

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

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

**Bartosz STANEK**



## STRESZCZENIE ROZSZERZONE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Bartosz Stanek, mgr inż.

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

Poniższy opis zestawia najważniejsze informacje uwzględnione w przewodniku po czterech artykułach naukowych, który stanowi pełną dysertację doktorancką złożoną przed Radą Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka. Pełny opis badań podkreślający najważniejsze informacje, tezy i cele badawcze zawarte w rozprawie doktorskiej zostały umieszczone w dysertacji składającej się z kompletnego opisu prac badawczych oraz czterech teksów załączonych artykułów. Poniższy opis przedstawia rozszerzone streszczenie pracy badawczej.

### 1. Motywacja i cele rozprawy

Paraboliczne koncentratory promieniowania słonecznego o niskim stopniu koncentracji to uniwersalne urządzenia, które odpowiednio zaprojektowane mogą pokryć znaczącą część zapotrzebowania na ciepło w instalacjach przemysłowych. Pomimo dojrzałości technologii koncentracji promieniowania słonecznego oraz wielu badań związanych z koncentratorami (PTC) o pełnej skali, zeskalowane geometrie oraz niższy poziom temperaturowy, stwarzają możliwość zastosowania nowych rozwiązań i materiałów, które zarówno mogą zwiększyć efektywność tej technologii, jak i obniżyć cenę wybranych komponentów, co może wpłynąć na rozpowszechnienie tego typu instalacji słonecznych nawet na obszarach o niższym średnim rocznym nasłonecznieniu. Mogłoby to doprowadzić do zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii w całkowitym bilansie energetycznym, co skutkowałoby niższymi emisjami i większą niezależnością od paliw kopalnych.

Materiały użyte w koncentratorach są proste w produkcji i późniejszym recyklingu, więc tego typu urządzenie ma dodatkowo pozytywny wpływ na środowisko w stosunku do innych technologii pozyskiwania energii słonecznej. Niezwykle istotne jest poszukiwanie rozwiązań, które mogą zintensyfikować odbiór ciepła przez kolektory paraboliczne oraz umożliwić badania porównawcze tych urządzeń w stabilnych i powtarzalnych warunkach słonecznych. Dlatego też celem niniejszej pracy dyplomowej było zbadanie różnych rodzajów intensyfikacji ciepła po wewnętrznej i zewnętrznej stronie absorberów liniowych w układzie parabolicznych koncentratorów promieniowania oraz zbadanie ich wpływu na całe instalacje solarne.

Problemy naukowe poruszane w niniejszej rozprawie dotyczą w szczególności trzech wybranych zagadnień oraz elementów parabolicznych koncentratorów słonecznych, przy kompleksowym uwzględnieniu całej technologii. Jest to: intensyfikacja odbioru ciepła wewnątrz absorbera poprzez użycie wkładek turbulizujących przepływ w konkretnej aranżacji, intensyfikacja absorpcji promieniowania słonecznego poprzez wykorzystanie powłok nie selektywnych charakteryzujących się wysokim stopniem absorpcyjności oraz analiza wpływu niedokładności pozycjonowania systemów śledzących pozycję słońca na proces koncentracji oraz zjawisko absorpcji promieniowania przez absorber liniowy umieszczony w ognisku parabolicznego koncentratora.

Dla osiągnięcia celów niniejszej rozprawy sformułowano następujące działania badawcze.

