

W PANI

PROF. DR HAB INŻ. A.M. ANIEŁA

BARDZO PRÓSIM PANI PROFESOR

O PRZEJĘCIU

SPRAWY



Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Katedra Techniki Ciepłej

dr hab. inż., prof. PŚ

Sebastian Werle

Prodziekan ds. Współpracy i Rozwoju

Koordinator ds. Priorytetowego Obszaru Badawczego
Ochrona Klimatu i Środowiska, Nowoczesna Energetyka

WYDZIAŁ Inżynierii Środowiska i Energetyki

Politechniki Krakowskiej

ADMINISTRACJA
Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki

Wpłynęło dnia **25 STY 2021** r. inż. Stanisław M. Rybicki, prof. PK

Nr **MAF** szt.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgr inż. Ewy Kozak-Jagięła

Gliwice, 20 I 2021r.

pt. "Modelowanie i badania eksperymentalne wymiany ciepła dla nowego aktywnego układu
chłodzenia paneli fotowoltaicznych"

wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Pawła Ocłonia, prof. PK

(promotor pomocniczy dr inż. Małgorzata Fedorczyk-Cisak)

na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej.

1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej, Pana Profesora Stanisława M. Rybickiego (pismo nr ŚÓ.52-1743/2020 z dnia 17.12.2020r.).

2. Wprowadzenie

Dokument strategiczny „Polityka energetyczna Polski do 2040 roku” zakłada, że w 2040 r. ponad połowę mocy zainstalowanej będą stanowić źródła zeroemisyjne. W ostatnim czasie kołem zamachowym rozwoju energetyki odnawialnej w Polsce stała się fotowoltaika, która jest najszybciej rozwijającym się sektorem odnawialnych źródeł energii (OZE) w Polsce, co związane jest z postępującym spadkiem kosztów i funkcjonującym systemem wsparcia. Trend ten doskonale wpisuje się w tzw. Europejski Zielony Ład, który wspomaga rozwój fotowoltaiki. Patrząc na sztarpane postulaty, które mu przyświecają - jak promocja OZE, budowanie zeroemisyjnego przemysłu i biznesu, który ma w swojej istocie zrównoważone oddziaływanie na środowisko - to fotowoltaika idealnie wpisuje się w każdy z tych elementów i może się przyczynić do realizacji tych postulatów.

Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Techniki Ciepłej

ul. Konarskiego 22, pok. 59C, 44-100 Gliwice
+48 32 237 29 83
sebastian.werle@polsl.pl / RIE6@polsl.pl



NIP 631 020 07 36
ING Bank Śląski S.A. o/Gliwice 60 1050 1230 1000 0002 0211 3056

75 lat
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

Me

Jednakże istnieją bariery tego rozwoju. Jedną z nich jest stosunkowo niska wartość konwersji energii słonecznej na elektryczną w układach fotowoltaicznych. Jest to w dużej mierze spowodowane tym, że część energii promieniowania słonecznego niewykorzystana podczas konwersji fotowoltaicznej jest przekształcana na ciepło i bezpowrotnie tracona. By móc ograniczyć te negatywne skutki, naukowcy na całym świecie pracują nad opracowaniem systemów chłodzenia i odzysku ciepła, zwiększając wydajność modułów fotowoltaicznych. Praca doktorska Pani mgr inż. Ewy Kozak-Jagięła dotyczy właśnie tego zagadnienia. Celem ocenianej rozprawy było bowiem opracowanie modelu matematycznego oraz badania eksperymentalne autorskiego układu chłodzenia paneli fotowoltaicznych. Model pozwala na przewidywanie uzysków energii elektrycznej i ciepła z układu dla zmiennych warunków klimatycznych.

Mając powyższe na względzie, uważam rozprawę doktorską mgr inż. Ewy Kozak-Jagięła pt. " Modelowanie i badania eksperymentalne wymiany ciepła dla nowego aktywnego układu chłodzenia paneli fotowoltaicznych" za ważną zarówno z poznawczego jak i użytecznego punktu widzenia, a tematykę pracy za niezwykle aktualną.

