

Prof. dr hab. inż. Michał Ciałkowski
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Instytut Energetyki Przemysłowej
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań

Poznań, 26 lutego 2021 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Ewy Kozak-Jagielo Modelowanie i badania eksperymentalne wymiany ciepła dla nowego aktywnego układu chłodzenia paneli fotowoltaicznych

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Ewy Kozak-Jagielo stanowi pismo z dnia 17 grudnia 2021 r. Prof. dra hab. inż. Stanisława M. Rybickiego dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej.

Praca zawarta jest na 127 stronach i jest podzielona na 13 rozdziałów poprzedzonych: spisem treści, wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów, a w zakończeniu bibliografią liczącą 140 pozycji literaturowych związanych z tematem pracy. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Paweł Ocloń a promotorem pomocniczym dr inż. Małgorzata Fedorczyk - Cisak.

1. Uwagi wstępne

Postępy w pozyskaniu energii w aspekcie minimalnego obciążenia środowiska wymagają nowoczesnych metod projektowania. Metody te oparte są na przesłankach teoretycznych, metodach doświadczalnych i w ostatnich latach na wykorzystaniu pakietów numerycznej mechaniki w szczególności mechaniki płynów i termodynamiki. Opanowanie tych metod wymaga głębokiej wiedzy o równaniach opisujących zjawiska przepływowe, programach numerycznych wspomagających obliczenia i wiedzy z wielu dziedzin pokrewnych. Szeroki zasób wiedzy mgr inż. Ewy Kozak-Jagieli pozwolił na podjęcie tematu zaprezentowanego w tej dynamicznie rozwijającej się dziedzinie energetyki odnawialnej.

2. Omówienie pracy

Jednym z wyróżników poziomu i rozwoju cywilizacyjnego jest zużycie energii. Początek istotnego wzrostu zużycia energii związany jest z rewolucją przemysłową (początek XIX wieku) i rozwojem rolnictwa wywołanym wzrostem ludności. Obecne czasy charakteryzują się nadmiernym zużyciem paliw kopalnych co prowadzi nie tylko do ich wyczerpywania lecz przekształcenie ich na energię elektryczną czy ciepłą prowadzi do istotnego obciążenia środowiska powodując podwyższenie stężenia dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych. Doktorantka we wstępie w znakomity sposób pokazuje rozkład procentowy energii niezbędnej do działania gospodarki i życia mieszkańców.

Polska na tle Unii Europejskiej oparła wytwarzanie energii elektrycznej na węglu i jak Doktorantka podaje udział węgla wynosił w 2019 roku 73,6%. Pozostała część w dużym wymiarze oparta jest na imporcie paliw takich jak gaz i ropa naftowa (wzrost o 60% w ciągu dekady). Ponieważ przetwarzanie węgla, ropy naftowej i gazu na energię elektryczną wiąże się z wytwarzaniem dwutlenku węgla i innymi zanieczyszczeniami (przy nie najwyższej sprawności), przeto częściowe wyeliminowanie ich przez zastąpienie odnawialnymi źródłami energii jest niezbędne dla ochrony klimatu. Szczegółowa analiza przeprowadzona przez Doktorantkę, dotycząca zużycia

energii w sektorze mieszkaniowym (40% energii przypada na sektor mieszkaniowy) pokazuje podstawowe obszary jej zużycia, są to :

- ogrzewanie 63,6% w EU, 65,8% Polska,
- przygotowanie ciepłej wody użytkowej 14,8% w EU, 16,3% Polska,
- oświetlenie, urządzenia elektryczne 14,1%, w EU, 9,6% Polska.

Przedstawione dane wskazują kierunek działania dla zwiększenia udziału czystej energii pozwalającej na zmniejszenie klasycznych źródeł energii. Kierunek ten jest wyrażony w nowej strategii Unii Europejskiej z 2020 roku dotyczącej zrównoważonej gospodarki, gdzie głównym elementem jest rozdzielenie wzrostu gospodarczego od wykorzystania zasobów. Konsekwencją tego będzie istotne obniżenie emisji gazów cieplarnianych.

