

Prof. dr hab. inż. Dawid Taler
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Procesów Ciepłych,
Ochrony Powietrza i Utylizacji Odpadów
Ul. Warszawska 24
31-155 Kraków

Kraków, 27.09.2022 r.

**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“**

Recenzowana rozprawa o objętości 160 stron napisana jest w języku polskim. Składa się z 7 rozdziałów głównych, które obejmują 11 podrozdziałów, 3 załączników oraz wykazu tabel i rysunków. Na początku rozprawy znajdują się podziękowania, spis treści oraz wykaz oznaczeń i skrótów. Wykazy cytowanej literatury znajdują się za każdym z jedenastu podrozdziałów.

Przedmiotem rozprawy są badania właściwości termofizycznych modyfikowanych wosków parafinowych oraz modelowanie CFD (Computational Fluid Dynamics) ożebrowanego panelu odprowadzającego ciepło od diod LED (z ang. Light Emitting Diode) do otoczenia. Pod nieożebrowaną powierzchnią radiatora znajduje się materiał PCM (Phase Change Material), który odbiera ciepło od lampy LED.

Diody LED jako energooszczędne źródła światła są szeroko stosowane w praktyce. Wadą diod LED generujących światło widzialne jest duże wydzielanie się ciepła. Tylko od 15 do 25% energii elektrycznej zużywanej przez diody LED przekształcane jest na światło, a od 75 do 85% zamieniane jest na ciepło. Diody LED wymagają intensywnego chłodzenia, gdyż zbyt wysoka temperatura pracy zmniejsza wartość strumienia świetlnego oraz zmniejsza ich trwałość.

Tematyka rozprawy jest ważna i aktualna. Może stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej. Recenzowana rozprawa ma duże znaczenie poznawcze oraz praktyczne.

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Pierwszy rozdział rozprawy stanowi wprowadzenie, w którym uzasadniona jest celowość zaprojektowania i budowy efektywnego pasywnego układu chłodzenia diod LED wykorzystującego PCM.

W rozdziale drugim przeprowadzono analizę stanu zagadnienia oraz przegląd dotychczas opublikowanych prac dotyczących zasady działania i konstrukcji diod LED o dużej mocy oraz pasywne i aktywne układy ich chłodzenia. Omówione zostały również materiały zmiennofazowe PCM, w tym woski parafinowe. Woski parafinowe mają niski współczynnik przewodzenia ciepła. W rzeczywistych układach pracujących w cyklu nagrzewanie-ochładzanie ta cecha materiałów PCM może przyczyniać się do znacznego obniżenia efektywności układów chłodzenia wykorzystujących te materiały.

W rozdziale trzecim omówiono systemy chłodzenia układów LED. Rozdział zaczyna się od prostej analizy termicznej diody LED, która zasilana jest strumieniem energii elektrycznej (mocą) równym 1 W. Po przyjęciu, że 80% dostarczanej energii elektrycznej zamieniane jest na

ciepło pokazano że, gęstość strumienia ciepła przekazywanego przez złącze p-n wynosi 800 kW/m^2 , a na zewnętrznej powierzchni rdzenia metalowego $32,52 \text{ kW/m}^2$. Z przybliżonych obliczeń wynika, że przy zadanej temperaturze powierzchni rdzenia równej $T_s = 103^\circ\text{C}$, powietrze o temperaturze wlotowej równej $T_p = 20^\circ\text{C}$ powinno przepływać z prędkością $u = 51,1 \text{ m/s}$, aby odebrać tak wysokie strumienie ciepła.. Jest to bardzo duża prędkość przepływu, którą trudno jest osiągnąć w układzie chłodzenia diody LED. Omówiony wyżej przykład pokazuje, że celowe jest prowadzenie badań nad nowym układem chłodzenia diody LED. W paragrafie 3.1 scharakteryzowane zostały opory cieplne występujące w diodzie LED na styku warstw z różnych materiałów. Pasywne układy chłodzenia diod LED, które nie wymagają doprowadzania energii elektrycznej z zewnątrz omówione zostały w paragrafie 3.1. Są to różnego rodzaju żebra lub kołki odprowadzające ciepło do otoczenia bez sztucznego wymuszania przepływu powietrza za pomocą wentylatora. Aktywne systemy chłodzenia omówione są w paragrafie 3.3. Wymagają one doprowadzenia energii elektrycznej z zewnątrz do napędu wentylatora wymuszającego przepływ powietrza lub do napędu pompy do przetłaczania wody. Stosowane są również wentylatory piezoelektryczne, w którym przepływ powietrza wzbudzany jest za pomocą drgającej sprężystej płytki. Do odprowadzania ciepła od diod LED stosowane są także ogniwa Peltiera. Z przeprowadzonego w rozdziale 3 porównania wynika, że w zastosowaniach praktycznych lepiej sprawdzają się pasywne układy chłodzenia z uwagi na większą niezawodność wynikającą z braku części ruchomych oraz braku zewnętrznego zasilania energią elektryczną. Na podstawie analiz mgr inż. Piotr Zbińkowski podjął decyzję o budowie pasywnego układu chłodzenia diod LED z wykorzystaniem materiałów zmiennofazowych (PCM), wzbogaconych różnymi dodatkami podwyższającymi ich współczynnik przewodzenia ciepła oraz pozorne ciepło właściwe.

