

Warszawa, 15. 02. 2016

Dr hab. inż. Elżbieta Pieczyska, prof. IPPT
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Ul. Pawińskiego 5 B; 02-106 Warszawa
Tel. 22 8261281; faks 22 8267380
E-mail: epiecz@ippt.pan.pl
www.ippt.pan.pl/staff/epiecz

OCENA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Kazimierza Kamińskiego pt.

***Analiza wpływu wybranych cech geometrycznych
i właściwości termofizycznych kolektorów słonecznych
cieczowych na ich parametry cieplno-przepływowe***

opracowana na wniosek

**Rady Wydziału Technologii i Edukacji
Politechniki Koszalińskiej**

Człowiek od zawsze wykorzystywał energię promieniowania słonecznego do celów grzewczych, zwłaszcza podgrzewania wody. Na przestrzeni czasu stosowano w tym celu różne rozwiązania, prowadząc też nieprzerwanie prace nad podwyższaniem sprawności cieplnej tych urządzeń, m.in. kolektorów słonecznych. Ich gwałtowny rozwój nastąpił w drugiej połowie XX wieku, szczególnie w Niemczech i Francji, co wiązało się z wprowadzaniem w tych krajach narodowych programów wykorzystania energii Słońca.

W Polsce energia słoneczna była wykorzystywana w tym zakresie dość sporadycznie. Wprowadzenie w 1996r. *Strategii redukcji gazów cieplarnianych*, a po 2004r. konieczność stosowania zaleceń Komisji Europejskiej, m.in. *Pakietu klimatycznego* z 2007r., oraz systematyczny wzrost cen energii, spowodowały, że zainteresowanie nią zdecydowanie wzrosło. Zławsza, że w ostatnich latach utrzymuje się w naszym kraju tendencja wzrostu liczby dni słonecznych.

Rozprawa mgr. inż. Kazimierza Kamińskiego dotyczy zatem bardzo ważnej i aktualnej tematyki badawczej wykorzystania odnawialnych źródeł energii poprzez pozyskiwanie energii promieni słonecznych, co oznacza ograniczenie spalania paliw kopalnych, a tym samym ochronę środowiska naturalnego.

Urządzenie stosowane do konwersji energii promieniowania słonecznego na ciepło zostało nazwane kolektorem, w szczególności cieczowym, gdy energia słoneczna zamieniana jest na energię cieplną cieczy jako nośnika ciepła. W zależności od konstrukcji i zastosowanego rozwiązania, wyróżnia się kolektory płaskie, płaskie próżniowe, próżniowo-rurowe, skupiające oraz specjalne.

Zadaniem najczęściej stosowanego płaskiego kolektora słonecznego, który jest przedmiotem rozprawy, jest podgrzanie czynnika roboczego (wody lub mieszaniny) do dogrzewania pomieszczeń, basenów, wody użytkowej, przy wykorzystaniu energii promieniowania słonecznego: bezpośredniego, rozproszonego i odbitego. Słońce ogrzewa powierzchnię pochłaniającą kolektora, czyli absorber, który podgrzewa czynnik grzewczy. Sprawność cieplną kolektora określa się jako stosunek energii odebranej przez krążącą w nim ciecz do natężenia docierającego promieniowania; zależy ona od wielu czynników. Nie mając wpływu na pogodę i nasłonecznienie w określonych warunkach geograficznych, należy zwrócić szczególną uwagę na efektywność procesu przekształcania promieniowania na ciepło użytkowe, w szczególności na sprawność systemu, na który wpływ ma wysoki współczynnik absorpcji, a niski emisji krótkofalowego promieniowania słonecznego, wartość różnicy temperatur w stosunku do otoczenia oraz zastosowane rozwiązania konstrukcyjne. Wymaga to szczegółowych badań i mimo, że trwają intensywne prace, wiele czynników nie zostało jeszcze do końca poznanych i uwzględnionych w dotychczas proponowanych rozwiązaniach.