3. Zakres rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Ewy Kozak-Jagięła została napisana w języku polskim. Zawiera łącznie 127 stron, na które składa się 13 ponumerowanych kolejno rozdziałów merytorycznych, spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń, spis literatury oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Praca zawiera liczne rysunki i tabele oraz 140 odnośników literaturowych.

W rozdziale 1 (str. 7-11) zatytułowanym „Wprowadzenie” Autorka przedstawiła tło i genezę podjęcia tematu. Poruszyła aspekt struktury produkcji ciepła i energii elektrycznej w Polsce. Wskazano dane świadczące o rozwoju technologii fotowoltaicznych, w tym moc zainstalowaną w Polsce z paneli fotowoltaicznych. Wnioskiem z tej części pracy jest stwierdzenie motywujące rozważania będące tematem rozprawy, że „naukowcy podejmują różne próby opracowania systemu, który pozwoli na zwiększenie wydajności modułów fotowoltaicznych”.

Rozdział 2 (str. 11-26) zatytułowano „Energia słoneczna”. Autorka w tym rozdziale opisała podstawowe wielkości fizyczne charakteryzujące promieniowanie słoneczne, w tym gęstość strumienia promieniowania słonecznego i strumień energii promieniowania słonecznego. Dużą część rozdziału Autorka poświęciła na ocenę zasobów słonecznych w Europie i Polsce. Autorka przedstawiła także modele teoretyczne opisu natężenia promieniowania słonecznego. W rozdziale tym (podpunkt 2.2.) Autorka opisała również zjawisko fotowoltaiczne wraz ze



schematem ogniwa słonecznego i analizą danych literaturowych dotyczących zmiany sprawności ogniw oraz modułów na przestrzeni lat.

Rozdział 3 (str. 27-32) zawiera informacje na temat budowy ogniw fotowoltaicznych. Autorka dokonała podziału technologii fotowoltaicznych oraz szczegółowo opisała wszystkie znane rodzaje ogniw.

Rozdział 4 jest bardzo krótki (str. 32-33) i zawiera opis podstawowych parametrów charakteryzujących ogniwa fotowoltaiczne skupiając się na charakterystyce prądowo-napięciowej w celu wyznaczenia mocy maksymalnej oraz sprawności ogniwa fotowoltaicznego.

Również bardzo krótkim rozdziałem jest rozdział 5 (str. 34-36), w którym opisano parametry pracy modułów fotowoltaicznych (PV). Wydaje się, że Autorka mogła połączyć oba rozdziały (4 i 5) w jeden nadając mu tytuł „Parametry pracy ogniw i modułów fotowoltaicznych”.

Rozdział 6 (str. 37-60) zawiera informacje odnośnie sposobów zwiększania produkcji energii elektrycznej i ciepła z modułów PV. Zastanawiające jest w tym miejscu wtrącenie informacji odnośnie parametrów charakteryzujących pompy ciepła. Oczywiście można to sobie wytłumaczyć chęcią opisu możliwości wykorzystania (efektywnego) ciepła chłodzenia panelu w oparciu o układ z pompą ciepła, ale zdaniem recenzenta są to nadmierne szczegóły. Autorka opisuje też rolę trackerów w optymalizacji produkcji energii finalnej z energii słońca. Dokonano podziału tych urządzeń oraz opisano zasadę działania systemów jednoosiowych oraz dwuosiowych. Duża część tego rozdziału dotyczy układów chłodzenia, w tym pasywnych i aktywnych. Bardzo cennym pomysłem było zebranie informacji odnośnie obu grup systemów w tabelach 6.1 oraz 6.2. Autorka kończy ten rozdział informacją na temat przewagi proponowanego i zaimplementowanego w badaniach własnych systemu chłodzenia względem istniejących na rynku rozwiązań.

