

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Dariusza Strąka

pt. „Kompaktowe wymienniki ciepła – badania i analiza efektywności cieplnej oraz zastosowanie do chłodzenia elementów instalacji fotowoltaicznej”

Recenzję opracowałem na podstawie zlecenia dr. hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk, Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej (pismo MAA-511/82/2025).

1. Informacje ogólne o Doktorancie

Pan mgr inż. Dariusz Strąg jest absolwentem Wyższej Szkoły Ekonomii i Prawa im. prof. Edwarda Lipińskiego w Kielcach (obecna nawa uczelni: Akademia Nauk Stosowanych im. prof. Edwarda Lipińskiego w Kielcach). Tytuł zawodowy magistra inżyniera uzyskał w 2009 roku. Kształcenie na studiach doktoranckich w Politechnice Świętokrzyskiej rozpoczął w 2017 roku. W dniu 15 czerwca 2020 roku, na podstawie uchwały nr 1/2020 Komisji Awansu Naukowego w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, Kandydatowi wyznaczono promotora rozprawy doktorskiej w osobie prof. dr hab. inż. Magdaleny Piaseckiej. Powołano również promotora pomocniczego w osobie dr Anny Pawińskiej.

Pan mgr inż. Dariusz Strąg nie ubiegał się wcześniej o nadanie stopnia doktora.

2. Wprowadzenie

Intensywnie prowadzona transformacja energetyczna, stymulowana w wielu krajach wdrażaniem proekologicznych strategii, sprzyja rozwojowi technologii energetycznych przyjaznych środowisku, w tym technologii fotowoltaicznych. W odpowiedzi na oczekiwania inwestorów, poszukuje się w tym przypadku sposobów na podniesienie sprawności konwersji promieniowania słonecznego, a przez to wydajności generacji energii elektrycznej w instalacjach. Tymczasem sprawność najbardziej obecnie rozpowszechnionych ogniw na bazie krzemu silnie zależy od temperatury ich pracy – dla ogniw monokrystalicznych spada nawet o 0.5% na każdy kelwin wzrostu temperatury. Biorąc pod uwagę ograniczoną możliwość chłodzenia paneli fotowoltaicznych w sposób naturalny, zasadne staje się poszukiwanie innych metod ich chłodzenia, a jedną z możliwości daje wykorzystanie cieczy jako chłodziwa. Choć prace w tym kierunku są prowadzone w uznanych ośrodkach na

świecie, wciąż otwartym zagadnieniem pozostaje konstrukcja dedykowanego wymiennika ciepła ze skuteczną techniką intensyfikacji transportu ciepła. Praca Doktoranta wpisuje się w ten nurt. Wykonane badania eksperymentalno-numeryczne oraz proponowana metoda obliczeniowa dotyczą wymienników ciepła z minikanalami i dostarczają wyników istotnych w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych.

3. Cel i zakres rozprawy doktorskiej

Celem rozprawy doktorskiej była analiza transportu ciepła w wymiennikach ciepła z minikanalami, prowadzona w aspekcie chłodzenia płaskiego panelu fotowoltaicznego. Przebadano wpływ szeregu parametrów na efektywność proponowanego rozwiązania rekuperatora, uwzględniając między innymi warunki termiczno-przepływowe nośników ciepła, rozwinięcie powierzchni wymiany ciepła, czy orientację przestrzenną kanałów przepływowych.

Rozprawa doktorska została napisana w języku polskim i liczy 249 stron. Obejmuje ona kolejno: spis treści, wykaz oznaczeń, dziewięć numerowanych rozdziałów (strony 15-200), bibliografię (244 pozycje), wykaz stron internetowych (17 pozycji), załącznik A (strony 220-234), wykazy tabel i rysunków oraz streszczenia w języku polskim i angielskim (strony końcowe nienumerowane). Załącznik B, obejmujący tabele i rysunki, zapisano na płycie CD, która została dołączona do recenzowanej pracy.

Pierwszy rozdział rozprawy doktorskiej pt. „Wstęp” jest w zasadzie jej streszczeniem. Ponadto, zaakcentowano w nim potrzebę chłodzenia ogniw fotowoltaicznych. Ostatni akapit rozdziału zawiera natomiast ogólnie sformułowany cel pracy.