Rozwój technologiczny istotnie przyczynił się do obniżenia kosztów produkcji energii elektrycznej pochodzącej z odnawialnych źródeł energii powodując, że jest ona tańsza od energii wytwarzanej metodami konwencjonalnymi. Istotną rolę odgrywają dwa źródła jej pochodzenie, są to : energia pozyskana z wiatru i energia słoneczna. W inwestycjach dotyczących OZE, jak podaje Doktorantka, od dziewięciu lat inwestycje w pozyskanie energii słonecznej mają największy udział. Pozyskanie energii ze słońca najczęściej ma miejsce przez zastosowanie ogniw fotowoltaicznych. Przedstawiony wykres na rys. 1.1 pokazuje wzrosty w kolejnych latach zainstalowanej fotowoltaiki. Wzrostowi temu towarzyszy spadek cen modułów fotowoltaicznych i cen energii z OZE, co Doktorantka przedstawiła na rys. 1.2. Jednym z bodźców rozwoju fotowoltaiki był wzrost cen energii elektrycznej pochodzącej z klasycznych źródeł energii. Równoległe ze wzrostem mocy zainstalowanej fotowoltaiki, producenci kładą nacisk na polepszenie jej sprawności i żywotności czemu służą również badania naukowe Doktorantki. W okresach największego nasłonecznienia dochodzi do podniesienia temperatury ogniw fotowoltaicznych i spadku sprawności konwersji energii promieniowania na energię elektryczną, przeto obniżenie temperatury ogniw do zakresu temperatury zapewniającej wysoką sprawność konwersji energii jest zasadne. Należy jednak zauważyć, że tak odzyskana energia cieplna (ciepło odpadowe o temperaturze 35-40°C) jest niewykorzystana. Zmniejszeniu tej straty Doktorantka poświęciła swoje badania.

Opracowanie kompleksowego systemu chłodzenia ogniw fotowoltaicznych jest nowoczesnym kierunkiem badań przedstawionym w dysertacji Doktorantki.

Optymalne wykorzystanie energii słonecznej do jej konwersji na energię elektryczną wymaga wiedzy w zakresie rozkładu natężenia promieniowania w poszczególnych obszarach geograficznych. Służą temu modele teoretyczne, które szczegółowo opisuje Doktorantka. Ważnym elementem pracy jest opis konwersji energii słonecznej w ogniwach fotowoltaicznych, które wykorzystują różne technologie półprzewodnikowe mające wpływ na ich sprawność. Wzrost sprawności ogniw fotowoltaicznych produkowanych w różnych krajach w okresie od 1976 roku do chwili obecnej zestawiono na rys. 2.10 czemu towarzyszy wzrost sprawności modułów fotowoltaicznych, rys. 2.11. Poznanie budowy ogniw fotowoltaicznych i ich własności (parametrów pracy) stanowi cenną wiedzę przydatną nie tylko do prawidłowej budowy stanowiska eksperymentalnego. W dalszej części Doktorantka omawia sposoby zwiększenia produkcji energii elektrycznej jak również cieplnej z modułów fotowoltaicznych.

Powiązanie wysokiej sprawności ogniw fotowoltaicznych w okresie maksymalnego natężenia promieniowania słonecznego (okres letni) z zapobieganiem utraty sprawności ogniw związanych ze wzrostem ich temperatury, jest niezwykle ważnym elementem ich pracy. Z rozważań Doktorantki wynika sposób efektywnego odzysku ciepła odpadowego w układzie z pompą ciepła z gruntowym wymiennikiem ciepła. Szeroka analiza wskazuje na sensowność takiego rozwiązania.

Ze względu na zmienny kąt padania promieniowania słonecznego (zależnego od pory dnia) na panele fotowoltaiczne, co istotnie wpływa na sprawność ogniw fotowoltaicznych, stosuje się różne systemy pozwalające na lepsze wykorzystanie strumienia energii słońca. Możliwość maksymalnego wykorzystania energii słońca przez ustawienie paneli fotowoltaicznych z dużym przybliżeniem prostopadle do kierunku promieniowania, umożliwiają systemy śledzące (nadążne) trajektorię słońca po niebie; są to tak zwane trakery. Doktorantka zestawiła na rys. 6 podział tych systemów i omówiła ich własności.

Idea Doktorantki utrzymania wysokiej sprawności paneli fotowoltaicznych przez wykorzystanie ciepła odpadowego wynikającego z procesu chłodzenia wymaga poznania systemów chłodzenia w zależności od czynnika (plyn lub materiały zmiennofazowe) chłodzącego jak również od sposobów dystrybucji ciepła. Podsumowaniem analizy stosowanych systemów chłodzenia jest tabela 6.2.

Przedstawiona analiza dobitnie pokazuje znaczenie systemów chłodzenia w różnych konfiguracjach konstrukcyjnych z zastosowaniem różnych czynników chłodzących. Ta szeroka analiza wykazała, że idea Doktorantki chłodzenia paneli fotowoltaicznych w systemie z gruntową pompą ciepła jest oryginalna i posiada duży potencjał rozwojowy.