W rozdziale 7 (str. 60-62) Autorka umieściła cele, zakres i tezę prac. Teza pracy brzmi następująco: *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.*

Rozdział 8 (str. 62-69) Autorka zatytułowała „Stanowisko badawcze”. Autorka scharakteryzowała instalację badawczą paneli wraz z trackerami oraz zaimplementowanym układem chłodzenia. Zdaniem recenzenta wskazane byłoby, aby bezpośrednio po tym rozdziale



nastąpił opis przeprowadzonych prac eksperymentalnych. Autorka zastosowała jednak inną kolejność i rozdział 9 (str. 69-84) został zatytułowany „Numeryczne modelowanie transportu ciepła”. Autorka przedstawiła w nim równania wykorzystywane w modelu numerycznym panelu wraz z układem chłodzenia. Opisała także metody dyskretyzacji zastosowanych równań.

Rozdział 10 (str. 84-91) zatytułowano „Optymalizacja układu chłodzenia”. Autorka opracowała kod obliczeniowy, którego efektem jest wskazanie optymalnej liczby segmentów rur w układzie chłodzenia. Jako funkcję celu optymalizacji przyjęto m.in. strumień ciepła przejmowany przez wodę, temperaturę maksymalną panelu oraz różnicę temperatury pomiędzy wlotem a wylotem. W wyniku przeprowadzonych analiz okazało się, że najskuteczniejsze chłodzenie osiąga się w przypadku zastosowania sześciu segmentów rur. Jednocześnie stwierdzono, że rozstaw rur chłodzących ma znikomy wpływ na uzyskane wyniki.

Rozdział 11 (str. 92-99) został zatytułowany „Analizy numeryczne zaproponowanego systemu chłodzenia”, choć de facto zaprezentowano w nim wyniki eksperymentalnej walidacji zaproponowanego modelu numerycznego chłodzenia. Autorka wykorzystwała dane eksperymentalne pozyskane podczas pomiarów przeprowadzonych w październiku 2018 roku. Pomiar dotyczył natężenia promieniowania słonecznego, prędkości wiatru, temperatury otoczenia i temperatury wlotowej czynnika chłodniczego oraz strumienia masowego czynnika chłodzącego. Autorka skupiła się na analizie wpływu gęstości siatki obliczeniowej na zbieżność (zgodność) modelu matematycznego z wynikami badań eksperymentalnych. Zaproponowano trzy rodzaje siatek różniących się liczbą węzłów. Autorka wykonała także symulacje pokazujące rozkład temperatury w panelu przy założeniu, że zastosowany zostanie najlepszy z proponowanych układów chłodzenia. Skupiono się jednak tylko na aspekcie równomierności rozkładu pola temperatury.

Rozdział 12 (str. 99-113) nosi tytuł „Badania eksperymentalne”. Autorka zamieściła w nim jednak wyniki badań eksperymentalnych i byłby to lepszy tytuł rozdziału, w bardziej precyzyjny sposób oddający jego zawartość merytoryczną. Badania, których wyniki zaprezentowano, przeprowadzono w okresie od czerwca do sierpnia 2019, zatem była to inna kampania pomiarowa niż ta, która została przeprowadzona celem walidacji zaproponowanego modelu numerycznego. Ich celem była weryfikacja eksperymentalna funkcjonowania w warunkach rzeczywistych zaproponowanego układu chłodzenia. Autorka w rozdziale tym zawarła informacje na temat urządzeń pomiarowych wykorzystywanych podczas pomiarów, choć wydaje się, że



lepszym miejscem na takie zestawienie był rozdział 8. Przedstawiono ponadto wyniki dotyczące produkcji energii elektrycznej i ciepła przez panele chłodzone oraz niechłodzone, a także wyniki pokazujące wpływ użycia systemu nadążnego na ilość produkowanej energii elektrycznej i ciepła. Dokonano także analizy możliwości użycia systemu chodzenia w układzie „pasywnym” czyli bez włączenia pomp obiegowych, a tym samym odzysku ciepła.