W drugim rozdziale dokonano przeglądu stanu wiedzy w zakresie kompaktowych wymienników ciepła. W pierwszej kolejności przybliżono klasyfikację takich wymienników, charakteryzując pokrótce poszczególne typy konstrukcji. Najwięcej uwagi poświęcono wymiennikom minikanalowym, podkreślając ich zaletę w postaci intensyfikacji transportu ciepła. Kontekst kanałów, a w szczególności minikanalów, ciągle towarzyszy omawianym w następnej kolejności metodom modelowania zagadnień konwekcji jedno- i dwufazowej. Szczególnie wartościowy jest przegląd korelacji opisujących te mechanizmy transportu ciepła. Ich zestawienie jest obszerne i zawiera też takie równania kryterialne, które Doktorant wykorzystał później do weryfikacji wyników własnych badań eksperymentalnych i modelowania matematycznego. W podrozdziale 2.5 Doktorant omówił metodę NTU do obliczania efektywności cieplnej rekuperatorów, a w podrozdziale 2.6 scharakteryzował pokrótce metody intensyfikacji konwekcyjnego transportu ciepła.

Trzeci rozdział pracy doktorskiej poświęcono hybrydowym modułom/kolektorom PVT (ang. *Photovoltaic Thermal*), które służą do jednoczesnej generacji energii elektrycznej i ciepła. Poza klasyfikacją takich kolektorów, poprzez szereg pozycji literaturowych zasygnalizowano kierunki badań nad chłodzeniem modułów i osiągnięte dzięki niemu przyrosty sprawności konwersji promieniowania słonecznego.

Tezę pracy w brzmieniu: „Istnieje możliwość doboru parametrów kompaktowego wymiennika ciepła w celu dostosowania go do chłodzenia elementów instalacji fotowoltaicznej” zapisano w rozdziale czwartym. Zapisano w nim również cel pracy i jej zakres, obejmujący między innymi:

- konstrukcję dwóch stanowisk badawczych, opracowanie metodyki prowadzenia pomiarów i przeprowadzenie badań eksperymentalnych,
- sformułowanie 1-wymiarowego modelu do wyznaczania współczynników przejmowania ciepła w przebadanych eksperymentalnie układach,
- matematyczne modelowanie współczynników przejmowania ciepła zaproponowanym modelem 1D, modelem 2D z wykorzystaniem funkcji Treffza oraz przywołanymi z literatury korelacjami opisującymi liczbę Nusselta,
- oszacowanie efektywności minikanalowego wymiennika ciepła metodą NTU,
- analizę wpływu chłodzenia na sprawność generacji energii elektrycznej testowanego modułu fotowoltaicznego.

Rozdział piąty jest poświęcony badaniom eksperymentalnym. Szczegółowo przedstawiono w nim stanowiska badawcze, wyposażone odpowiednio w moduł testowy z dwoma minikanalami oraz moduł solarny z grupą minikanalów. Opisy i rysunki uzupełniono zestawionymi w tabelach informacjami o zastosowanym oprzyrządowaniu pomiarowym. W podrozdziałach 5.2.3 i 5.3.3 pokrótce przedstawiono metodykę prowadzenia badań.

W rozdziale szóstym zamieszczono informacje dotyczące zastosowanych metod modelowania współczynników przejmowania ciepła dla konwekcji jednofazowej i wrzenia przechłodzonego w przepływie w minikanalach. W pierwszej kolejności omówiono model matematyczny wg autorskiego podejścia jednowymiarowego oraz model dwuwymiarowy z wykorzystaniem funkcji Treffza. Następnie zaprezentowano modelowanie numeryczne w programie STAR-CCM+, informując o parametrach siatki obliczeniowej oraz warunkach początkowych i brzegowych zakładanych w symulacjach. Niezrozumiały jest powód zamieszczania informacji dotyczących numerycznego modelowania współczynników przejmowania ciepła dla przepływu przez struktury porowate – Doktorant nie badał takich przypadków.

Rozdział siódmy zawiera opis dodatkowych elementów stanowiska badawczego, umożliwiających prowadzenie testów modułu fotowoltaicznego pod obciążeniem oraz magazynowanie wygenerowanej energii elektrycznej. Wskazano czynniki wpływające na straty wydajności modułu, podkreślając przy tym negatywny wpływ wysokich temperatur pracy. Aby skwantyfikować takie oddziaływanie na badany moduł fotowoltaiczny, przeprowadzono analizę wpływu gęstości strumienia ciepła na parametry prądowo-napięciowe modułu oraz uzyskiwane wartości sprawności i mocy użytecznej. Na podstawie uzyskanych wyników, wyznaczono temperaturowe współczynniki straty mocy dla modułu niechłodzonego i chłodzonego.