Przedmiotem rozdziału czwartego są materiały zmiennofazowe PCM. W paragrafie 4.1 pt. „Charakterystyka, klasyfikacja i zastosowania” przedstawione są trzy sposoby magazynowania (odbioru) ciepła: w materiale jednofazowym poprzez podwyższenie jego temperatury, podczas zmiany fazy stałej na ciekłą (topnienie), poprzez odparowanie cieczy lub sublimację oraz podczas przemiany polimorficznej, w której zachodzi zmiana struktury krystalicznej fazy stałej. W trzecim sposobie magazynowania wykorzystuje się reakcję chemiczną endotermiczną, podczas której zachodzi pochłanianie ciepła z otoczenia. Podany jest również prosty wzór (4.3) do obliczania ilości ciepła zmagazynowanego w materiale PCM przy jego nagrzewaniu od temperatury T_1 do temperatury T_2 . Przedstawione zostały również wymagania jakie powinien spełniać materiał PCM, aby akumulował duże ilości ciepła w jednostce masy, między innymi materiał PCM powinien posiadać wysoki współczynnik przewodzenia ciepła, wysoką entalpię właściwą przemiany fazowej oraz odpowiednią do zastosowań temperaturę przemiany fazowej. Materiały zmiennofazowe podzielone zostały na organiczne, nieorganiczne i eutektyczne. Materiały eutektyczne odznaczają się stałą temperaturą przemiany fazowej, co w przypadku konieczności zachowania stałej temperatury pracy ochładzanego elementu jest bardzo ważne. Przedstawione zostały przykłady zastosowania materiałów PCM, między innymi w budownictwie, energetyce, chłodzeniu paneli fotowoltaicznych oraz akumulatorów energii elektrycznej. W paragrafie 4.2 omówione zostały szerzej woski parafinowe, które są odpowiednie do zastosowania w pasywnych systemach chłodzenia diod LED.

Sposoby podwyższania efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła materiałów o małym współczynniku przewodzenia ciepła, jak na przykład woski parafinowe, przedstawione zostały w rozdziale piątym. Zapewnienie wysokiego współczynnika przewodzenia ciepła ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia wysokiej efektywności działania akumulatorów ciepła wykorzystujących materiały PCM.

W paragrafie 5.1 omówione zostały wypełnienia komórkowe z metali o wysokim współczynniku przewodzenia ciepła, jak na przykład miedź lub aluminium. Materiał PCM wypełnia pory w metalowej piance. W przypadku materiałów PCM, jak na przykład woski

parafinowe, których współczynnik przewodzenia ciepła jest rzędu $0,2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, cały materiał PCM znajdujący się w akumulatorze nie podlega przemianom fazowym. W cyklu nagrzewanie-chłodzenie topi się niewielka część materiału PCM znajdująca się w pobliżu gorącej powierzchni w czasie nagrzewania oraz krzepnie niewielka część materiału w pobliżu zimnej powierzchni w czasie cyklu ochładzania wypełnienia. Podwyższanie za pomocą różnych sposobów efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła materiału PCM zwiększa masę materiału PCM w akumulatorze, która ulega przemianom fazowym. W ten sposób podwyższany jest strumień ciepła przekazywany od gorącego czynnika do wypełnienia akumulatora lub od wypełnienia akumulatora do zimnego czynnika.

Innym sposobem zwiększania efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła organicznych materiałów PCM jest dodawanie niewielkich ilości nanoproszków, takich jak nanocząstek tlenku miedzi CuO , tlenku tytanu TiO_2 , grafitu ekspandowanego oraz płatków grafitu. Do podwyższania współczynnika przewodzenia ciepła parafiny stosowane są również rurki nanowęglowe.

