

Warszawa 10.07.2023

Dr hab. inż. Artur Rusowicz, prof. uczelni
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska
Ul. Nowowiejska 24
00-665 Warszawa

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Stanka pt.:

„Multi-variant experimental and numerical analysis of selected design and energetic aspects of parabolic trough collectors” (tytuł w jęz.polskim Wielowariantowa analiza eksperymentalno-obliczeniowa wybranych zagadnień konstrukcyjnych i energetycznych dla technologii parabolicznych koncentratorów promieniowania słonecznego)

Recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, w oparciu o pismo nr RIE-BD.512.34.2023 z dnia 28.06.2023 r.

Rozprawa doktorska powstała i została zredagowana pod kierunkiem dr hab. inż. Łukasza Barteli prof. PŚl oraz dr inż. Daniela Węcla, jako promotora pomocniczego.

1. Przedmiot rozprawy

Rozprawę doktorską stanowi cykl 4 monotematycznych publikacji opatrzonych szeroko opracowanym wstępem wprowadzającym w podejmowane zagadnienia. Przedmiotem przedłożonej do oceny rozprawy doktorskiej było przeprowadzenie badań nad identyfikacją procesów wymiany ciepła zachodzących w parabolicznych, rurowych kolektorach słonecznych. W pierwszym etapie prac kompleksowo zaprojektowano i wykonano instalację testową, której pożądana funkcjonalność umożliwiła przeprowadzenie testów eksperymentalnych dla różnych absorberów w układzie parabolicznego koncentratora słonecznego. Opracowano stanowisko testowe z symulatorem promieniowania słonecznego, a proces modelowania i optymalizacji został przedstawiony w pierwszym artykule, wchodzącym

w cykl publikacji. Następnie wykorzystując opracowane stanowisko badawcze przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych. Polegały one na analizie wpływu wkładek turbulizujących przepływ czynnika roboczego w rurach absorbera, wykorzystaniu powłok nieselektywnych na absorberach kolektorów oraz wpływu układu śledzącego na efektywność kolektorów słonecznych. Prace eksperymentalne prowadzone były wariantowo, i uwzględniały zmienianę geometrię wkładek turbulizacyjnych (4 warianty), jak również rodzaj powłok nieselektywnych. Parametrami zmiennymi był wydatek masowy płynu roboczego, rodzaj płynu roboczego, różne zakresy temperatury płynu roboczego oraz gęstość strumienia promieniowania podającego na kolektor słoneczny. Na podkreślenie zasługuje również powstała w pracy koncepcja połączenia kolektorów słonecznych z powłokami nieselektywnymi w systemach niskotemperaturowych. Prace eksperymentalne prowadzono równolegle z pracami polegającymi na modelowaniu matematycznym i numerycznym procesów optycznych i cieplno-przepływowych. Stopniowemu rozwojowi poddano model matematyczny wymiany ciepła o elementy promieniowania bezpośredniego i pośredniego.

Biorąc pod uwagę zawarte w rozprawie rezultaty badań eksperymentalnych proponowanych rozwiązań parabolicznych kolektorów słonecznych, uzyskane wyniki analiz teoretycznych oraz obliczeniowych – stwierdzam, że odpowiadają one sformułowanemu celowi rozprawy. Zakres rzeczowy rozprawy oraz zaproponowany jej zakres korespondują ze sformułowaną tezą rozprawy i pozwalają na uzyskanie rezultatów umożliwiających jej udowodnienie.

2. Struktura redakcyjna pracy

Rozprawę doktorską zredagowano na 160 stronach w postaci **Wprowadzenia** oraz 4 publikacji stanowiących cykl artykułów. Umownie nazwane Wprowadzenie składa się ze streszczeń w języku angielskim i polskim oraz spisu publikacji stanowiących monotematyczny cykl (strona XVII-XVIII) oraz spisu dodatkowych publikacji Doktoranta o tematyce dotyczącej kolektorów słonecznych (strony XIX-XXI).