Ponadto proponowane przez Doktorantkę rozwiązanie posiada innowacyjne elementy takie jak :

- rozwiązanie konstrukcyjne łączenia radiatora z panelem likwidujące naprężenia termiczne,
- uniwersalny system segmentowy pozwalający na dopasowanie układu chłodzenia do wymiarów paneli oferowanych przez różnych producentów (masowość zastosowań).

Przedstawiona szeroka analiza własności i zastosowań paneli fotowoltaicznych jak również związana z tym głęboka wiedza Doktorantki pozwoliły na sformułowanie celu, zakresu i tezy dysertacji, która brzmi :

Opracowany nowy aktywny układ chłodzenia paneli fotowoltaicznych pozwala na znaczny wzrost konwersji energii słonecznej, do energii elektrycznej i cieplnej, w porównaniu do paneli fotowoltaicznych bez chłodzenia.

Pierwszym etapem realizacji postawionej tezy była budowa stanowiska laboratoryjnego, które szczegółowo zostało przedstawione w rozdziale 8. Różne warianty pracy układu paneli fotowoltaicznych wymagają opisu matematycznego, którego trudność polega na uwzględnieniu :

- nieliniowości równań różniczkowych cząstkowych opisujących przepływ energii,
- nieregularnych obszarach o różnych własnościach termofizycznych,
- niestacjonarności procesu przepływu ciepła,
- zmiennych warunków brzegowych i początkowych.

Do rozwiązania zagadnień przepływowych zachodzących w chłodzonych panelach fotowoltaicznych Doktorantka wykorzystwała metodę objętości skończonych pozwalającą ująć własności matematyczno-fizyczne zachodzących procesów. Niezbędna wiedza związana jest tutaj z umiejętnością dyskretyzacji równań (opisujących wspomniane procesy) w różnych układach współrzędnych, stosowanie schematów różnicowych do pochodnych względem czasu (z zachowaniem warunku stabilności rozwiązania) i metod rozwiązywania równań w postaci dyskretnej. Wiedza i umiejętności w tym zakresie stanowią podstawę do optymalizacji układu chłodzenia przedstawionej w paragrafie 10.

Pierwszym krokiem do modelowania matematycznego złożonego obszaru panelu fotowoltaicznego jest wygenerowanie siatki obliczeniowej zapewniającej możliwie wysoki stopień dokładności obliczeń z zastosowaniem metody objętości skończonych. Wygenerowane siatki Doktorantka przedstawiła na rys. 10.1 i 10.2, których wpływ liczby węzłów na rozwiązanie problemu przepływu ciepła jest analizowany w dalszej części pracy. Procesowi optymalizacji poddano wpływ liczby segmentów na:

- strumień ciepła przejęty przez wodę,
- różnicę temperatury pomiędzy szkłem a radiatorem,
- różnicę temperatury wlot/wylot (dla mieszaniny wody z glikolem),
- maksymalną temperaturę panelu.

Proces symulacyjny przeprowadzono dla czterech wariantów rozstawu rur chłodzących, stałej temperatury otoczenia $T_{ot}=30^{\circ}\text{C}$ i natężenia promieniowania $q=1100\text{W/m}^2$. Badania eksperymentalne wykazały, że optymalna liczba segmentów wynosi 6 co wynika z analizy wyników zamieszczonych na rys. 10.3-10.7. Badania pokazały, że zastosowanie 6 segmentów rur chłodzących obniżyło temperaturę paneli o dodatkowe 8°C w stosunku do 3 segmentów (w sumie o 48°C). Ważnym wynikiem porównania obliczeń teoretycznych z eksperymentalnymi było stwierdzenie, że temperatura płynu chłodzącego na wylocie nieistotnie różni się od temperatury otrzymanej z modelu numerycznego, tabela 11.1. Ważnym problemem obliczeniowym jest dobór

siatki numerycznej. Ze względu na nieregularny obszar obliczeń, nieliniowość zagadnienia, nie jest możliwe oszacowanie analityczne wpływu gęstości siatki i kroku czasowego na dokładność obliczeń, przeto pozostała metoda porównawcza polegająca na zbadaniu wpływu liczby węzłów na różnice pomiędzy kolejnymi obliczeniami. Wpływ liczby węzłów w funkcji czasu na temperaturę wylotową płynu chłodzącego (dla różnej liczby węzłów i kroku czasowego), ścianki zewnętrznej, temperaturę maksymalną w przedziale 1 godziny zobrazowano na rys.11.5-11.7 a na rys. 11.8 badano wpływ siatki w okresie 24 godzin i porównano go z symulacją numeryczną. Porównanie to przedstawiono na rys. 11.9.

