

Gliwice, 12.09.2022

prof. dr hab. inż. Ireneusz Szczygieł
Katedra Techniki Ciepłej
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Śląska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Zbińkowskiego pt.:

Badania właściwości termofizycznych modyfikowanych wosków parafinowych pod kątem możliwości ich zastosowania do chłodzenia paneli LED dużej mocy

Recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii Technicznej prof. dr. hab. inż. Jerzego Małachowskiego w oparciu o pismo z dnia 12 lipca 2022 r.

Rozprawa doktorska powstała pod kierunkiem **prof. dr. hab. inż. Janusza Zmywaczyka**. Promotorem pomocniczym był **ppłk dr inż. Michał Frant**.

1. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem rozprawy jest analiza właściwości termofizycznych modyfikowanych wosków parafinowych pod kątem analizy możliwości ich zastosowania w urządzeniach chłodzących panele LED dużej mocy. Praca zawiera kilka wątków - przeglądowo-opisowy, pomiarowy dotyczący materiałów PCM i zaproponowanych urządzeń chłodzących paneli LED, oraz obliczeniowy oparty na analizie numerycznej.

Po szerokim wprowadzeniu teoretycznym Autor przeprowadził badania eksperymentalne wosków PCM, wykonał pomiary trzech zaproponowanych rozwiązań układu chłodzenia pasywnego paneli LED dużej mocy, po czym przeprowadził badania numeryczne zaproponowanych układów chłodzenia.

Autor sformułował główną tezę pracy w postaci:

Możliwe jest opracowanie wydajnego pasywnego układu chłodzenia wykorzystującego ciepło utajone przemiany fazowej materiału PCM na bazie wosku parafinowego, pod kątem zastosowania tego systemu w chłodzeniu LED dużej mocy

W celu wykazania poprawności tezy, Autor zdefiniował trzy zadania badawcze obejmujące studium literaturowe, sformułowanie i wykonanie pomiarów oraz opracowanie modelu numerycznego i przeprowadzenie na nim obliczeń.

Problematyka rozprawy jest związana z aktualnymi zagadnieniami dotyczącymi chłodzenia elementów elektronicznych, w szczególności paneli LED, których popularność w szerokich zastosowaniach gwałtownie rośnie. Wybór problematyki jest zatem jak najbardziej słuszny i uzasadniony.

2. Omówienie układu rozprawy doktorskiej.

Recenzowana rozprawa została zredagowana na 160 stronach, przy czym treść zasadnicza zajmuje 146 stron, pozostała część to załączniki. Całość poprzedza wykaz skrótów używanych w tekście. Pracę podzielono na siedem rozdziałów i jedenaście podrozdziałów. Każdy podrozdział zawiera niezależne podsumowanie i spis literatury. Rozdział pierwszy pt. **Wprowadzenie** zawiera jeden podrozdział: *Geneza*, w którym uzasadniono podjęcie tematu pracy doktorskiej. W rozdziale drugim zatytułowanym **Analiza stanu zagadnienia** Autor przeprowadził przegląd aktualnego stanu wiedzy w czterech podrozdziałach: *Dioda LED dużej mocy*, *Systemy chłodzenia układów LED*, *Materiały zmiennofazowe PCM* oraz *Sposoby niwelowania negatywnych skutków niskiej przewodności cieplnej organicznych materiałów PCM*. Tym samym Autor dokonał przeglądu stanu wiedzy dla każdego z problemów poruszonych w pracy. Po naświetleniu aktualnego stanu wiedzy Autor zdefiniował główną tezę pracy, którą zawarł w rozdziale trzecim: **Teza i cel pracy**.