Rozdział 13 (str. 113-116) stanowi podsumowanie pracy. Zawarto w nim także wnioski z przeprowadzonych badań.

Podsumowując stwierdzam, że tytuł rozprawy obejmuje jej zakres. Geneza tematu i uzasadnienie celowości jego podjęcia jako problemu badawczego, wynikają z przeglądu stanu wiedzy. W rozprawie postawiono cel, tezę i określono zakres badań.

Pomimo przedstawionych uwag, strukturę merytoryczną i układ recenzowanej pracy uznaję za właściwe.

4. Ocena rozprawy

Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest oryginalna, aktualna i interesująca. Na uwagę zasługuje kompleksowy charakter prowadzonych badań. Autorka przeprowadziła szeroki zakres badań eksperymentalnych, które częściowo wykorzystwała do walidacji opracowanych przez siebie modeli numerycznych.

Za główne osiągnięcia Autorki pracy uważam:

1. Opracowanie modelu matematycznego układu chłodzenia paneli fotowoltaicznych pozwalającego na prognozowanie uzysków energii elektrycznej i ciepła z układu.
2. Dobór optymalnego, z punktu widzenia efektywności odbioru ciepła, ułożenia rur chłodzących i walidacja modelu numerycznego przeprowadzona przy takiej konfiguracji.
3. Przeprowadzenie symulacji mających na celu pokazanie rozkładu temperatury w panelu fotowoltaicznym z zaproponowanym układem chłodzenia.
4. Przeprowadzenie wielowariantowych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem własnej instalacji badawczej uwzględniającej wpływ chłodzenia panelu oraz funkcjonowania systemu nadążnego na efektywność pracy panelu.



5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Poniżej przedstawiam uwagi krytyczne i dyskusyjne jakie nasunęły się podczas lektury pracy. Moim zdaniem są one istotne dla dalszej dyskusji podczas publicznej obrony:

1. Wskazując innowacyjność proponowanego rozwiązania (układu chłodzenia panelu) Autorka podkreśla przede wszystkim sposób mocowania, uniwersalność, ale również - związany ze sposobem mocowania- fakt, że proponowane rozwiązanie można stosować na trakerach. Czy Autorka znajduje inne zalety tego systemu, przekładające się na przykład na efekty termodynamiczne bądź ekonomiczne?
2. W rozdziale 7 Autorka zapisała między innymi, że „zakłada się, że proponowany system chłodzenia paneli PV dzięki współpracy z pompą ciepła, pozwoli na zwiększenie jej efektywności”; Autorka nie umieściła w rozprawie takiej analizy. Dlaczego? Co więcej, na stronie 116 Autorka stwierdziła, że „wykorzystanie ciepła z chłodzenia PV (...) pozwoli na utrzymanie COP pomp ciepła na stałym poziomie”. Czy Autorka zweryfikowała w pracy ten wniosek?
3. Na stronie 73 Autorka napisała, że „korelacja (...) charakteryzuje się dosyć dobrą dokładnością”. Co z inżynierskiego punktu widzenia oznacza sformułowanie „dosyć dobrą” i jakie wielkości były korelowane?
4. Do walidacji zaproponowanego modelu numerycznego panelu z układem chłodzenia Doktorantka wykorzystwała pomiary zrealizowane w okresie jesiennym (X), zaś testy weryfikacyjne działania układu przeprowadziła w okresie letnim (VI-VIII). Czy taka różnica może wpłynąć na uzyskane wyniki?
5. Na rysunku 12.6 widać, że podczas pomiarów 6 czerwca chłodzenie panelu nie spowodowało wzrostu ilości produkowanej energii elektrycznej, mimo stosowania trakera. Dlaczego tak się stało?
6. Na stronie 106 Autorka dokonała analizy wpływu chłodzenia paneli PV na zmianę sprawności produkcji energii elektrycznej. Czy można ten wpływ „wycenić” na wymierne korzyści finansowe dla użytkownika takiej instalacji uwzględniając koszty inwestycyjne i eksploatacyjne?