Doktorant, opierając się na dobrze dobranej literaturze (74 pozycji), postanowił sprawdzić, jaki wpływ na parametry cieplno-przepływowe płaskich kolektorów słonecznych będą mieć w określonych warunkach eksploatacyjnych ich wybrane cechy geometryczne oraz właściwości termofizyczne.

Przedłożona do oceny rozprawa liczy w sumie 107 stron. Jej konstrukcja jest typowa dla tego typu opracowań naukowych; zawiera stronę tytułową, spis treści, wykaz oznaczeń i skrótów, wstęp, 7 rozdziałów, bibliografię, spis rysunków oraz tabel. Pierwszy rozdział przybliży dotychczasowy stan wiedzy, a ostatni przedstawia podsumowanie, wnioski końcowe oraz kierunki dalszych badań.

Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Tomasz Krzyżyński.

1. Przedmiot i cel rozprawy, struktura, narzędzia oraz zakres pracy

Celem rozprawy jest ocena wpływu wybranych cech geometrycznych oraz właściwości termofizycznych płaskich kolektorów słonecznych na ich parametry cieplno-przepływowe w ustalonych warunkach eksploatacyjnych.

Przedmiotem pracy jest modelowanie procesów cieplno-przepływowych w układzie płaskiego cieczowego kolektora słonecznego przy zastosowaniu dwóch modeli numerycznych, wyznaczenie ich parametrów i weryfikacja eksperymentalna.

Po przeprowadzeniu analizy tematyki w ramach *Wstępu* oraz *Dotychczasowego stanu wiedzy* Doktorant sformułował główne tezy pracy i je udowodnił:

Teza I - zakłada istnienie takich cech geometryczno-konstrukcyjnych układu absorbera, dla których kolektor słoneczny ma uzyskiwać wysoką sprawność cieplną w szerokim zakresie charakterystyki

Teza II - zakłada istnienie takich wariantów konstrukcyjnych układu absorbera, których koszt produkcji będzie niższy, przy jednoczesnym zachowaniu parametrów wysokiej sprawności cieplnej.

W Rozdziale Nr 2, zatytułowanym *Dotychczasowy stan wiedzy*, doktorant dokonał pewnej charakterystyki promieniowania słonecznego, przedstawił schemat tego promieniowania w atmosferze ziemskiej i jego rozkład spektralny w istotnym dla zastosowań w energetyce zakresie długości fali 0.25 μm – 2.50 μm . Przedstawił dostępne w literaturze zasoby helioenergetyczne Polski i omówił ich przydatność w odniesieniu do poszczególnych regionów. Przypomniał, że nasz kraj znajduje się w strefie klimatu umiarkowanego, godziny dzienne średnio w roku stanowią 51 %, a największe wartości nasłonecznienia występują w godzinach od 9 do 15 i zmieniają się w różnych latach, w zależności od regionu. Następnie Doktorant omówił metody szacowania efektywności urządzeń do konwersji energii promieniowania słonecznego, oznaczonej EPS oraz sposoby wyznaczania ich parametrów w zależności od płaszczyzn usytuowania. Scharakteryzował dotychczas stosowane rozwiązania konstrukcyjne płaskich kolektorów słonecznych w układzie harfowym i serpentynowym z różnymi typami absorberów, a także przedstawił zasadę działania kolektorów próżniowo-rurowych. Przedyskutował charakterystyki eksploatacyjne tych kolektorów, w szczególności ich parametry cieplno-przepływowe, zwracając uwagę na wyniki ostatnich badań w tej tematyce.