- Kompleksowe zaprojektowanie i wykonanie stanowiska badawczego symulatora promieniowania słonecznego, umożliwiającego przeprowadzenie badań na różnych typach absorberów, w stabilnych i powtarzalnych warunkach.
- Identyfikacja procesów i opracowanie modelu matematycznego wymiany ciepła w parabolicznym koncentratorze promieniowania słonecznego.
- Przeprowadzenie serii analiz eksperymentalnych w celu walidacji opracowanych modeli.
- Badanie wpływu aplikacji wkładek zaburzających przepływ (twisted tapes) wewnątrz liniowego absorbera, oraz optymalizacja pozycjonowania tych wkładek w poszczególnych sekcjach pętli solarnej nakierunkowana na maksymalizację sprawności instalacji.
- Analiza użycia różnych rodzajów wysoko absorbujących powłok na zewnętrznej powierzchni absorbera liniowego oraz optymalizacja ich aranżacji na odpowiednich segmentach pętli solarnej.
- Opracowanie numerycznego, optycznego modelu, koncentratora parabolicznego i przeprowadzenie serii analiz mających na celu określenie wpływu błędu śledzenia na sprawność PTC.

## 2. Zakres rozprawy doktorskiej

Przedłożona rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów.

**Rozdział 1** przedstawia wstęp oraz zawiera główne informacje teoretyczne na temat parabolicznych koncentratorów promieniowania słonecznego.

**Rozdział 2** poświęcony jest opisowi modelowania oraz projektowanie stanowiska badawczego niezbędnego do przeprowadzenia badań eksperymentalnych nad zjawiskiem absorpcji ciepła przez płyn termalny w liniowych absorberach w układzie parabolicznych koncentratorów promieniowania słonecznego. Ze względu na zmienne w czasie naturalne warunki atmosferyczne, w celu zbadania absorberów liniowych w stałych i powtarzalnych warunkach, autor niniejszej rozprawy doktorskiej zaprojektował, a następnie kompleksowo wykonał stanowisko oparte na symulatorze promieniowania słonecznego, umożliwiające symulację promieniowania zbliżonego do naturalnego, nie zależnego od pory roku czy dnia. W tym celu przeprowadzono szereg analiz numerycznych z wykorzystaniem metody Monte Carlo Ray Tracing, aby określić najbardziej odpowiedni rodzaj źródła światła, optymalną geometrię odbłyśników o przekroju parabolicznym oraz ich rozmieszczenie względem koncentratora parabolicznego. W pracy rozważano pożądane widmo promieniowania symulowanego, jego rozproszenie i niejednorodność oraz jak te czynniki wpływają na proces koncentracji promieniowania. W tej części rozprawy określono również szacunkowy koszt symulatora promieniowania z wyszczególnieniem poszczególnych elementów, czego na etapie projektowania stanowiska badawczego przez doktoranta, brakowało w literaturze przedmiotu. Wyniki przeprowadzonych analiz miały kluczowe znaczenie w dalszej pracy, jaką była kompleksowa budowa stanowiska badawczego przez autora niniejszej rozprawy.

W **rozdziale 3** przedstawiono wyniki analizy mającej na celu intensyfikację odbioru ciepła wewnątrz absorbera liniowego za pomocą wkładek ze skręconej taśmy, rozmieszczonych segmentowo w różnych odcinkach pętli instalacji solarnej. Rozważano instalację o niskim współczynniku koncentracji, która mogłaby być wykorzystana jako dodatkowe źródło ciepła dla zastosowań przemysłowych. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem modelu CFD oraz dwuwymiarowego matematycznego modelu wymiany ciepła w absorberze liniowym. Model matematyczny wymiany ciepła został szczegółowo opisany w kolejnym rozdziale. Obliczenia zostały walidowane przy wykorzystaniu wyników z badań eksperymentalnych, przeprowadzonych na skonstruowanym przez doktoranta stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w symulator promieniowania słonecznego, które wykazały wysoką zgodność, potwierdzając zasadność stosowania tych modeli. Zarówno przyrost temperatury jak i spadek ciśnienia zostały zweryfikowane. W rozdziale tym przedstawiono również opracowane i skonstruowane stanowisko badawcze do badań porównawczych absorberów. W badaniach numerycznych zastosowano zgodny z warunkami rzeczywistymi nie jednorodny rozkład skoncentrowanego promieniowania słonecznego na powierzchni absorbera, co zwiększa dokładność obliczeń w stosunku do większości modeli prezentowanych w literaturze. Uzyskane wyniki wskazują na zasadność segmentowego zastosowania wkładek wykonanych z taśm skręconych, poprzez uwzględnienie dodatkowych strat ciśnienia oraz zwiększonego zapotrzebowania na pokrycie potrzeb własnych instalacji spowodowanych większym zapotrzebowaniem na napędzenie pompy obiegowej. Długoterminowa analiza wykonana dla lokalizacji południa Hiszpanii wykazała możliwość zwiększenia sprawności instalacji solarnej o około 0,27 punktu procentowego.

