

Multi-variant experimental and numerical analysis of selected design and energetic aspects of parabolic trough collectors

BARTOSZ STANEK

Supervisors:

Łukasz Bartela

Daniel Węcel

Doctoral Thesis in Environmental Engineering, Mining and Energy

Silesian University of Technology

Gliwice, Poland, 2023

Author:

Bartosz Stanek, MSc
Silesian University of Technology
Joint Doctoral School
e-mail: bartosz.stanek@polsl.pl

Supervisor:

Łukasz Bartela, PhD with habilitation
Associate Professor at the Silesian University of Technology
Faculty of Energy and Environmental Engineering
Department of Power Engineering and Turbomachinery
Konarskiego 18, 44-100 Gliwice, Poland
e-mail: lukasz.bartela@polsl.pl

Co-Supervisor:

Daniel Węcel, PhD
Assistant Professor at the Silesian University of Technology
Faculty of Energy and Environmental Engineering
Department of Power Engineering and Turbomachinery
Konarskiego 18, 44-100 Gliwice, Poland
e-mail: daniel.wecel@polsl.pl

Polish title:

Wielowariantowa analiza eksperymentalno-obliczeniowa wybranych zagadnień konstrukcyjnych i energetycznych dla technologii parabolicznych koncentratorów promieniowania słonecznego

©Copyright 2023 by Bartosz Stanek

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Bartosz Stanek, mgr inż.

Tytuł w języku angielskim: Multi-variant experimental and numerical analysis of selected design and energetic aspects of parabolic trough collectors

Tytuł w języku polskim: Wielowariantowa analiza eksperymentalno-obliczeniowa wybranych zagadnień konstrukcyjnych i energetycznych dla technologii parabolicznych koncentratorów promieniowania słonecznego

Zwiększenie udziału produkowanej energii ze źródeł odnawialnych w całkowitym miksie energetycznym jest kluczowe w celu redukcji emisji gazów oddziałujących negatywnie na środowisko oraz zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego poprzez uniezależnienie się od paliw kopalnych, będących często przedmiotem polityki międzynarodowej. W obszarze użytkowych form energii, największym zapotrzebowaniem charakteryzuje się nisko oraz wysokotemperaturowe ciepło. Jednym z najbardziej wydajnych i przyjaznych dla środowiska sposobem pozyskiwania ciepła użytkowego jest zaabsorbowanie oraz przetworzenie energii słonecznej przy użyciu infrastruktury kolektorów lub koncentratorów słonecznych.

Paraboliczne koncentratory promieniowania słonecznego (PTC), to dojrzała technologia dotychczas w głównej mierze wykorzystywana do produkcji energii elektrycznej, poprzez pośrednie pozyskiwanie ciepła przy temperaturze około 400 °C, najkorzystniej w dużych instalacjach zlokalizowanych w obszarach o bardzo wysokim rocznym nasłonecznieniu. Instalacje te, charakteryzowały się często dużą aperturą zwierciadeł parabolicznych, tj. około 5 – 7 metrów, wewnętrzną średnicą absorberów około 66 mm oraz całkowitą długością pętli solarnej wynoszącą nawet kilkaset metrów. Układ równolegle połączonych pętli solarnych tworzy instalację solarną o mocy cieplnej rzędu kilkuset MW. Ciągły rozwój instalacji przemysłowych na świecie, spowodował konieczność poszukiwania rozwiązań mogących zaspokoić część zapotrzebowania na ciepło w zakresie temperaturowym do około 250 °C, wykorzystując potencjał energii odnawialnej. Rozwiązaniem idealnie, wpasowującym się w te założenia, są paraboliczne koncentratory promieniowania słonecznego o zredukowanych wymiarach, dostosowanych specjalnie do wytwarzania ciepła średnotemperaturowego.

Pomimo dojrzałości technologii wykorzystującej proces koncentracji promieniowania, zmiany w geometrii absorberów oraz koncentratorów charakteryzujących się niższymi wartościami koncentracji, niż miało to miejsce w przypadku systemów wysokotemperaturowych, otworzyły nowe możliwości zastosowania metod intensyfikacji absorpcji ciepła przez płyn termalny oraz redukcji kosztów poszczególnych elementów instalacji.