Doktorant poza cyklem monotematycznych publikacji jest również współautorem 3 publikacji z WoS Core dotyczących kolektorów słonecznych i współautorem 17 referatów na konferencjach międzynarodowych i krajowych. Na stronie XXIII wymienione są również 4 współautorskie publikacje dotyczące magazynowania energii, które powstały podczas studiów doktoranckich i są opublikowane w czasopiśmie z bazy WoS Core. Następnym elementem pracy jest wykaz oznaczeń (strony XXV-XXVI).

Dalsza część pracy (od strony 1 liczby arabskiej) to zasadnicze Wprowadzenie w tematykę prezentowanego w rozprawie cyklu publikacji. Jest to 6 numerowanych rozdziałów (strony 1-44) oraz 2 nienumerowane Bibliografia (strony 45-52) i Spis rysunków (strona 53). Następnie zamieszczono Dodatki w formie 4 publikacji stanowiących monotematyczny cykl publikacji (strony 55-134), na który składają się:

1. Ł. Bartela, **B. Stanek***, D. Węcel, A. Skorek-Osikowska, A solar simulator numerical modeling for heat absorption phenomenon research in a parabolic trough collector, *International Journal of Energy Research*, Vol. 46, 2021, (IF2021=4.672) – udział doktoranta 55%;
2. **B. Stanek**, J. Ochmann, D. Węcel, Ł. Bartela*, Study of twisted tape inserts segmental application in low-concentrated solar parabolic trough collectors, *Energies*, Vol. 16, 2023, (IF2022-2023=3.252) – udział doktoranta 65%;
3. **B. Stanek***, W. Wang, Ł. Bartela, A potential solution in reducing the parabolic trough based solar industrial process heat system cost by partially replacing absorbers coatings with non-selective ones in initial loop sections, *Applied Energy*, Vol. 331, 2023, (IF2022-2023=11.446) – udział doktoranta 80%;
4. **B. Stanek***, D. Węcel, Ł. Bartela, S. Rulik, Solar tracker error impact on linear absorbers efficiency in parabolic trough collector – Optical and thermodynamic study, *Renewable Energy*, Vol. 196, 2022, (IF2022=8.634) – udział doktoranta 65%.

W pierwszej publikacji (zaprezentowanej na stronach 59-72) zaproponowano stanowisko do badań parabolicznych, rurowych kolektorów słonecznych. Zaprojektowano stanowisko badawcze o wymiarach powierzchni efektywnej 1m x 1m, dla jednego kolektora słonecznego. Przedstawiono analizę doboru rodzaju oświetlenia oraz jego rozmieszczenia, tak aby możliwie najlepiej symulowało promieniowanie słoneczne oraz zapewniało powtarzalne warunki badań eksperymentalnych. W konsekwencji zaproponowano rozmieszczenia 22 wolframowych lamp halogenowych i 4 ksenonowych łukowych lamp. Wykorzystano oprogramowanie optyczne APEX do analizy śledzenia promieni optycznych, oparte na metodzie Monte Carlo. Przeanalizowano również wpływ odległości symulatora na ilość energii docierającej do powierzchni absorbera. Oszacowano wymagane nakłady finansowe na budowę stanowiska laboratoryjnego symulatora. Przegląd literatury oparto na 38 pozycjach, aktualnych i dobrze dobranych do tematyki publikacji.

W drugiej publikacji (zaprezentowanej na stronach 75 – 102) zamieszczono wyniki prac eksperymentalnych i symulacji numerycznych dotyczących intensyfikacji procesów wymiany

ciepła. Wykorzystano wkładki skrętne o stopniu skręcenia Tr 1, 2, 4 oraz dla porównania bez wkładki do rury absorbera kolektora słonecznego. Zastosowano rurę kolektora próżniowego o średnicy 33,7 mm, taką samą jak w badaniach prezentowanych w pierwszym artykule. Zmieniano przepływ czynnika roboczego poprzez kolektory w zakresie 0,15-0,3 kg/s oraz zakres temperatury 60°-250°C.