Główne rozdziały pracy to rozdział 4, 5 oraz 6. W tych rozdziałach przedstawił badania doświadczalne oraz analizę numeryczną. I tak, rozdział czwarty, zatytułowany **Badania doświadczalne** stanowi opis metodologii badań eksperymentalnych zarówno materiałów zmiennofazowych jak i zaproponowanych w ramach dysertacji biernych układów chłodzenia paneli LED. Rozdział ten Autor podzielił na trzy podrozdziały: *Materiał badawczy* poświęcony przedmiotom pomiarów, *Badanie właściwości termofizycznych oraz efektów cieplnych – metodyka* oraz *Badanie wymiany ciepła podczas pasywnego chłodzenia panelu LED dużej mocy*. W tym rozdziale Autor szczegółowo opisał pomiary eksperymentalne objaśniając zarówno metody pomiarowe jak i użyty sprzęt pomiarowy. Wyniki uzyskane w pomiarach zostały pokazane w rozdziale piątym: **Wyniki badań doświadczalnych**. W dwóch podrozdziałach *Właściwości termofizyczne i efekty cieplne badanych materiałów PCM* oraz *Wyniki badań pasywnego układu chłodzenia diod LED dużej mocy* Autor przedstawił i omówił wyniki pomiarów materiałów PCM oraz zaproponowanych układów chłodzenia paneli.

W rozdziale szóstym **Analiza numeryczna** Autor zaprezentował i omówił model numeryczny zaproponowanych układów chłodzenia paneli LED. Podrozdział *Symulacje wymiany ciepła w pasywnym układzie chłodzenia panelu LED dużej mocy* zawiera założenia modelu, model numeryczny, warunki brzegowe i początkowe oraz wyniki symulacji wraz z omówieniem. Całość pracy podsumowano w rozdziale szóstym **Podsumowanie pracy i wnioski końcowe**.

Sumarycznie **Spis literatury** obejmuje łącznie (suma wszystkich podrozdziałów) 166 pozycji, przy czym część odwołań powtarza się w kolejnych podrozdziałach. Wśród cytowań można znaleźć dwie prace własne Autora.

W dysertacji zamieszczono **trzy załączniki** oraz **Wykaz tabel i rysunków**

Autor zastosował dosyć specyficzny podział na rozdziały i podrozdziały, zamykając każdy z nich osobnym podsumowaniem oraz spisem literatury. Ułatwia to lekturę dysertacji, utrudnia natomiast określenie na jakiej liczbie pozycji literaturowych Autor oparł swe rozważania. Jak już wspomniałem, część pozycji literaturowych pojawia się w wielu rozdziałach.

Pewne zastrzeżenia budzi układ rozdziałów II.3 oraz II.5. Są zamieszczone w części przeglądowej pracy, a zawierają dosyć proste obliczenia wraz z analizą uzyskanych wyników. Zaburza to rytm czytania. Jeżeli Autor chciał zamieścić te obliczenia, mógł przenieść je do załącznika.

W mojej ocenie układ pracy jest poprawny. Również dobór materiałów źródłowych nie budzi żadnych zastrzeżeń.

3. Uwagi krytyczne

Uwagi ogólne

1. Tytuł pracy daje trochę nieprawdziwe pojęcie o dysertacji. Nie odpowiada postawionej tezie badawczej, a ponadto sugeruje, że praca poświęcona jest badaniom właściwości fizykochemicznych materiałów PCM podczas gdy dużą wagę przywiązano do konstrukcji układów chłodzenia modułów LED. Przegląd stanu wiedzy również w dużej części poświęcono modułom LED, co świadczy o tym, że nie stanowią one jedynie tła badań, a są raczej jednym z głównych wątków pracy.

2. W pracy, pomiędzy bardzo istotne treści (z punktu widzenia dysertacji), wpleciono dosyć oczywiste rozważania: dotyczące oporu cieplnego (str. 26 – 28) oraz modelu uproszczonego modelu przewodzenia ciepła w materiale PCM (str 51-52). Odbiegają one poziomem od dysertacji; w mojej opinii jeżeli Autor chciał je zamieścić, korzystniej byłoby to uczynić w załączniku.

3. Na jakiej podstawie dobrano konstrukcje układów chłodzenia LED? Czy była to intuicja Autora oparta na Jego doświadczeniu, czy też dobór konstrukcji wynikał z innych przeprowadzonych analiz?

4. W modelu numerycznym Autor pominął konwekcję w stopionym materiale PCM. Czy takie uproszczenie jest dopuszczalne?

5. Podczas określania warunków brzegowych Autor założył warunek brzegowy III rodzaju, a wymagane w nim współczynniki wnikania ciepła określił na podstawie zależności kryterialnych. Oczywiście takie postępowanie jest w pełni dopuszczalne, jest jednak obarczone sporym błędem, szczególnie w przypadku powierzchni ożebrowanych. W mojej ocenie zdecydowanie dokładniejsze byłoby rozszerzenie domeny obliczeniowej na powietrze otaczające element chłodzący. Określenie warunków brzegowych na tak rozszerzonej domenie budziłoby zdecydowanie mniej wątpliwości. Oczywiście zdecydowanie podwyższyłoby to koszt obliczeniowy modelu.