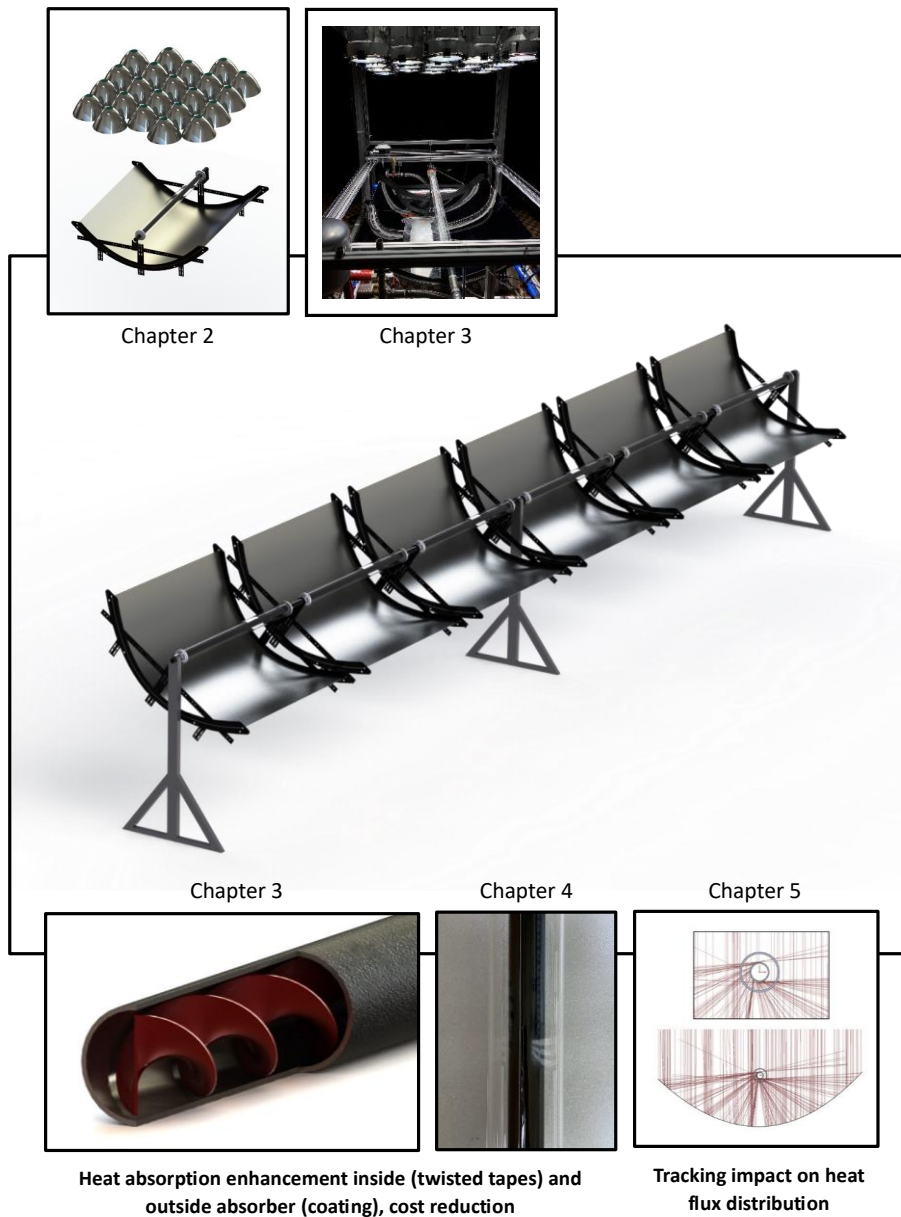
**Rozdział 4** koncentruje się na powłokach nakładanych na zewnętrzne powierzchnie absorberów w celu zwiększenia absorpcyjności, a tym samym efektywności instalacji. Głównym celem wyników przedstawionych w tym rozdziale było określenie możliwości zastąpienia drogich powłok selektywnych, stosowanych zazwyczaj w absorberach liniowych, niedrogimi, ale wysoce pochłaniającymi promieniowanie słoneczne powłokami nieselektywnymi we wstępnych sekcjach absorbera, przy zachowaniu co najmniej tego samego poziomu sprawności instalacji. W celu określenia potencjału takiej koncepcji przeprowadzono analizy dla koncentratorów parabolicznych o różnych geometriach, które odzwierciedlają zróżnicowany charakter ich zastosowania. W celu przeprowadzenia założonych analiz opracowano szczegółowy model wymiany ciepła w koncentratorach, którego procedury obliczeniowe przedstawiono w metodyce badań. Ponadto model został opracowany ze szczególnym uwzględnieniem rozdziału strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni absorbera na postać skoncentrowaną i naturalną. W kolektorach parabolicznych o niskim współczynniku koncentracji rozdział ten znacznie zwiększa dokładność uzyskanych wyników, ze względu na większy udział promieniowania naturalnego w porównaniu do pełnowymiarowych instalacji koncentratorów parabolicznych. Wyniki pokazały, że ze względu na niższy poziom temperatury płynu grzewczego wskazano na duży potencjał aplikacji powłok nieselektywnych. Ponadto zastosowanie taniej powłoki nieselektywnej może zapewnić znaczne obniżenie kosztów inwestycyjnych instalacji i wpłynąć na potencjał rozwojowy systemów koncentrujących energię słoneczną.