Doktorant zaproponował model matematyczny opisujący przepływ czynnika roboczego w rurach kolektora słonecznego z wkładkami turbulizującymi. Następnie przeprowadził przygotowania do obliczeń CFD z użyciem oprogramowania Ansys Fluent, generując 5 siatek obliczeniowych z różną liczbą węzłów. Przeprowadził obliczenia numeryczne, dokonał walidacji obliczeń. Na podstawie badań zarekomendowano stosowanie wkładki Tr 1, która w analizie długoterminowej wykazuje zwiększenie przyrostu mocy o 0,27%. Stan wiedzy Doktorant wykonał na podstawie 70 publikacji, odpowiednich tematycznie do poruszanych zagadnień.

Trzecia publikacja dotyczy analiz zastosowania nieselektywnych powłok absorpcyjnych na zewnętrznej powierzchni absorbera. Analiza opierała się na wykorzystaniu tanich, komercyjnych powłok nieselektywnych. Płynem roboczym w kolektorach był Therminol VP-1 oraz w zastosowaniu niskotemperaturowym dla porównania – woda. W pracy pojawiła się interesująca koncepcja zastosowania powłok tylko dla początkowych sekcji kolektorów, gdzie temperatura płynu roboczego, odbierającego ciepło od wewnętrznej powierzchni absorbera, jest na tyle niska, że wyższe straty radiacyjne wynikające ze zwiększonej emisyjności, są rekompensowane z naddatkiem poprzez wyższą absorpcyjność powierzchni względem przypadków referencyjnych. Doktorant przeprowadził szereg badań eksperymentalnych kolektorów. W przypadku modelowania matematycznego rozszerzył model parabolicznego kolektora słonecznego zaproponowany w drugiej publikacji. Wyodrębnił w modelu ciepło doprowadzone do powierzchni absorbera jako ciepła promieniowania bezpośredniego i skoncentrowanego. Następnie porównał wyniki prac eksperymentalnych z wynikami z symulacji numerycznych, uzyskując bardzo wysoką zgodność. W wyniku badań eksperymentalnych i numerycznych Doktorant wykazał zalety stosowania nieselektywnych powłok na absorberach w przypadku aplikacji niskotemperaturowej (temperatura na wlocie 60°C), możliwości optymalizacji dla zakresu średnotemperaturowego oraz nieprzydatność rozwiązania dla wysokotemperaturowych aplikacji. Bibliografię stanowi 90 publikacji.

W czwartej publikacji wykorzystując to samo stanowisko badacze, co w poprzednich analizach, określono wpływ błędów układów nadążnych na sprawność optyczną i cieplną parabolicznych kolektorów słonecznych. Wykonano serię analiz dla przypadku, który

uwzględniał brak zastosowania osłony próżniowej wokół absorbera liniowego. Wykorzystano oprogramowanie optyczne APEX do analizy śledzenia promieni optycznych, oparte na metodzie Monte Carlo, podobnie jak w pierwszej publikacji. Wyniki przeprowadzonych analiz wykazały, że maksymalne odchylenie, które nie wpływa na redukcję ilości energii doprowadzanej do powierzchni absorbera, wynosi $1,75^\circ$. Dowiedziono również, że takie odchylenie od pozycji optymalnej powoduje bardziej niejednorodny rozkład promieniowania na jego powierzchni. Bibliografia liczy 76 pozycji.

Reasumując, przedstawiony cykl czterech publikacji stanowi merytorycznie zamkniętą całość wzbogaconą o umowne „Wprowadzenie”, które zawiera dodatkowe, ważne informacje dotyczące rozprawy.

3. Uwagi krytyczne redakcyjne i dyskusyjne do pracy.

Praca jest bardzo starannie zredagowana, stosowana jest poprawna nomenklatura naukowa oraz techniczna. W pracy zamieszczono wiele informacji pozwalających na szczegółowe przeanalizowanie materiału badawczego. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź porządkowy i powinny być traktowane raczej jako pomoc w zakresie wykorzystania uzyskanego materiału w dalszej pracy nad bardzo złożonymi zagadnieniami cieplno-przepływowymi w parabolicznych kolektorach słonecznych. Uwagi te nie pomniejszają wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

Uwagi redakcyjne:

str. XV – jakie jest poprawne nazewnictwo solarny, czy słoneczny?

str. X, XIV, 75, 93 – niefortunny zwrot: najbardziej optymalny „more optimal”;

str. 82 – we wzorach 13 i 15 brak nawiasu;

str. 99 – brak jednostki przy energii kinetycznej;

str. 100 – μ jaką jest lepkością?

str. 106 – czemu występują dwa symbole k i λ dla współczynnika przewodzenia ciepła?