6. W wyniku przeprowadzonej analizy obliczeniowo-eksperymentalnej pokazano poprawę warunków pracy modułu LED. Jednak nie są to bardzo duże różnice. W mojej opinii korzystne byłoby oszacowanie wydłużenia czasu życia modułu LED po zastosowaniu zaproponowanego chłodzenia i przeprowadzenie analizy ekonomicznej zaproponowanych rozwiązań.

Uwagi szczegółowe

- W wykazie oznaczeń można zauważyć kolidujące oznaczenia: np. c , H , k i inne. Może prowadzić to do niejednoznaczności;
- temperaturę w skali Celsjusza i bezwzględną oznaczono tym samym symbolem. W pewnych przypadkach może to prowadzić do błędów i niejednoznaczności;
- nie jest stosowany konsekwentnie układ jednostek SI - np. str. 25 wartość oporu R_{th} , czy str 41 entalpia zmiany fazy h ;
- str. 25 – sformułowanie: *Parametrem, na podstawie którego dobiera się optymalny układ chłodzenia aplikacji LED jest opór cieplny struktury diody* jest nieprecyzyjne;
- str. 30 wzór 3.12 - jak określono średnie współczynniki przejmowania ciepła i średnią temperaturę?;
- str. 33 – sformułowanie *Omywający żebra płyn przejmuje nadmiar energii wytworzonej na sposób ciepła przez układ* jest nieprecyzyjne;
- strona 39 zależność 4.3 – entalpię zmiany fazy oznaczono Δh podczas gdy na stronie 41 h ;
- strona 39 zależność 4.3 - sformułowanie *ciepło właściwe* jest nieprecyzyjne gdyż może oznaczać ciepło pobrane przez układ odniesione do jednostki ilości substancji. Bardziej poprawnie można tę wielkość określać np. pojemność cieplna właściwa;
- Autor dosyć często używa sformułowania *panele LED mocy* (np. strona 65). Jest to określenie niepełne – nie określa czy chodzi o panele dużej czy małej mocy.
- w rozdziale IV Autor wspomina o kłopotach z uzyskaniem jednorodnej mieszaniny materiału PCM oraz nanorurek węglowych czy nanodrutów srebra. Powstaje zatem pytanie: czy podczas pracy nie pojawiają się kłopoty z sedymentacją próbek?

5. Ocena pracy i wniosek końcowy

Do najistotniejszych osiągnięć Doktoranta należy, w mojej ocenie, zaliczyć:

- Opracowanie metodyki i przeprowadzenie pomiarów własności fizykochemicznych wybranych materiałów PCM.
- Zapropozowanie nowych rozwiązań biernych układów chłodzenia paneli LED dużej mocy, zbudowanie prototypów, zaprojektowanie i przeprowadzenie pomiarów tych urządzeń.
- Zbudowanie modelu numerycznego i wykonanie obliczeń symulacyjnych.

Przedstawione uwagi krytyczne nie wpływają na pozytywną ocenę pracy. Stwierdzam, że Doktorant zrealizował postawione cele pracy oraz zweryfikował główną tezę badawczą pracy. Doktorant wykazał się dużą pracowitością i uporem w dążeniu do osiągnięcia postawionego celu naukowego. Ponadto chciałbym podkreślić użyteczny charakter przeprowadzonych badań.

Po zapoznaniu z treścią przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że zawiera ona oryginalne ujęcie problemu naukowego i świadczy o opanowaniu przez jej Autora mgr. inż. Piotra Zbińkowskiego naukowych oraz analitycznych metod badawczych w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Mechaniczna. W związku z powyższym wyczerpuje ona warunki określone przez Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14 marca 2003 (Dz. U. 2003 nr 65 poz.595) z późniejszymi zmianami i uzasadnia dopuszczenie jej do publicznej obrony, o co wnioskuję.