W rozdziale III sformułowana została następująca teza rozprawy: „Możliwe jest opracowanie wydajnego pasywnego systemu chłodzenia, wykorzystującego ciepło utajone przemiany fazowej materiału PCM na bazie wosku parafinowego, pod kątem zastosowania tego systemu w chłodzeniu diod LED dużej mocy”.

Głównymi celami rozprawy są:

- eksperymentalne wyznaczenie właściwości termofizycznych wybranych wosków parafinowych produkowanych w Polsce i podwyższenie ich współczynnika przewodzenia ciepła poprzez dodanie do nich nanoproszków metalowych,
- opracowanie i wykonanie kilku wersji pasywnego układu chłodzenia diod LED wykorzystującego materiały PCM,
- badania eksperymentalne zbudowanych układów chłodzenia diod LED,
- modelowanie CFD opracowanych układów chłodzenia diod LED.

Przedmiotem rozdziału czwartego są badania doświadczalne. Wyznaczone zostały właściwości termofizyczne wosków parafinowych produkowanych przez firmę krajową POLWAX S.A. z siedzibą w Jaśle. W paragrafie 6 omówiono woski parafinowe oraz wosk parafinowy o nazwie handlowej LTP ST z dodatkiem wielościennych rurek węglowych lub nanodruty srebrne. Do badań wybrane zostały cztery woski handlowe o nazwach handlowych: LTP 56/20, LUXOLINA, LUXOLINA ST oraz LTP ST o temperaturze krzepnięcia od 48°C do 60°C . Panel diod wykorzystywany w badaniach o wymiarach gabarytowych $132\text{mm} \times 75\text{mm} \times 2\text{mm}$ miał moc 28W . Dwadzieścia osiem diod, o mocy 1W każda, rozmieszczonych było w 7 rzędach po cztery w każdym rzędzie.

Metodyka wyznaczania właściwości termofizycznych oraz efektów cieplnych omówiona została w rozdziale 7. Wyznaczanie zmiany masy próbki w czasie (DT) i pochodnej masy próbki po czasie podzielonej przez objętościowy współczynnik rozszerzalności temperaturowej badanego materiału przedstawione jest w paragrafie 7.1. Efekty cieplne (nagrzewanie, ochładzanie oraz przemiany fazowe) oraz wyznaczenie pozornego ciepła właściwego (różnicowa kalorymetria skaningowa DSC) są przedmiotem paragrafu 7.2. Ciepło właściwe substancji, w tym ciepło właściwe pozorne w czasie przemiany fazowej, wyznaczone było za pomocą normy DIN 51007 przy stałej szybkości nagrzewania próbki.

Do pośredniego pomiaru ciepła właściwego użyto różnicowy kalorymetr NETZCH DSC 401 F1 Pegasus, a jako materiał referencyjny użyty został sztuczny szafir ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$).

W paragrafie 7.3 opisana została impulsowa metoda wyznaczania dyfuzyjności cieplnej (LPA). Do pomiaru zastosowano dyfuzometr LFA 467 HyperFlash.

Do wyznaczania gęstości materiału PCM zastosowano metodę wyporową Archimedesesa. Na podstawie wyznaczonej dyfuzyjności, objętościowego ciepła właściwego oraz gęstości materiału próbki, można wyznaczyć współczynnik przewodzenia ciepła (paragraf 7.5).

Przedmiotem rozdziału ósmego są badania wymiany ciepła podczas pasywnego chłodzenia panelu LED dużej mocy. W paragrafie 8.1 przedstawiona została konstrukcja pasywnego układu chłodzenia, a w paragrafie 8.2 przedstawiony został układ pomiarowy wraz z układem akwizycji danych. W paragrafie 8.3 omówiono budowę trzech przebadanych układów do pasywnego chłodzenia panelu LED: układu bez komory PCM (konfiguracja A), układu z komorą PCM (konfiguracja B) oraz układu z komorą PCM z żebrami wewnątrzkomorowymi (konfiguracja C).