W Rozdziale nr 3 Doktorant przedstawił metodykę modelowania procesów cieplno-przepływowych w układzie płaskiego cieczowego kolektora słonecznego. Na potrzeby analizy geometryczno-konstrukcyjnej opracował dwuwymiarowy model obliczeniowy procesu wymiany ciepła o parametrach rozłożonych D-C (*Distributed Character*). W drugim modelu numerycznym, CFD (*Computational Fluid Dynamics*), zastosował gotowy pakiet obliczeniowy *Ansys Fluent*, zamieszczony w Bibliografii pod pozycją 71 oraz opracowany na potrzeby CFD model geometryczny układu absorbera utworzony z uwzględnieniem wszystkich cech geometrycznych. Zgodnie z założeniami, modele umożliwiają określenie wartości parametrów symulacyjnych na podstawie ich własności geometryczno-konstrukcyjnych. W modelu D-C uwzględniono zmianę energii całkowitej w objętości kontrolnej w czasie, pomijając równania bilansu pędu i masy, siły tarcia i pływalności, uzyskując prostszą formę końcowych równań i redukcję czasu obliczeń. Natomiast w CFD dokonano szczegółowego odwzorowania geometrii absorbera kolektora przy wykorzystaniu siatki dyskretyzacyjnej, gdzie podziałowi na wielkości dyskretne poddano pełnowymiarowe złożenie absorbera wraz z układem rur wymiennika, uwzględniono kanał rozbierający oraz uzależniono gęstość czynnika roboczego od temperatury.

W kolejnym Rozdziale Nr 4 Doktorant wyznaczył parametry zastosowanych modeli symulacyjnych, wykorzystując badania doświadczalne, których wyniki zostały zamieszczone w Bibliografii pod pozycjami [13], [39] i [5]. Są to klasyczne prace Duffiego i Beckmana (*Solar Engineering of Thermal Processes*) oraz Kleina (*Calculation of flat-plate collector loss coefficient*), opublikowane w 1980 i 1975r. Zdecydowanie nowsza jest praca zamieszczona pod pozycją [5]: *Zasady transportu ciepła*, autorów Bohdala i Charuna, opublikowana przez Politechnikę Koszalińską w 2012 r.

W Rozdziale Nr 5 Doktorant dokonał weryfikacji eksperymentalnej tych modeli na własnym, opracowanym w tym celu stanowisku badawczym, składającym się z systemu hydraulicznego do stabilizacji parametrów czynnika roboczego, zewnętrznej platformy pomiarowej, symulatora promieniowania słonecznego oraz układu akwizycji danych; w tym kalibrację i wprowadzenie korekt czujników

temperatury. Interesujące wyniki znakomicie uzupełniają zamieszczenie przejrzystych schematów i dobrej jakości fotografii stanowiska oraz jego elementów.

Procedurę wyznaczania parametrów eksploatacyjnych kolektorów słonecznych i określenia wpływu zmian struktury geometryczno-konstrukcyjnej na ich sprawność cieplną i własności dynamiczne Doktorant przeprowadził na podstawie aktualnej polskiej normy PN-EN-ISO 9806-2014-02. Badania zostały wykonane w warunkach naturalnego i symulowanego promieniowania słonecznego, jednocześnie na kolektorze badanym oraz na kolektorze referencyjnym. Dokonano weryfikacji eksperymentalnej modeli symulacyjnych kolektora słonecznego, oceniając zgodność cech modelu i obiektu rzeczywistego na podstawie badań kolektora referencyjnego. Porównywano wartości stałej czasowej oraz sprawności optycznej, uzyskane z badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych. Uzyskane wyniki zaprezentowano w postaci odpowiednich wykresów (Rys. 5.17- Rys. 5.29), a otrzymane różnice przedyskutowano.

W Rozdziale Nr 6 Doktorant przeprowadził analizę wpływu wybranych parametrów geometryczno-konstrukcyjnych na charakterystykę sprawności cieplnej badanego kolektora. Potwierdził istotny wpływ na sprawność cieplną zmiany średnicy rur roboczych kolektora – ocenił, że zmniejszenie średnicy rur roboczych oraz podwyższenie ich ilości w układzie powinno przyczynić się do podwyższenia jego sprawności w zakresie niższych temperatur. Zaproponował sposób podwyższenia sprawności tych kolektorów w zakresie wyższych temperatur.

Rozdział Nr 7 zawiera klarowne *Podsumowanie prac badawczych*, jasno sformułowane *Wnioski końcowe* oraz wstępnie sprecyzowane *Kierunki dalszych badań*, stanowiąc tym samym kompleksowe zakończenie tej interesującej rozprawy.