Wyniki porównania należy uznać za zadowalające, które potwierdzają w pełni założenia teoretyczne.

Zbadanie oryginalnego układu zaproponowanego przez Doktorantkę w warunkach rzeczywistych, Doktorantka dokonała w dłuższym okresie czasu co zostało przedstawione w punkcie 12 i zamieściła na szeregu wykresach. Istota tych badań polegała na określeniu zachowaniu się aktywnego chłodzenia paneli fotowoltaicznych w warunkach rzeczywistych z włączonym lub wyłączonym układem chłodzenia i zainstalowanym systemem nadążnym śledzenia słońca. Stosowanie systemów nadążnych (trackerów), pompy obiegowej do chłodzenia paneli fotowoltaicznych, wymaga dodatkowego zasilania elektrycznego co obniża energię netto. Również tym problemem zajmowała się Doktorantka co zostało przedstawione na rys. 12.20.

Przeprowadzone przez Doktorantkę badania w pełni potwierdziły tezę pracy doktorskiej a ponadto wyznaczają nowe kierunki badań.

Ważność tematyki zaprezentowanej w pracy doktorskiej podkreśla publikacja współautorska pt.:

Modeling and experimental validation and thermal performance assessment of a suntracked and cooled PVT system under low solar irradiation opublikowanej w Energy Conversion and Management, Volume 222, 15 October 2020, 113289

3. Uwagi

W trakcie czytania pracy zauważyłem drobne nieścisłości językowe co nie umniejsza w **żadnym stopniu** merytorycznej wartości wyników osiągniętych przez Doktorantkę.

Proszę o ustosunkowanie się do następujących uwag :

- a) model matematyczny opisujący zjawiska przepływu ciepła ujmując w siebie warunki brzegowe wymiany ciepła, przeto interesujące jest pytanie o wrażliwość rozwiązania na błędy określenia warunków brzegowych,
- b) jak zamodelowano wytwarzanie ciepła w module fotowoltaicznym (ciągle czy punktowe źródła ciepła),
- c) zachowanie stabilności rozwiązania niestacjonarnego dla różnych siatek wymaga spełnienia warunku Couranta – Friedrichsa – Leviego, zatem czy podane kroki czasowe na str. 95 są dobrane według tego warunku czy spełniają jeszcze dodatkowy warunek, jeśli tak to jaki ,
- d) stosowanie układu nadążnego z chłodzeniem i pompą ciepła wymaga dodatkowego zasilania elektrycznego obniżającego poziom energii netto, przeto w skali roku jaka jest korzyść w stosunku do innych układów (np. stacjonarnego).

4. Podsumowanie

Doktorantka dokonała szczegółowej analizy literatury przedmiotu i na podstawie własnych doświadczeń sformułowała tezę swojej pracy :

Opracowany nowy aktywny układ chłodzenia paneli fotowoltaicznych pozwala na znaczny wzrost konwersji energii słonecznej, do energii elektrycznej i cieplnej, w porównaniu do paneli fotowoltaicznych bez chłodzenia,

której słuszność w pełni potwierdziła przeprowadzonymi badaniami teoretycznymi jak również eksperymentalnymi.

Przeprowadzone badania Doktorantki mgr inż. Ewy Kozak-Jagięły jednoznacznie świadczą o Jej wysokich umiejętnościach do prowadzenia badań naukowych na wysokim poziomie naukowym, zaś wnioski końcowe pracy wskazują na **nowe kierunki** badań służące rozwiązaniu szeregu problemów poznawczych i aplikacyjnych.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr inż. Ewy Kozak-Jagięły udowadniająca postawioną tezę pracy doktorskiej spełnia w sposób *nadmiarowy* wymogi obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę do Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej o dopuszczenie mgr inż. Ewy Kozak-Jagięły do publicznej obrony recenzowanej pracy.

Jednocześnie uważam osiągnięcia zaprezentowane w rozprawie doktorskiej za niezwykle ważne do zastosowania w praktyce co pozwoli na polepszenie ochrony środowiska . Praca stanowi kompendium wiedzy nowoczesnego modelowania aktywnego układu chłodzenia paneli fotowoltaicznych. Rozwiązane przez Doktorantkę problemy teoretyczne potwierdzone badaniami eksperymentalnymi nadają recenzowanej pracy wybitny charakter poznawczy i użyteczny z dużym potencjałem rozwojowym, przeto stawiam wniosek o jej wyróżnienie.



