofalowe z zakresu: ultrafioletu, promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni. Zachowanie tego promieniowania w ośrodkach przezroczystych podlega prawom optyki. Gdy promieniowanie słoneczne ulegnie pochłonięciu dopiero wtedy można rozważać zagadnienia transportu ciepła.

Hipotezy badawcze zostały sformułowane względnie precyzyjnie w rozdziale 3 i w trakcie badań opisanych w kolejnych rozdziałach Autor stara się je sukcesywnie udowadniać. Co prawda wyrażenie:

3. „ ... wymaga innej jego grubości” zawarte w hipotezie 2 jest mało czytelne i powinno być inaczej sformułowane.

W rozdziale 4 formułując główny cel pracy Autor zwrócił uwagę na konieczność prowadzenia badań, efektem których byłoby znalezienie takich rozwiązań konstrukcyjnych przestrzeni wewnątrz kolektora słonecznego, przy których nastąpiłaby intensyfikacja wymiany ciepła, ale jednocześnie konwekcja swobodna odpowiedzialna za efektywną pracę kolektora nie byłaby zbyt osłabiona. Takie postawienie problemu badawczego do rozwiązania wskazuje na duże rozeznanie Autora w przedmiocie pracy i wolę podejmowania istotnych wyzwania naukowych zarówno o charakterze podstawowym, jak i aplikacyjnym.

W rozdziale 5 Autor pokrótce opisał i przedstawił graficznie obiekty badań eksperymentalnych i komputerowych, parametry wejściowe, wyjściowe i stan termodynamiczny otoczenia. Po raz kolejny natężenie promieniowania, które powinno odnosić się do promieniowania słonecznego zapisano jako promieniowanie cieplne (np.3.1).

4. Należy wyjaśnić dlaczego promieniowanie słoneczne jest nazywane w pracy promieniowaniem cieplnym? Chyba, że w tym punkcie Autor rozważa oddziaływanie promieniowania cieplnego, a nie krótkofalowego promieniowania słonecznego.

W rozdziale 6 Kandydat opisał szczegółowo przeprowadzone przez siebie badania eksperymentalne funkcjonowania czterech różnych typów kolektorów powietrznych w warunkach konwekcji swobodnej, z których trzy reprezentują zmodyfikowane geometrycznie kształty kolektora, w szczególności geometrii absorberów słonecznych. Autor pisze, że uzyskane wyniki badań eksperymentalnych umożliwiły opracowanie autorskiej zależności do obliczania współczynnika efektywności cieplnej kolektora, co jest niewątpliwie jednym z osiągnięć badawczych pracy. Zastosowane metody pomiarowe zostały odpowiednio opisane. Na uwagę zasługuje szeroki zakres badań i duża liczba mierzonych parametrów pracy kolektorów, w tym temperatur powietrza i powierzchni stałych kolektora, prędkości

powietrza, natężenia promieniowania. Mierzone wielkości służą m.in. do wyznaczenia charakterystyk ciepłych powietrznych kolektorów słonecznych, w tym ich sprawności cieplnych, które w odpowiedni sposób Autor formułuje i opisuje matematycznie.

Czytając rozdział 6 nasuwa się szereg pytań, które wymagają odpowiedzi.

5. Jak Autor definiuje efektywność cieplną kolektora (takie sformułowanie po raz pierwszy pojawia się na stronie 76? Czym różni się ona od sprawności cieplnej? A także czym różni się od wydajności cieplnej, takie sformułowanie pojawia się również kilkakrotnie w pracy, np. na str. 101 (na początku ostatniego akapitu).

Inne pytania dotyczą zastosowanych materiałów elementów składowych kolektora, które nie zostały opisane szczegółowo w tekście pracy, a są istotne do analizy zjawisk zachodzących w kolektorze. Praktycznie opis fizyczny kolektorów nie uwzględnia ich parametrów optycznych. I tak:

6. Absorber pokryty jest czarną matową farbą, jaka jest absorpcyjność dla promieniowania słonecznego, a jaka emisyjność dla promieniowania ciepłego powierzchni absorbera?
7. Zastosowano trzy rodzaje przeszkleń kolektora, jaka jest ich grubość oraz parametry optyczne, w tym: transmisyjność i absorpcyjność dla promieniowania słonecznego? Same nazwy przeszkleń wskazują wyraźnie, że ich parametry optyczne różnią się i to bardzo istotnie, a to ma wpływ na dostępność promieniowania słonecznego dla samej płyty absorbera, a więc na uzyski energetyczne (moc cieplną) i sprawność cieplną kolektorów.
8. W Tabeli 6.2 zestawione są jedynie parametry szkła słonecznego (Solar Glass), wymagają one przetłumaczenia na język polski i podania definicji poszczególnych pojęć, w szczególności:
  - *Transmission factor*,
  - *Photodegradation factor*,
  - *Degradation factor*,
  - *Glass efficiency value*,
  - *IAM Weighting Factor*.