Ogół prac zrealizowanych na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej miał na celu identyfikację procesów wymiany ciepła zachodzącej w parabolicznym koncentratorze promieniowania słonecznego, określenie metod intensyfikacji odbioru ciepła oraz redukcji nakładów inwestycyjnych wybranych elementów, a także wykazanie potencjału zaaplikowania tych metod dla poszczególnych instalacji. Rozprawa doktorska bazuje na czterech wybranych publikacjach naukowych autora, a sam zakres realizowanych badań można sklasyfikować w ramach dwóch głównych zagadnień, jakie były rozwijane w dwóch etapach zrealizowanych prac.

W pierwszym etapie prac kompleksowo zaprojektowano oraz skonstruowano instalację badawczą, której oczekiwana funkcjonalność umożliwiła przeprowadzenie badań eksperymentalnych dla różnych absorberów w układzie parabolicznego koncentratora promieniowania słonecznego. W celu zagwarantowania stabilnych i powtarzalnych warunków analizy eksperymentalnej, w stanowisku

badawczym zdecydowano się na użycie symulatora promieniowania słonecznego, którego proces modelowania oraz optymalizacji przedstawiono w artykule pierwszym (*International Journal of Energy Research* wyd. Wiley & Sons). W tym artykule przedstawiono rezultaty z serii analiz optyczno-energetycznych, jakie przeprowadzono przy wykorzystaniu metody Monte Carlo. W tych badaniach określono najbardziej optymalny rodzaj źródeł światła, jakim są wyładowcze lampy metalohalogenowe oraz geometrię odbłyśników paraboloidalnych wraz z ich optymalną aranżacją względem siebie oraz względem koncentratora promieniowania. Poprzez analizę optyczną oszacowano straty poprzez częściowe rozproszenie promieniowania oraz potencjalną moc doprowadzoną do zewnętrznej powierzchni absorbera liniowego. Na podstawie uzyskanych wyników autor tej dysertacji kompleksowo zaprojektował oraz skonstruował stanowisko badawcze oraz przeprowadził serię badań eksperymentalnych dla różnego typu absorberów oraz metod intensyfikacji odbioru ciepła. Uzyskane rezultaty badań przedstawiane były w ramach wielu wystąpień konferencyjnych, głównie o zasięgu międzynarodowym, w tym na konferencjach zagranicznych. W tej rozprawie stanowisko badawcze oraz walidację opracowanych modeli matematycznych opisujących przepływ ciepła w absorberze przedstawiono w artykule drugim (*Energies* wyd. MDPI).

W drugim etapie prac przeprowadzono analizy, które miały na celu określenie potencjału aplikacji metod intensyfikacji odbioru ciepła przez płyn solarny przepływający przez absorber w układzie parabolicznego koncentratora promieniowania słonecznego. Zwiększenie wydajności instalacji poprzez sekwencyjne zastosowanie wkładek turbulizujących przepływ (twisted tapes) przeanalizowano w ramach drugiego artykułu (*Energies* wyd. MDPI). Ewaluacji podlegały trzy rodzaje wkładek o zmiennym skoku, (twisted ratio – Tr) równym 1, 2 oraz 4, zastosowanych w instalacji pracującej w zakresie temperaturowym 60 – 250 °C i przepływie masowym płynu termalnego 0,15 kg/s, 0,225 kg/s oraz 0,3 kg/s, czyli przy parametrach zgodnych z instalacjami produkującymi ciepło do zastosowań przemysłowych. W ramach badań określono parametry hydrauliczne po stronie czynnika odbierającego ciepło oraz te związane z przepływem ciepła w instalacji. Dla badanych przypadków określono, że spośród trzech analizowanych wkładek, największą korzyść energetyczną, dla temperatur czynnika do 190 °C, można uzyskać dla Tr równego 1. Powyżej tej temperatury, optymalne jest zastosowanie wkładki o Tr równym 2. Należy jednak podkreślić, że każda z zastosowanych wkładek w analizowanym przykładzie, prowadziła do intensyfikacji odbioru ciepła przez płyn termalny. W analizie wykazano, że przyrost wydajności instalacji parabolicznych koncentratorów promieniowania słonecznego, gdzie użyto wkładek intensyfikujących odbiór ciepła, zależy jest od ich aranżacji w pętli solarnej, założeń dla pracy instalacji oraz warunków atmosferycznych. W analizowanym przypadku instalacji o długości 90 metrów wykazano, że średni przyrost sprawności wyniósł 0,27%.