Wyniki przeprowadzonych prac badawczych przedstawiono w ósmym rozdziale. W pierwszej kolejności zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych – są to pola temperatur na zewnętrznych płytach modułu, jak również rozkłady temperatur na poszczególnych przegrodach (wykreślone na długości minikanalów). Należy podkreślić, że zarejestrowane wyniki skonfrontowano z wynikami modelowania numerycznego przeprowadzonego w programie STAR-CCM+. Wyniki matematycznego modelowania współczynników przejmowania ciepła w minikanalach zaprezentowano w drugiej kolejności. Zestawiono je w formie licznych wykresów. Przeprowadzono też dla nich analizę porównawczą z wynikami modelowania numerycznego, prezentując maksymalne różnice na rys. 8.32. Dodatkowo, w podrozdziale 8.3.4, wyniki modelowania uzyskane podejściem 1D wykorzystano do weryfikacji trzech równań kryterialnych zaczerpniętych z literatury (korelacji Coopera, Mikielewicza i Dutkowskiego). Porównywano w tym przypadku wartości współczynników przejmowania ciepła i liczb Nusselta. W podrozdziale 8.4 Doktorant omówił wpływ wybranych czynników na transport ciepła w badanych wariantach rekuperatora z minikanalami. Uwzględnił przy tym materiał i stan warstwy wierzchniej zasadniczej przegrody wymiany ciepła, odchylenie wymiennika ciepła od położenia poziomego (przebadano dodatkowo dwa położenia kątowe) oraz zmiany masowych natężeń przepływu nośników ciepła. Dyskusji poddano też wpływ właściwości fizyko-cieplnych zastosowanych czynników roboczych (FC-72 i HFE-649) na uzyskiwane wartości liczby Nusselta. Wyniki analizy efektywności cieplnej modułów z minikanalami Doktorant zaprezentował w podrozdziale 8.5 – modelowanie zostało w tym przypadku przeprowadzone metodą NTU. Natomiast w ostatnim podrozdziale (8.6) zostały podsumowane wyniki analiz wpływu warunków chłodzenia na generację mocy elektrycznej i sprawność modułu fotowoltaicznego, również przy jego połączeniu z magazynami energii.

Główną część rozprawy doktorskiej kończy podsumowanie (rozdział 9). Zamieszczono w nim wnioski oraz zaakcentowano udowodnienie hipotezy badawczej. Wskazano też kierunki do kontynuacji prac.

4. Ocena rozprawy

Rozprawa doktorska jest spójna tematycznie, ma wartość naukową i użyteczną. Potwierdza zasadność chłodzenia modułów fotowoltaicznych przy wykorzystaniu minikanalowych wymienników ciepła. Potwierdza też funkcjonalność zaproponowanej metody wyznaczania lokalnych wartości współczynnika przejmowania ciepła w wariantach modułów testowych przedstawionych w pracy.

Do ważnych osiągnięć Doktoranta zaliczam:

- podjęcie zadania badawczego ważnego w kontekście poprawy sprawności konwersji energii w modułach fotowoltaicznych,
- holistyczne podejście do rozwiązania sformułowanego problemu (budowa stanowisk eksperymentalnych do badań dwóch modułów z minikanalowym rozwiązaniem

wymienników ciepła, opracowanie procedury badawczej, wykonanie testów, przeprowadzenie analiz teoretycznych i numerycznych),

- opracowanie metody obliczeniowej współczynników przejmowania ciepła w modułach z minikanalami. Jej funkcjonalność potwierdzono w konfrontacji z analizami przeprowadzonymi na drodze numerycznej i podczas modelowania matematycznego 2D z wykorzystaniem funkcji Treffza.