Kolejne pytania dotyczą samego stanowiska badawczego, a w szczególności źródła promieniowania, które składa się jedynie z lamp halogenkowych. Zgodnie z zamieszczonym opisem i charakterystyką widmową lamp (Dodatek E) emitują one promieniowanie jedynie w zakresie podczerwieni, począwszy od 700  $\mu\text{m}$ . Oznacza to, że nie zastosowano źródła promieniowania obejmującego cały zakres promieniowania słonecznego, a mianowicie nie uwzględniono promieniowania ultrafioletowego i widzialnego, dla których ośrodki przezroczyste są praktycznie całkowicie przezroczyste, jak mówi sama nazwa (np. powietrze, szkło), odwrotnie niż w przypadku promieniowania ciepłego długofalowego.

9. Dlaczego zastosowano tylko źródło promieniowania podczerwonego?

W punkcie 6.3.3 Autor pisze o pomiarze natężenia promieniowania, w tym promieniowania widzialnego, a także o pomiarze promieniowania pochodzącego od lamp „jak i promieniowania rozproszonego”. Opis jest mało przejrzysty. Nasuwa się pytanie:

10. W jaki sposób symulowano promieniowanie widzialne i co w opisie oznacza: promieniowanie rozproszone?

Z kolei w punkcie 6.5 Autor opisuje wyznaczanie współczynników równania liniowego charakterystyki cieplnej kolektora. Kolejne pytanie jest następujące:

11. Co oznaczają fizycznie współczynniki opisane równaniem (6.14) i (6.15)?

W punkcie 6.6.4 przy rozważaniach dotyczących wpływu rodzaju przeszkleń na sprawność cieplną kolektorów wyraźnie brakuje informacji odnośnie do parametrów optycznych przeszkleń i rozważań dotyczących optyki zjawisk przy przejściu promieniowania słonecznego przez ośrodki przezroczyste, stąd też trudno zrozumieć interpretację otrzymanych wyników.

W dalszej części pracy w punkcie 6.6.5 Doktorant przedstawia wyniki badania wpływu pozycji kolektora względem podłoża (odchylenie od pionu) na jego sprawność. Niektórych rezultatów nie komentuje. Również w punkcie 6.6.6 Doktorant bada zmiany sprawności i zysków energetycznych, ale w tym przypadku przy obrocie kolektora wokół własnej pionowej osi. Także w tym przypadku nie wszystkie wyniki zostały skomentowane. Należy odpowiedzieć więc na następujące pytania:

12. Dlaczego wraz z odchyleniem pozycji kolektora od pionu maleje moc i sprawność cieplna kolektora?
13. Dlaczego wraz z obrotem kolektora wokół własnej pionowej osi maleje moc i sprawność cieplna kolektora?
14. Proszę skomentować wyniki badań przedstawione na rys. 6.38.
15. Do jakich rzeczywistych zjawisk fizycznych można odnieść przeprowadzone eksperymenty i opisane w punktach 6.6.5 i 6.6.6?

W kolejnym punkcie rozdziału 6.6.7 Dyplomant opisuje wyniki badań wpływu kształtu absorbera na sprawność kolektora.

16. Wyniki przedstawione na rys. 6.44 i w tabeli 6.5 wymagają uzasadnienia.

**Rozdział 7 przedstawiający przeprowadzone przez doktoranta badania numeryczne symulujące różne warianty strukturalne powietrznych pasywnych kolektorów powietrznych jest bardzo istotny dla wartości naukowych pracy. Doktorant wykazał się dużą wiedzą w zakresie modelowania matematycznego zjawisk cieplnych i przepływowych oraz prowadzeniu badań symulacji numerycznych funkcjonowania urządzeń cieplnych, jakimi są powietrzne kolektory słonecznych, przy zastosowaniu metod obliczeniowych mechaniki płynów (CFD). Wszystkie rozważane przypadki struktur powietrznych kolektorów słonecznych są odpowiednio graficznie zilustrowane, co powoduje że opis numeryczny geometrii rozważanych obiektów i ich zachowanie się pod wpływem zachodzących zjawisk cieplnych i przepływowych są bardzo czytelne i przejrzyste. Doktorant precyzyjnie formułuje warunki brzegowe, a następnie główne równania opisujące matematycznie istotę fizyczną zachodzących zjawisk. Na uwagę zasługuje zdolność właściwego dopasowania złożoności modeli matematycznych do charakteru opisywanych zjawisk fizycznych zachodzących w mniej lub bardziej rozbudowanych strukturach kolektorów powietrznych. W rozdziale jest natomiast niewiele informacji o modelowaniu oddziaływania promieniowania słonecznego.**

17. Proszę wyjaśnić w jaki sposób jest modelowany strumień energii promieniowania słonecznego docierający do zewnętrznych powierzchni kolektora, w tym do przezroczystej osłony, w jaki sposób strumień tego promieniowania pochłaniany w absorberze?