W ramach analiz przeprowadzono serię badań nad potencjałem zastosowania nieselektywnych powłok absorpcyjnych, gdzie jako przykład przedstawiono możliwość aplikacji powłoki Pyromark na zewnętrznej powierzchni absorbera. Przedstawiona w artykule trzecim (*Applied Energy* – wyd. Elsevier) analiza, miała na celu przedstawienie strategii wykorzystania niezwykle tanich powłok nieselektywnych, które charakteryzują się wysokim stopniem pochłaniania energii, ale z drugiej strony również wysoką emisyjnością powierzchni. Autor tej dysertacji zaproponował nowatorskie rozwiązanie polegające na aplikacji tych powłok jedynie w początkowych segmentach instalacji solarnej, gdzie temperatura płynu termalnego, odbierającego ciepło od wewnętrznej powierzchni absorbera, jest na tyle niska, że wyższe straty radiacyjne wynikające ze zwiększonej emisyjności, są rekompensowane z nadstatkiem poprzez wyższą absorpcyjność powierzchni względem przypadków referencyjnych. W analizie wykazano, że takie rozwiązanie może zostać zaaplikowane jedynie przy niskim stopniu koncentracji i jest ono ściśle zależne od parametrów przyprływu oraz warunków atmosferycznych. Zaproponowany sekwencyjny układ absorberów umożliwia redukcję nakładów inwestycyjnych, ponieważ proces aplikacji nieselektywnej powłoki bazuje jedynie na jednoetapowej technologii natryskowej. W analizie

wykazano, że dla absorbera o zewnętrznej średnicy 33,4 mm, cena powłoki Pyromark wyniesie 1,34 \$/mb. W artykule trzecim przedstawiono opracowany model matematyczny przepływu ciepła w parabolicznym koncentratorze promieniowania słonecznego, który umożliwił przeprowadzenie badań nad możliwością aplikacji powłok. Nowym założeniem zaaplikowanym w opracowanym modelu matematycznym było osobne rozpatrywanie ciepła doprowadzonego do powierzchni absorbera poprzez promieniowanie skoncentrowane oraz nie skoncentrowane. Wynika to ze znacznie wyższego udziału promieniowania nieskoncentrowanego dla instalacji PTC o niskim stopniu koncentracji, niż dla uprzednio analizowanych instalacji o bardzo szerokiej aperturze. Zastosowane uszczegółowienie metody analitycznej wykorzystanej w opracowanym modelu matematycznym miało na celu zwiększenie dokładności wyników analizy procesu absorpcji ciepła w instalacjach PTC o niskim stopniu koncentracji.

Ostatnia część analizy dotyczyła zagadnień związanych z systemem nadążnym, a więc integralnej części koncentratora promieniowania słonecznego, dzięki któremu zwierciadło lub układ zwierciadeł w sposób ciągły skupia bezpośrednio promienie słoneczne na powierzchni absorbera. Dokładność z jaką promieniowanie jest skupiane na powierzchni absorbera jest ściśle związana z jakością wykonania instalacji, jak również z zastosowanymi procedurami pracy mechanizmu umożliwiającego ruch nadążny, co jest też związane z wielkością nakładów inwestycyjnych, jak również energochłonnością tych mechanizmów. Wykonane analizy umożliwiły ocenę wpływu odchylenia ustawienia koncentratora w stosunku do ustawienia optymalnego na sprawność instalacji. W artykule czwartym (*Renewable Energy – wyd. Elsevier*), przeprowadzono serię badań numerycznych mających na celu określenie wpływ błędów układów nadążnych na sprawność optyczną oraz termodynamiczną parabolicznych koncentratorów promieniowania o niskim stopniu koncentracji. W analizie rozważano geometrię koncentratora zgodną ze wcześniej wspomnianym stanowiskiem z symulatorem promieniowania. Wykonano również serię analiz dla przypadku, który uwzględniał brak zastosowania osłony próżniowej wokół absorbera liniowego. 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. Przebiegi charakterystyk promieniowania na powierzchni absorbera, jakie uzyskano podczas prowadzonych analiz, mogą w przyszłości posłużyć do wykonania analiz CFD, które dokładnie wykażą wpływ tego nie jednorodnego rozkładu na efektywność pracy instalacji.