**Rozdział 5** dotyczy aspektu śledzenia pozycji słońca. Kolektory paraboliczne, które są jedną z technologii opartych na koncentrowaniu promieniowania słonecznego, wymagają ciągłego śledzenia słońca ze względu na wykorzystanie głównie bezpośredniego promieniowania. Jako aktywny element, tracker słoneczny charakteryzuje się pewną dokładnością pozycjonowania i jest narażony na działanie warunków atmosferycznych, zwłaszcza wiatru. W oparciu o nisko skoncentrowaną geometrię kolektora parabolicznego przeprowadzono szereg analiz optycznych i termodynamicznych w celu określenia maksymalnych odchyłeń pozycjonowania trackera słonecznego, aby uniknąć obniżenia jego sprawności. Do tego celu przyjęto analizę Ray Tracing oraz zaaplikowano model wymiany ciepła. Wyniki mają na celu wskazanie założeń do projektowania układów nadążnych dla parabolicznych koncentratorów o niskim stopniu koncentracji. W badaniu zestawiono również wyniki dla innego sposobu obniżenia kosztów i wagi instalacji, tj. niestosowania szklanej osłony wokół rury absorbera. Omówiono również zwiększony poziom nierównomierności strumienia ciepła na powierzchni absorbera, który ze względu na błąd śledzenia może powodować duże różnice temperatur na powierzchni absorbera, a tym samym wpływać na jego potencjalne uszkodzenie.

W **rozdziale 6** przedstawiono podsumowanie i wnioski.

W rozdziałach od 2 do 5 zwrócono uwagę na najistotniejsze aspekty artykułów od I do IV, które zostały zamieszczone w części aneksowej pełnej rozprawy doktorskiej. Na rysunku 1 przedstawiono graficzną wizualizację zakresu rozprawy.

## Test stand modeling and assembling, experimental evaluation



Rys. 1 Graficzna wizualizacja zakresu rozprawy doktorskiej

### 3. Lista dołączonych publikacji monotematycznych

Rozprawa doktorska bazuje na czterech monotematycznych publikacjach przedstawionych poniżej.