W Tabelach 7.9 – 7.12 zestawiono warunki brzegowe dla różnych modeli struktur kolektora powietrznego. Pojawia się w nich (7.9 – 7.12 ) pojęcie „współczynnika emisyjności”, a także współczynnika absorpcyjności spektralnej (7.11. – 7.12) oraz współczynnika transmisyjności spektralnej (7.12). Nasuwają się pewne wątpliwości, które wyszczególniono poniżej:

18. Czy zamieszczone w Tabelach 7.9 – 7.12 symbole  $\epsilon$  oznaczają rzeczywiście

„współczynniki emisyjności” czy emisyjność i do jakich długości fali się one odnoszą?

19. Czy zamieszczone w Tabelach 7.11 – 7.12 symbole  $\alpha$  oznaczają rzeczywiście „współczynniki absorpcyjności” czy absorpcyjność i do jakich długości fali się one odnoszą w przypadku „współczynnika absorpcyjności spektralnej podczerwieni” – bliskiej czy dalekiej?
20. Czy zamieszczone w Tabeli 7.12 symbole  $\tau$  oznaczają rzeczywiście „współczynniki transmisyjności” czy transmisyjność i do jakich długości fali się one odnoszą w przypadku „współczynnika transmisyjności spektralnej podczerwieni” - bliskiej czy dalekiej?
21. Powierzchnie absorberów kolektorów słonecznych pokrywane są zwykle pokryciami o tzw. wysokiej selektywności. Jak jest w tym przypadku?

W modelowaniu zjawisk cieplnych w szczelinie uwzględniono wymianę przez promieniowanie cieplne, co stanowi dodatkowe skomplikowanie rozważanych i modelowanych matematycznie zjawisk. Punkt 7.5.7 pokrótce przedstawia model transferu ciepła przez promieniowanie, nie do końca jest jednak jasne jakie promieniowanie Autor opisuje, chociażby na rys. 7.27.

22. Proszę wyjaśnić jakiego promieniowania dotyczy wspomniany punkt 7.5.7 i rys.7.27 i jak wygląda model matematyczny oddziaływania promieniowania słonecznego na osłonę przezroczystą, przestrzeń powietrzną i absorber?

Można zauważyć, że opisane wcześniej badania eksperymentalne nie we wszystkich przypadkach są spójne z przeprowadzonymi analizami i symulacjami numerycznymi zamieszczonymi w rozdziale 7, a niektóre z otrzymanych wyników trudno jest wręcz porównywać, np. otrzymane eksperymentalnie i numerycznie wartości współczynników charakterystyki cieplnej (sprawności) kolektorów, co przedstawia np. Tabela 7.13.

23. Proszę wyjaśnić różnice w wartościach wspomnianych współczynników (otrzymanych eksperymentalnie i numerycznie) przedstawionych w Tabeli 7.13.

Wnioski sformułowane na zakończenie rozdziału 7 są w zasadzie trafne, chociaż niektóre są niezrozumiałe, np. wniosek 3, w którym prawdopodobnie wystąpił błąd edytorski (... powierzchnie posiadały wysoki współczynnik emisyjności ( $\epsilon = 0$ )). Nasuwa się też pytanie związane z wnioskiem 5 i 13.

24. Czy zaproponowane korelacje (we wniosku 5 i 13) na liczbę Nusselta zostały zweryfikowane eksperymentalnie?

Podsumowując należy stwierdzić, że opis wyników symulacji zjawisk cieplnych zachodzących w szczelinach/ kanałach kolektorów słonecznych jest przedstawiony w sposób dokładny i przejrzysty, i świadczy o dużej intuicji naukowej Doktoranta. Szkoda jednak, że Kandydat nie odniósł się do zjawisk optycznych zachodzących w przestrzeniach roboczych kolektorów powietrznych. Ogranicza to bowiem rozważany obszar problematyki transportu energii, który ma miejsce (nie tylko na sposób ciepła) i umożliwia pozyskanie energii słonecznej do celów użytkowych.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie przeprowadzonych przez Autora prac badawczych. Sformułowane wnioski końcowe są właściwe, a ostatni wniosek (nr 5) jest szczególnie istotny bowiem potwierdza realizację postawionych przez Autora hipotez badawczych. Kierunki dalszych badań zostały odpowiednio przewidziane, wydaje się jednak że **poza badaniami eksperymentalnymi w warunkach otoczenia zewnętrznego i naturalnego oddziaływania środowiska, w tym promieniowania słonecznego, konieczne jest przeprowadzenie badań eksperymentalnych laboratoryjnych pod symulatorem**