Wyniki badań doświadczalnych wyszczególnionych wyżej układów przedstawione zostały w rozdziale piątym. Właściwości termofizyczne i efekty cieplne badanych materiałów PCM przedstawione są w podrozdziale 9. Najpierw wyznaczone zostały krzywe TG i DTG oraz pozorne ciepło właściwe w funkcji temperatury dla czterech badanych czystych wosków bez dodatków polepszających ich właściwości cieplne. Następnie takie same krzywe wyznaczone zostały dla wosku parafinowego LTP ST z domieszką nanorurek węglowych oraz dla wosku parafinowego LTP ST z domieszką drutu srebrnego. Badania przeprowadzono przy różnych udziałach masowych. Kolejne paragrafy zawierają wyniki pomiarów dyfuzyjności cieplnej, gęstości i współczynnika przewodzenia ciepła dla czterech czystych wosków oraz wosku parafinowego LTP SP z domieszkami rurek węglowych i drutu srebrnego. Wymienione właściwości cieplne wyznaczone zostały w szerokim zakresie zmiany temperatury próbek, od -55°C do 100°C .

W rozdziale VI przedstawiono wyniki symulacji CFD przy użyciu programu COMSOL, version 5.2. Przeprowadzono bardzo dużą liczbę symulacji CFD dla różnych konstrukcji układu chłodzenia panelu diod LCD (konfiguracje A, B i C). Modelowanie komputerowe CFD przeprowadzone zostało dla czystego wosku LTP ST oraz dla tego samego wosku z domieszkami rurek węglowych lub drutu srebrnego. Stwierdzono, że zastosowanie wosku parafinowego (materiału PCM) znacznie poprawia warunki chłodzenia panelu LED. Wpływ żeber wewnątrz wosku parafinowego oraz domieszek rurek węglowych lub drutów srebrnych jest niewielki. W przypadku rurek nanowęglowych pogarszają się warunki chłodzenia panelu LED (wzrost temperatury panelu). Domieszka drutu srebrnego obniża temperaturę panelu LED o około 7,5% przy dużym udziale masowym drutu wynoszącym 7,35%. Wpływ domieszek na poprawę lub pogorszenie warunków pracy panelu LED jest więc niewielki.

Podsumowanie pracy i wnioski końcowe przedstawione są w rozdziale siódmym.

2. Charakterystyka najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych przedstawionych w rozprawie

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Zbińkowskiego jest napisana na bardzo dobrym poziomie naukowym. Ma również duże znaczenie praktyczne. Do najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych Kandydata przedstawionych w rozprawie doktorskiej zaliczyłbym:

- eksperymentalne wyznaczenie właściwości termofizycznych czterech różnych wosków, w tym pozornego ciepła właściwego dla czterech różnych wosków parafinowych,
- eksperymentalne wyznaczenie właściwości termofizycznych wosku parafinowego LTP ST o udziale masowym oleju mniejszym lub równym 0,75% i udziale masowym stearyny mniejszym lub równym 30% z domieszką drutu srebrnego lub nanorurek węglowych w szerokim zakresie zmian temperatury ; obszerne badania eksperymentalne wpływu udziału masowego danej domieszki na właściwości termofizyczne wosku,
- opracowanie, zbudowanie oraz badania eksperymentalne kilku pasywnych układów chłodzenia panelu z diodami LED wykorzystujących ciepło utajone przemiany fazowej wosku parafinowego,

- przeprowadzenie symulacji CFD przy użyciu programu COMSOL 5.2 trzech różnych układów chłodzenia panelu z diodami LED i porównanie wyników obliczeń z danymi pomiarowymi.

3. Uwagi krytyczne

W rozdziale szóstym przedstawione są wyniki symulacji komputerowych różnych układów chłodzenia panelu LED z 28 diodami, gdy diody są włączone. Dobrze byłoby przeprowadzić takie symulacje również dla stygnięcia układu, przy wyłączonych diodach. Pozwoliłoby to dobrać optymalną masę materiału PCM zapewniającą niską temperaturę diod w czasie ich pracy oraz szybkie schładzanie po ich wyłączeniu.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Zbińkowskiego spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim.

Rozprawa wnosi istotny wkład w poznanie właściwości termofizycznych wosków parafinowych czystych oraz z domieszkami, które mogą być stosowane w układach chłodzenia paneli LED dużej mocy. Ważnym osiągnięciem Kandydata jest również przeprowadzenie symulacji pracy trzech różnych układów chłodzenia panelu LED oraz porównanie obliczonych i zmierzonych temperatur wosku i elementów metalowych.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Piotra Zbińkowskiego do publicznej obrony swojej rozprawy i o nadanie mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych. Proponuję również wyróżnić recenzowaną pracę doktorską.

Dariusz Pater