- I. 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, (IF<sub>2021</sub>=**4.672**)

- II. **B. Stanek**, J. Ochmann, D. Węcel, Ł. Bartela\*, *Study of twisted tape inserts segmental application in low-concentrated solar parabolic trough collectors*, *Energies*, Vol. 46, 2023, (IF<sub>2022-2023</sub>=**3.252**)
- III. **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, (IF<sub>2022-2023</sub>=**11.446**)
- IV. **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, (IF<sub>2022</sub>=**8.634**)

\*autor korespondencyjny

Udział autora dysertacji w każdym z wymienionych artykułów wyszczególniono poniżej.

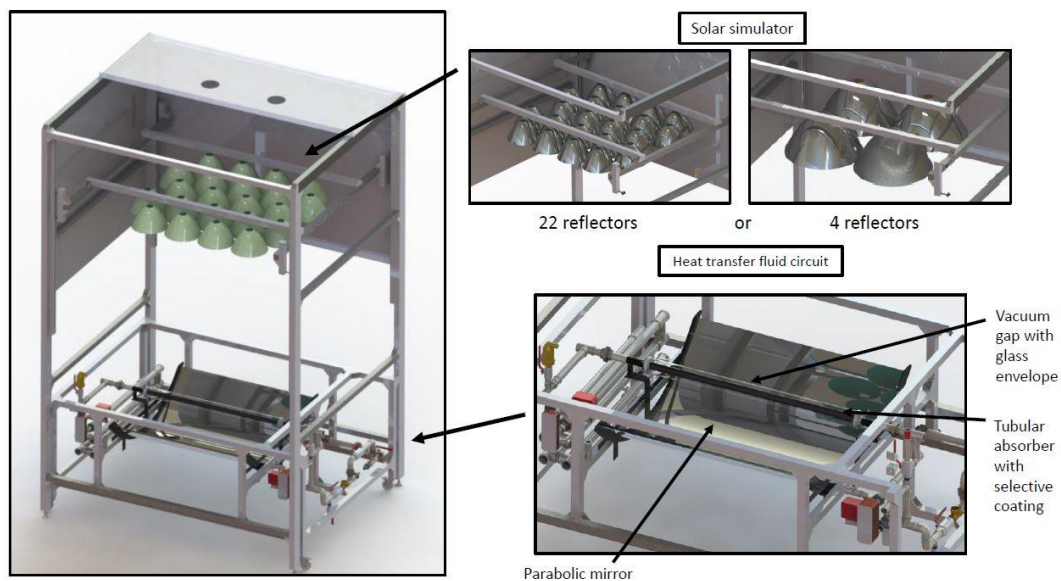
- I. Wkład **Bartosza Stanka** w artykuł polegał na zaplanowaniu i zaprojektowaniu eksperymentalnego stanowiska badawczego, opracowaniu modelu numerycznego do analizy Ray Tracing, przeprowadzeniu kampanii obliczeniowej, analizie wyników, oszacowaniu kosztów symulatora słonecznego, przygotowaniu i złożeniu manuskryptu. Zgodnie z oświadczeniem autora, wkład Bartosza Stanka był równy 55 %.
- II. Wkład **Bartosza Stanka** polegał na przygotowaniu zakresu analizy numerycznej i eksperymentalnej, kompleksowym zaprojektowaniu, skonstruowaniu i zmontowaniu stanowiska do badań eksperymentalnych, opracowaniu metodyki eksperymentalnej, wykonaniu wkładek z taśmy skręcanej, wykonaniu badań eksperymentalnych i walidacji modeli numerycznych, wykonaniu analizy Ray Tracing, sformułowaniu warunków brzegowych dla analizy CFD, przeprowadzeniu analizy długoterminowej, analizie wyników, przygotowaniu manuskryptu. Zgodnie z oświadczeniem autora, wkład Bartosza Stanka był równy 65 %.
- III. Wkład **Bartosza Stanka** polegał na sformułowaniu założeń badawczych i metodyki, opracowaniu modelu matematycznego wymiany ciepła, przeprowadzeniu kampanii obliczeniowej, analizie wyników, przygotowaniu i złożeniu manuskryptu. Zgodnie z oświadczeniem autora, wkład Bartosza Stanka był równy 80 %.
- IV. Wkład **Bartosza Stanka** polegał na przygotowaniu zakresu i założeń do analizy optycznej i termodynamicznej, opracowaniu modeli numerycznych Ray Tracing, przeprowadzeniu kampanii obliczeniowej, analizie wyników, przygotowaniu i złożeniu manuskryptu. Zgodnie z oświadczeniem autora, wkład Bartosza Stanka był równy 65 %.