5. Uwagi do pracy

- 1) s.8: W wykazie oznaczeń kilkakrotnie błędnie przypisano energii jednostkę [W].
- 2) s.17: Podano informację, że dla płytowych wymienników ciepła gęstość powierzchni wymiany ciepła „może wynosić od $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ do nawet $2000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ w zależności od (...) warunków eksploatacyjnych, takich jak temperatura i ciśnienie pracy wymiennika” – zbyt dużym skrótem myślowym jest informowanie o bezpośrednim wpływie parametrów termicznych na przywołany wskaźnik geometryczny.
- 3) s.31: Brakuje informacji czym cechują się powierzchnie TS i NTS. Zastosowane skróty nie zostały też ujęte/wyjaśnione w wykazie oznaczeń.
- 4) s.32-33: Zamieszczanie w rozprawie podstawowych informacji o promieniowaniu, przewodzeniu ciepła i konwekcji uważam za niepotrzebne. Jest to elementarna wiedza akademicka.
- 5) s.34: Sformułowanie „współczynnik przenikania ciepła powierzchni wymiennika” jest niewłaściwe.
- 6) s.36: Zabrakło precyzji w opisie wielkości występujących w korelacji Dittusa-Boeltera. W równaniu (2.16) nie występuje „indeks górny” o wartości 0.3 – należało doprecyzować, że wykładnik potęgi przy liczbie Prandtla przyjmuje taką wartość dla przypadku chłodzenia płynu.
- 7) s.40-41 /opis korelacji Mikielewicza i innych: Równania (2.51) i (2.53) mają błędnie zapisany początek – jest $\alpha_{PB}/\alpha_{sp}=\dots$, a powinno być $\alpha_{TPB}/\alpha_{sp}=\dots$, gdzie α_{TPB} oznacza współczynnik przejmowania ciepła dla wrzenia w przepływie z generacją pęcherzyków pary. Współczynnik przejmowania ciepła oznaczony jako α_{PB} odnosi się tylko do wrzenia w objętości (poprawnie umieszczono go w dalszej części wskazanych równań).
- 8) s.46 /opis korelacji Bertscha i innych: Dwukrotnie zapisano to samo równanie (numery równań 2.85 i 2.86). Poza tym, błędnie podano, że współczynnik przejmowania ciepła jest dla przepływu laminarnego opisany zależnością Dittusa-Boeltera (powinna być w tym miejscu przywołana korelacja Hausena).
- 9) s.74 /metodyka badań na stanowisku z modułem solarnym z grupą minikanalów: Pod tabelą 5.4 znajduje się opis metodyki badań skopiowany ze s.67 – pozostawiono w nim informację dotyczącą modułu z dwoma minikanalami, co jest mylące.
- 10) Rozdz.6.2: Brakuje informacji o sposobie wyznaczania prędkości w przepływie czynników.

- 11) s.79: Na rysunku 6.2 błędnie oznaczono współczynnik przewodzenia ciepła dla płyty środkowej (należało zachować spójność oznaczeń na rysunku i w definicji oporu przewodzenia ciepła przez tą przegrodę, który występuje w równaniach (6.9)-(6.13).
- 12) s.91: Zapis „*kinematyczny współczynnik lepkości dynamicznej*” jest błędny, ponieważ nie ma takiego parametru.
- 13) s.103: Niezrozumiałe jest nazwanie parametru η sprawnością cieplną – jego definicja (r-nie (7.6)) ewidentnie wskazuje, że jest to sprawność elektryczna fotoogniwa.
- 14) s.108: Niezrozumiała jest interpretacja wartości współczynnika mocy elektrycznej zawarta w zapisie: „... *do 39% energii promieniowania słonecznego jest przekształcana na energię elektryczną*”. To sformułowanie jest tożsame ze słownym opisem sprawności elektrycznej fotoogniwa, a podana wartość jest niemożliwa do uzyskania w badanym typie fotoogniwa.
- 15) s.109: Operowanie pojęciem „*współczynnika sprawności modułu*” należy uznać za niewłaściwe – opis tego parametru ewidentnie wskazuje na sprawność cieplną modułu PVT.
- 16) s.110: Podano, że sprawność cieplna modułu PVT została obliczona równaniem (7.9), ale w pracy brakuje informacji o wartościach potrzebnych współczynników (odprowadzenia ciepła, transmisyjno-absorpcyjnego i strat cieplnych z kolektora).
- 17) s.113 /tabela 7.10: Dla chłodzonego ogniwa fotowoltaicznego wykazano gwałtowny spadek wartości temperaturowego współczynnika mocy przy najwyższych wartościach gęstości strumienia ciepła, tj 1800 i 2000 W/m² (współczynnik jest niższy nawet w porównaniu z serią pomiarową przy 800 W/m²). Brakuje interpretacji dla tego zjawiska.
- 18) s.114: Brakuje sensu fizycznego dla sprawności ogniwa PV zdefiniowanej r-niem (7.16). Poza tym, to równanie prowadzi do wyniku opatrzonego jednostką.
- 19) s.114 /rys. 7.12: Temu samemu zakresowi temperatury na rysunkach a) i b) przypisano różne skale barw.
- 20) s.122: W dwóch ostatnich liniach jest informacja odnosząca się do badań przy gęstości strumienia ciepła równej 60.36 kW/m², ale na żadnym z wykresów nie zaprezentowano wyników badań przy tym warunku.
- 21) s.143: Strumień ciepła nie jest tożsamy z gęstością strumienia ciepła – niewłaściwe nazewnictwo dostrzega się w analizie dotyczącej rys. 8.16.
- 22) s.153: W opisie do rys. 8.5b znajduje się zapis: „*Do kanału wpływa przechłodzona ciecz, następuje wzrost gęstości strumienia ciepła...*” – zapis jest niewłaściwy, ponieważ zastosowanie elektrycznej płyty jako źródła ciepła w stanowisku oznacza w tym przypadku prowadzenie badań przy stałej gęstości strumienia ciepła.
- 23) s.171: Niezrozumiała jest informacja zawarta w akapicie pod rys. 8.34, nawiązująca do tego rysunku. Podano, że współczynniki α_{23} na powierzchni kontaktu FC-72 z płytą miedzianą wyznaczono wg podejścia 2D, przy wykorzystaniu r-nia (6.17). Jest to niespójne z podpisem rysunku, gdzie jest informacja o wykorzystaniu do obliczeń podejścia 1D z r-niem (6.4).