2. Ogólna ocena merytoryczna

Rozprawa doktorska przygotowana przez Pana mgr. inż. Kazimierza Kamińskiego jest przejrzysto zredagowana, zawiera starannie wykonane rysunki i właściwie dobrane fotografie, co ułatwia odbiór treści oraz podwyższa jakość pracy. Po przeprowadzeniu analizy tematyki w ramach zwartego *Wstępu* i obszernego *Dotychczasowego stanu wiedzy* Doktorant sformułował tezy pracy i je udowodnił, prezentując wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

Do najważniejszych rezultatów uzyskanych w pracy można zaliczyć:

1. Wykazanie, że istnieje możliwość kształtowania parametrów cieplno-przepływowych płaskich kolektorów słonecznych poprzez modyfikację struktury geometryczno-konstrukcyjnej, uwzględniając optymalizację kosztów.
2. Zaproponowanie rozwiązania i pokazanie, że zmiana sposobu rozmieszczenia rur roboczych oraz zwiększenie ich ilości poprawia sprawność cieplną kolektora w zakresie niskich temperatur, natomiast zmniejszenie średnicy kanałów roboczych i związany z tym wzrost przepływu czynnika roboczego i mniejszy strumień strat podwyższa sprawność cieplną w zakresie wysokich temperatur, aczkolwiek obniża sprawność optyczną kolektora (w związku z tym modyfikacja ta zalecana jest tylko w układach o większej ilości rur).
3. Pokazanie, jaki wpływ na zwiększenie sprawności cieplnej kolektora w pełnym zakresie charakterystyki mają parametry termofizyczne płyty pochłaniającej: współczynnik przewodności cieplnej, wartość ciepła właściwego i gęstości.

Doktorant przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazał się ogólną wiedzą w zakresie podstaw nauki o ciepłe i przewodnictwie, metod numerycznych, mechaniki i konstrukcji oraz cenną umiejętnością prowadzenia długotrwałych badań doświadczalnych, wnikliwych obserwacji i wnioskowania.

Zakres przeprowadzonych badań jest obszerny, eksperymenty wielostopniowe, a uzyskane wyniki cenne, także dla praktycznych aplikacji. Należy również podkreślić dobrze skompletowaną Bibliografię, zawierającą 74 pozycji literatury fachowej, z których większość opublikowano po 2000 r., a prawie 70 % w języku angielskim. Szkoda natomiast, że Doktorant nie dołączył streszczenia w języku angielskim.

3. Uwagi szczegółowe

Niestety, zdarzają się mniejsze i większe potknięcia edytorskie.

Zdziwienie budzi fakt, że Doktorant, który przygotował rozprawę z tej tematyki i wykazuje dobrą znajomość literatury, używa oznaczenia na jednostkę temperatury skali bezwzględnej „°K” zamiast [K]. Takie oznaczenie tzn. „°K” występuje kilkakrotnie w treści pracy, np.:

- str. 8; w *Dotychczasowym stanie wiedzy* - przy określaniu rozkładu spektralnego energii promieniowania słonecznego w funkcji długości fali, jako „zbliżony do widma ciała doskonale czarnego o temperaturze 5777 °K”,
- str. 58 w *Weryfikacji eksperymentalnej* – „zwiększanie temperatury czynnika roboczego na wejściu o 20 °K”.
- str. 81; *Analiza wpływu wybranych parametrów* ..- „o dokładności pomiaru ± 0.5 °K”

W ogóle zmiana temperatury mogła być w przykładzie 2 i 3 określona w [°C], zwłaszcza, że ta jednostka występuje w Tabeli 5.5 na kolejnej stronie przy określaniu temperatury otoczenia i cieczy zasilającej kolektor, a także w wielu miejscach pracy.