#### **4. Modelowanie stanowiska eksperymentalnego z symulatorem słonecznym do badań zjawiska absorpcji ciepła w parabolicznym koncentratorze promieniowania słonecznego – Artykuł I**

Rozważane stanowisko badawcze musiało być na tyle wielofunkcyjne, aby mogło być wykorzystane głównie do badania koncentratorów parabolicznych, ale w przyszłości również do badania paneli fotowoltaicznych, dlatego głównym założeniem było, aby źródła światła były

rozmieszczone na jednej płaszczyźnie i oświetlały cel znajdujący się poniżej. Ze względu na wysoki koszt gotowych rozwiązań, które nie mogły być bezpośrednio dostosowane do planowanych badań, zdecydowano się na przeprowadzenie serii badań optyczno-numerycznych w celu wykonania wstępnej analizy mającej na celu sprawdzenie zasadności zastosowania różnych źródeł światła oraz zaprojektowania stanowiska badawczego.

Założono, że oświetlana powierzchnia musi wynosić minimum 1 metr kwadratowy (1x1 m), promieniowanie musi być jak najbardziej równomierne, widmo jak najbardziej zbliżone do promieniowania słonecznego, a promieniowanie doprowadzone do powierzchni absorbera musi odpowiadać około 1000 W/m<sup>2</sup>. Wizualizację stanowiska badawczego z koncentratorem parabolicznym, przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2 Projekt stanowiska badawczego z symulatorem promieniowania do analizy zjawiska absorpcji ciepła w parabolicznym koncentracje promieniowania

Uzyskane wyniki pozwoliły na przeprowadzenie kompleksowej analizy stanowiska badawczego i określenie listy wymaganych elementów, które w sposób jak najbardziej efektywny odtwarzały promieniowanie zbliżone do naturalnego.

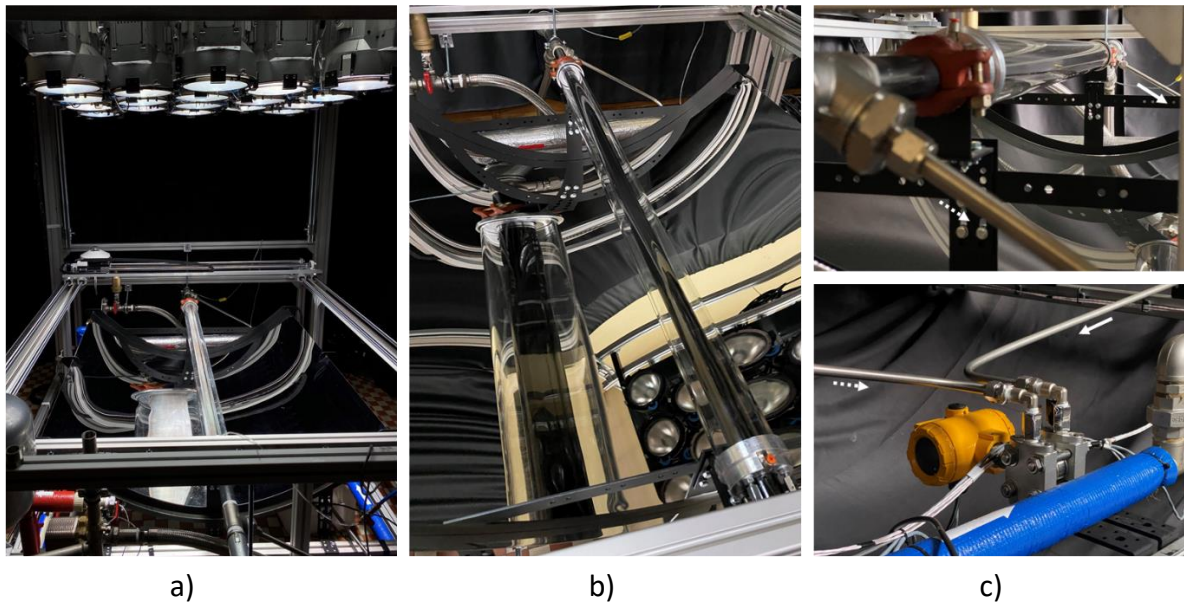
## 5. Intensyfikacja absorpcji ciepła wewnątrz absorbera liniowego poprzez użycie wkładek o kształcie skręconych taśm (Twisted tapes) - Artykuł II