słonecznym, lub uzupełnienie źródeł promieniowania na istniejącym stanowisku badawczym, o te które emitują promieniowanie w zakresie widzialnym. Dalsze badania powinny uwzględniać zagadnienia optyki, szczególnie w odniesieniu do pozyskiwania energii promieniowania słonecznego.

### 2.3. Uwagi szczegółowe

W tej części wyszczególniono kilka uwag/pytań szczegółowych. Niejasność niektórych sformułowań przeszkadza w zrozumieniu treści rozprawy.

- Str.2, Rys.1.1 – co to jest liniowe zwierciadło Fresnela?
- Str. 25 – co oznacza słowo „przetłoczenia”?
- Str.91. – w Tabeli 6.4 brakuje jednostek. Co oznacza wielkość  $I_{\max} = 1372,3$  ? Czy taka wielkość natężenia promieniowania słonecznego jest możliwa w rzeczywistości?
- Str. 137 – w przedostatnim akapicie Autor napisał: „W chwili załączenia modelu po raz pierwszy, ...”, co oznacza w tym przypadku sformułowanie: załączyć model?

### 2.4. Podsumowanie merytoryczne

Zamieszczone powyżej krytyczne uwagi i pytania nie umniejszają roli badań naukowych przeprowadzonych przez Doktoranta. Podjęte przez doktoranta zagadnienie jest nowatorskie i dotyczy problematyki nadal mało rozpoznanej w literaturze przedmiotu. Należy podkreślić, iż przeprowadzone badania stanowią wkład do stanu wiedzy w zakresie konwekcji swobodnej występującej w szczelinach/ kanałach różnych struktur geometrycznych, w tym w przestrzeniach wewnętrznych słonecznych kolektorów powietrznych. Zwracają także uwagę na zjawiska promieniowania ciepłego istotne przy intensyfikacji mechanizmu wymiany ciepła w rozważanych strukturach i pozwalają na sformułowanie istotnych wniosków aplikacyjnych w odniesieniu do tworzenia nowych rozwiązań powietrznych pasywnych kolektorów słonecznych.

Należy podkreślić, iż przeprowadzone przez doktoranta prace stanowią widoczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna (poprzednio dyscyplina budowa i eksploatacja maszyn). W szczególności wnoszą one wartość dodaną w odniesieniu do badań naukowych o charakterze podstawowym dotyczących zjawisk transportu ciepła na drodze konwekcji swobodnej w kanałach/szczelinach powietrznych, jak i badań aplikacyjnych ukierunkowanych na pozyskanie i efektywne wykorzystanie energii promieniowania słonecznego do celów użytkowych. Problematyka pracy jest bardzo innowacyjna, a przeprowadzone badania stanowią istotny wkład w rozwój badań analitycznych, symulacyjnych i empirycznych nowoczesnych urządzeń wykorzystujących energię promieniowania słonecznego.

Wyrażam opinię, że w świetle rozpoznanego przez doktoranta stanu wiedzy, decyzja o napisaniu niniejszej rozprawy i przeprowadzeniu badań była przemyślana i słuszna, postawiony cel rozprawy został osiągnięty, a sformułowane hipotezy badawcze zostały udowodnione.

### 3. Wniosek Końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Jacka Fiuka wnosi widoczny wkład do rozwoju nauk technicznych, w szczególności badań z zakresu mechaniki płynów, w tym zagadnień ciepło-przepływowych w powietrznych kolektorach słonecznych. Tematyka pracy zawiera się w

dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Jej wartość merytoryczna i oryginalne osiągnięcia Doktoranta, **spełniają wymagania** wymienione w przepisach ustawy z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (t.j. Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 z późn. zm.) oraz § 3.1 pkt. 2 i § 7.2 rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30 stycznia 2018 roku w *sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora* (Dz.U. z 2018 r. poz. 261), i wobec powyższego wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej „**Badanie wpływu wybranych parametrów geometrycznych i materiałowych na intensyfikację konwekcyjnej wymiany ciepła w pasywnym powietrznym kolektorze słonecznym**” i dopuszczenie Pana mgr inż. Jacka Fiuka do dalszego etapu w postępowaniu o nadanie stopnia doktora nauk technicznych.