- 24) s.171 /rys. 8.34: Brakuje wyjaśnienia, dlaczego do analizy porównawczej wykorzystano korelację Coopera, która obowiązuje dla wrzenia w objętości.
- 25) s.172 /rys. 8.35: Na wykresie różnice względne pomiędzy wynikami modelowania matematycznego (1D) i uzyskanymi z równań kryterialnych sięgają 70% przy najniższych wartościach gęstości strumienia ciepła. W mojej opinii niezasadne było wykorzystanie korelacji sformułowanych dla procesu wrzenia do analizy przypadków konwekcji jednofazowej. Potwierdzeniem braku wrzenia były wyniki modelowania metodą 1D, zaprezentowane na rys. 8.34a.
- 26) s.181 /tabela 8.2: W tabeli podano błędną wartość ciepła parowania dla wody.

Podczas redakcji pracy Doktorant nie ustrzegł się szeregu potknięć językowych w zakresie stylu, tzw. literówek, czy niepełnych zdań. Dostrzega się również usterki edytorskie (ważniejsze wyszczególniłem poniżej). W mojej opinii, nie wpływają one na merytoryczną wartość rozprawy doktorskiej, lecz utrudniają śledzenie jej treści.

- Doktorant nie jest konsekwentny w stosowaniu oznaczeń dla niektórych parametrów. Dla przykładu, już w wykazie oznaczeń przypisano napięciu elektrycznemu dwa różne oznaczenia (s.9).
- Na rysunku 5.2 zamieniono oznaczenia woltomierza i amperomierza (obecne oznaczenia są niespójne z opisem stanowiska zamieszczonym na s.62).
- W podpisie rys. 8.11 jest odwołanie do wykresu z notacją (u) – nie ma takiego wykresu. Pomyłka jest widoczna również w odwołaniu do wykresu (p) – ten wykres nie koresponduje z gęstością strumienia ciepła 2000 W/m^2 .
- Na rysunku 8.22 nie ma przypadków i)-l), o czym informuje podpis tego rysunku.

6. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska pt.: „*Kompaktowe wymienniki ciepła – badania i analiza efektywności cieplnej oraz zastosowanie do chłodzenia elementów instalacji fotowoltaicznej*” zawiera oryginalne rozwiązanie zdefiniowanego problemu badawczego. Efektem prac jest metoda obliczeniowa współczynników przejmowania ciepła w modułach z minikanalami, zweryfikowana eksperymentalnie i numerycznie. Jest to istotny wkład Doktoranta w dziedzinę nauk inżynieryjno-technicznych. Rozprawa potwierdza odpowiedni poziom wiedzy teoretycznej Doktoranta i gotowość do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Dariusza Strąka spełnia warunki określone w ustawie „*Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*” z 20 lipca 2018 roku. Rekomenduję akceptację rozprawy i przejście do kolejnych etapów procedury w postępowaniu doktorskim.