Pierwsza część tego rozdziału została poświęcona doświadczalnemu stanowisku badawczemu, druga - analizie wkładek z taśmą skręcaną.

Kompleksowy proces montażu stanowiska eksperymentalnego można podzielić na wiele etapów, jednak najbardziej wymagające były dwie główne części: symulator promieniowania oraz obieg oleju termalnego z koncentratorem parabolicznym. Ostatecznie, stanowisko składało się z 18 reflektorów ARRI, każdy ze źródłem HMI OSRAM o mocy 575 W, skonfigurowanych jak na rysunku 3. Wszystkie badania przeprowadzono w warunkach stabilnych symulatora słonecznego, po sprawdzeniu stabilności promieniowania emitowanego przez źródła wyładowań, oraz przy zaciemnieniu laboratorium w celu zneutralizowania wpływu

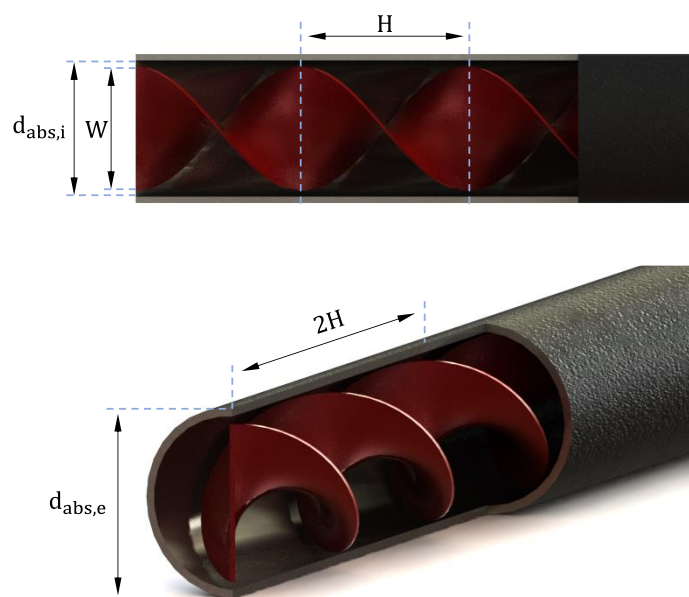


warunków zewnętrznych. Pomiary strumienia ciepła i jego rozkładu były prowadzone okresowo w celu określenia zarówno energii doprowadzanej do powierzchni absorbera, jak i zmian związanych z degradacją źródła. Wszystkie badania zostały wykonane dla stanu ustalonego, co wymagało odpowiedniego czasu na stabilizację termiczną instalacji. Rejestracja danych odbywała się w sposób ciągły w celu określenia stabilności pomiaru. Związana z tym niepewność pomiaru, w każdym przypadku, została obliczona zgodnie z założeniami GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement).