Podkreślić należy, że powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości naukowej pracy.

Inne uwagi, w tym edycyjne i językowe:

- Skrót OZE nie został wyjaśniony.
- Strona 8 – co oznacza sformułowanie „Żadna osoba i żadne miejsce nie zostaną w tyle”?
- Autorka powinna przygotować wykresy z polskimi opisami; większość z nich zawiera anglojęzyczne opisy pochodzące wprost ze źródła danych.
- Autorka wielokrotnie powieliła spis oznaczeń wymieniając je zarówno bezpośrednio pod wzorami jak i w wykazie ważniejszych oznaczeń.
- Strona 27 – skróty występujące na schemacie umieszczonym na rys. 3.1. wyjaśniono dopiero w dalszej części rozdziału, co utrudnia analizę schematu.
- Autorka wielokrotnie używa tzw. multicytowań; np. na stronie 30 ([40]–[44]) oraz na stronie 31 ([46]–[50]) i w wielu innych miejscach.
- Autorka konsekwentnie powinna unikać sformułowania „energii cieplej”, a stosować sformułowanie „ciepła”.
- Autorka w wielu miejscach niekonsekwentnie nazywa te same wielkości w różny sposób:
 - P_{max} oznacza moc maksymalną ogniów lub moc panelu w MPP.
 - A oznacza pole powierzchni lub powierzchnię ogniwa.
- Strona 64, rys. 8.2 – część oznaczeń nie została wyjaśniona w tekście manuskryptu.
- Strona 70 oraz 72 – współczynniki przewodzenia ciepła ma różne jednostki $W/(m^2K)$ lub $W/(mK)$; co więcej współczynnik wnikania ciepła ma również jednostkę $W/(mK)$.
- Strona 72 – sprawność elektryczną ogniów przyjęto „zgodnie z kartą katalogową”; należy wskazać źródło.
- Wielkości μ oraz ν oznaczono jako lepkość dynamiczną oraz kinematyczną; są to jednak współczynniki lepkości dynamicznej i kinematycznej, ponieważ mają jednostkę miary.
- Wielokrotnie nieprawidłowo użyto „ilość segmentów”; winno być „liczba segmentów”; podobnie na stronie 100 należałoby napisać „liczba godzin”, a nie „ilość godzin”.
- Strona 92 – jest „wiatru”, winno być „prędkości wiatru”.
- Na stronie 102 i 103 Autorka dwukrotnie analizuje te same dane przedstawione na rysunku 12.3.
- Autorka deklarowała, że pomiary w roku 2019 odbywały się w okresie od 01 czerwca do 31 sierpnia. Jednakże np. na rysunku 12.1 widać znacznie węższy zakres danych pomiarowych. Dlaczego?



6. Wnioski końcowe

W podsumowaniu stwierdzam, że odnoszące się do rozprawy uwagi krytyczne nie mają wpływu na jej ocenę, która jest w pełni pozytywna i wysoka. Oceniana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorantka w pełni zrealizowała postawione cele. Uważam, że należy podkreślić kompleksowy charakter przeprowadzonych analiz. Autorka rozprawy, mgr inż. Ewa Kozak-Jagięła wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to jednoznacznie z treści pracy.

Na podstawie przedstawionej do recenzji pracy stwierdzam, że Doktorantka wykazała opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, umiejętność formułowania zadania naukowego, znajomość stanu osiągnięć w obszarze wiedzy związanej z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań. Będąca przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgr inż. Ewy Kozak-Jagięła pt. " Modelowanie i badania eksperymentalne wymiany ciepła dla nowego aktywnego układu chłodzenia paneli fotowoltaicznych" spełnia w całości określone Art. 13.1. Ustawą o stopniach naukowym i tytule naukowym oraz przepisami wprowadzającymi Ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz. 1669 z późn. zm.). warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

W oparciu o powyższe stawiam wniosek do Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej o dopuszczenie doktorantki do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