Kolejna uwaga dotyczy zamieszczanych w treści pracy wzorów; Doktorant często nie wyjaśnia zastosowanych oznaczeń. Nawet, jeśli *Wykaz oznaczeń i skrótów* został umieszczony na początku pracy (ten wykaz nie obejmuje, jednakże, wszystkich zastosowanych oznaczeń), dla jasności wzorów należało w tekście pracy wprowadzić oznaczenia i symbole, użyte po raz pierwszy. Powyższa uwaga dotyczy zależności 3.1 oraz wielu wzorów zawartych w Rozdziale 3. Podobnie wygląda sytuacja z niektórymi wzorami Rozdziału 4, począwszy od 4.2, gdzie nie wyjaśniono oznaczeń V_f , d_p i y ; nie ma ich również w Wykazie.

Byłoby wskazane ujednotwić pisownię Ziemia, w tekście używa się Ziemia i ziemia – jako planeta powinno się pisać dużą literą.

Pod rysunkiem 1.18 – napisano „Badane w pracy [43] żebra absorberów o o zmiennej grubości płyty pochłaniającej. Źródło: [43]”, podczas gdy prościej i jaśniej byłoby napisać: „Żebra absorberów o zmiennej grubości płyty pochłaniającej [43]”.

Z kolei literówki np. str. 8 - „rolę ogrywa” zamiast „odgrywa”, str. 9. „pór roku Polsce” Zamiast „pór roku w Polsce”, świadczą, że Doktorant nie używał korektora tekstu, a szkoda!

Ponadto, nie zawsze są precyzyjnie podane odnośniki do tych rysunków, co utrudnia prawidłowy odbiór przekazywanej treści, np.:

Str. 13. Powinno być: „Wśród kolektorów płaskich zdecydowanie dominują kolektory z absorberami w układzie harfowym (rys. 1.9(a) i rys. 1.12 (b))” zamiast (rys.1.12(a)), ponieważ rysunek 1.12(a) przedstawia kolektor serpentynowy.

Podobnie, na str. 13 u dołu powinno być: „Osobną grupę stanowią kolektory płaskie z absorberami w układzie serpentynowym (rys. 1.9 (b) i 1.12 (a)) zamiast (1.12(b)), ponieważ rys. 1.12(b) nie przedstawia kolektora serpentynowego, tylko harfowy.

Pewne pomyłki i niedociągnięcia stylistyczne występują również w Rozdziale 5. Np. na str. 47: „Schemat instalacji hydraulicznej przedstawiono na schemacie 5.1” byłoby lepiej napisać „...na Rys. 5.1”, unikając powtarzania tego samego słowa w krótkim zdaniu.

Podobnie niezręczne sformułowanie występuje na str. 58: „Na podstawie wartości uzyskanych podczas okresu pomiarowego wyznaczono sprawność optyczną kolektorów, na podstawie równania”.

Dalej, w Rozdziale 5. nie odniesiono się do zamieszczonych rysunków oznaczonych Rys. 5.15 i Rys. 5.16, Rys. 5.17, Rys. 5.19 i Rys. 5.25. Natomiast wykorzystuje się je w opisach treści tego rozdziału.

Z kolei na str. 65 pomyłka dotyczy nieprawidłowego oznaczenia tabeli, której przypisano numer poprzedzającego rysunku, pisząc „W tabeli 5.20”, podczas gdy powinno być: „W tabeli 5.7”.

Powyższe uwagi szczegółowe powinny być, w moim przekonaniu, uwzględnione przez Autora w przypadku przygotowywania publikacji naukowych dotyczących tematyki prezentowanej w zakresie niniejszej rozprawy.

4. Wnioski końcowe

Podsumowując, stwierdzam, że Doktorant wykazuje dobrą znajomość przedmiotu, potrafił postawić tezy i znaleźć warunki do ich sprawdzenia. Umiejętnie wykorzystał bazę laboratoryjną i modele matematyczne do realizacji postawionego problemu. Z zadania wywiązał się dobrze. Przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymogi ustawy o stopniach i tytule naukowym stawiane rozprawom doktorskim.

W związku z tym wnioskuję do Rady Wydziału Technologii i Edukacji Politechniki Koszalińskiej do dopuszczenia mgr. inż. Kazimierza Kamińskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Epicyrka