W uwagach dyskusyjnych chciałbym zwrócić uwagę na konstrukcję zaprojektowanego symulatora słonecznego. Oglądając inne konstrukcje symulatorów można zauważyć możliwości usytuowania lamp pod różnymi kątami padania promieniowania na płaszczyznę, na której znajdują się kolektory lub panele PV. Czemu nie zastosowano takiego rozwiązania w przypadku symulatora zaprojektowanego przez Doktoranta? Druga kwestia to regulowana odległość lamp od powierzchni symulatora, czy była ona zmieniana, a może w tym przypadku

położenie lamp było stałe, a kolektor zmieniał kąt i odległość od lamp. Nie jest to dla mnie precyzyjnie wyjaśnione w pracy.

Następne nieprecyzyjnie, lub tego nie dostrzegłem, opisany jest zmienny strumień ciepła od promieniowania padający na kolektor. W jaki sposób w tak szerokim zakresie zmieniano gęstość tego strumienia?

Ostatnia już kwestia dotyczy doboru liczby węzłów i generacji siatek obliczeniowych. Czy można inną metodą sprawdzić poprawność doboru siatki do symulacji numerycznych, niż ta zaproponowana w rozprawie?

4. Podsumowanie

Podsumowując, należy stwierdzić, że przedstawiona do recenzji praca doktorska charakteryzuje się pod względem merytorycznym znaczną nowością tematyczną. Zagadnienia związane z eksploatacją parabolicznych kolektorów słonecznych wydają się być jednym z przyszłościowych rozwiązań prowadzących do zero emisyjnych budynków mających znikomy wpływ na środowisko. Metody podnoszenia efektywności energetycznej, czym zajmował się Doktorant, są obecnie priorytetowe, a jeżeli dodamy elementy ekonomiczne, co również badał Doktorant, to można stwierdzić, że rozprawa prezentuje dokonania w najnowszych trendach badań. Działania w tym zakresie należy uznać za wpisujące się w ogólnoswiatową działalność na rzecz ochrony klimatu i obniżenia wykorzystania energii pierwotnej zawartej przede wszystkim w kopalinach.

Oceniając pracę pod względem redakcyjnym, stwierdzam jej bardzo wysoki poziom. Znajdują się w niej nieliczne błędy językowe, które ewidentnie mogły powstać na etapie ostatnich redakcji treści. Zastosowany język i terminologia mają w zupełności charakter techniczny, wymagany w tego typu opracowaniach.

5. Ocena pracy i wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest poważną, wnoszącą wkład poznawczy oraz metodyczny pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla optyki, wymiany ciepła i mechaniki płynów. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa jednoznacznie spełnia zwyczajowe ramy stawiane pracom doktorskim, zarówno pod względem zakresu rzeczowego, jak poziomu oryginalności osiągnięć technicznych, konstrukcyjnych oraz

metodycznych. Co więcej – istotnym walorem pracy są aspekty poznawcze dotyczące zagadnień naukowych o wciąż otwartym charakterze. Należy podkreślić, że Doktorant realizując prace badawcze musiał zmierzyć się z koniecznością zdobycia wiedzy o charakterze interdyscyplinarnym, a rozwiązywanie wielu problemów natury konstrukcyjnej wymagało bardzo dużego poziomu kreatywności Doktoranta. Uwagę zwraca także bardzo dobrze opanowany, dojrzały warsztat pracy naukowej, czego efektem jest wiele krytycznych analiz zawartych w rozprawie. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zaś oryginalność osiągnięć badawczych Doktoranta skłania mnie do wniosku o jej wyróżnienie. Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Stanka spełnia wymagania Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. 2018 z. 1668 z późn. zmianami) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.
3. Wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Podpisał Artur Rusowicz