Rys. 3 Stanowisko doświadczalne: a) symulator słoneczny i kolektor paraboliczny, b) absorber liniowy umieszczony w ognisku koncentratora parabolicznego, c) różnicowy przetwornik spadku ciśnienia i jego połączenia przed i za absorberem liniowym

Zastosowanie wkładek zaburzających przepływ wewnątrz absorbera rurowego jest jedną ze znanych metod intensyfikacji odbioru ciepła przez nośnik ciepła. W badaniu przeanalizowano zastosowanie wkładek turbulizujących w układzie segmentowym na długości absorbera w celu zidentyfikowania kombinacji, która maksymalizuje odbiór ciepła i nie powoduje nadmiernego spadku ciśnienia. Taśmy skręcane charakteryzują się prostą budową i potencjalnie największą szansą na wykorzystanie w pętli solarnej ze względu na prostotę aplikacji i procesu produkcyjnego. Miejsce aplikacji wkładki w absorberze liniowym przedstawiono na Rys. 4, gdzie zaznaczono główne parametry geometryczne.



Rys. 4 Absorber liniowy z wkładką z taśmy skręcanej

Wpływ skręconych taśm na instalację ściśle zależy od wielu parametrów, co również ogranicza możliwość przeprowadzenia szerokiej analizy wieloparametrycznej. W przeprowadzonych badaniach przyjęto geometrie i parametry zbliżone do produkowanych instalacji solarnych, które oparte są na parabolicznych koncentratorach i dla tych założeń przedstawiono zasadność ich wykorzystania w danej konfiguracji.

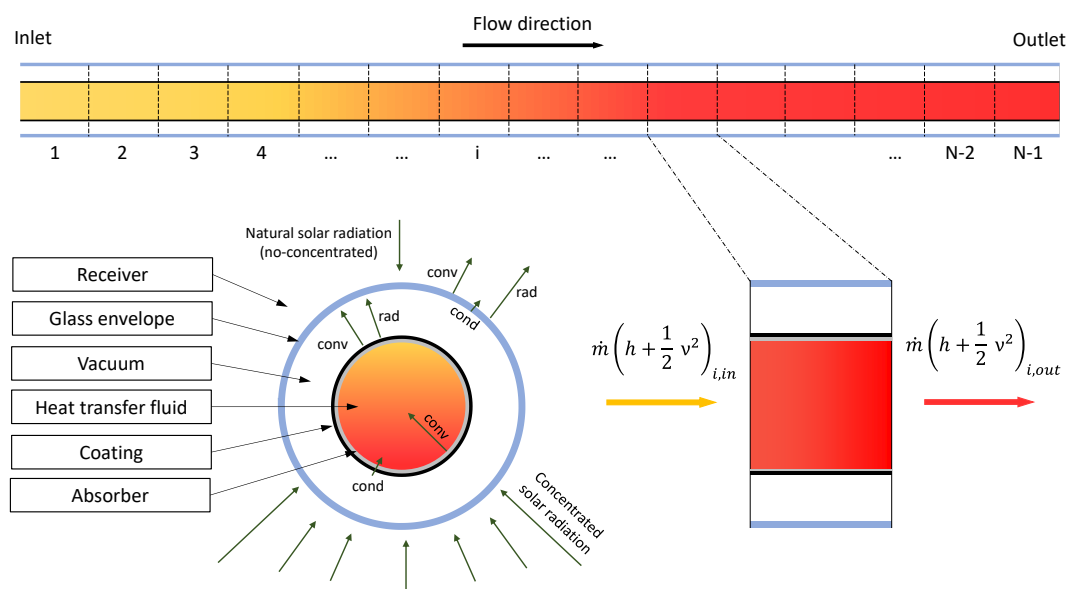
Skręcone taśmy zastosowane wewnątrz pętli absorbera powodują powstanie przepływu wirowego, który charakteryzuje się intensywnym mieszaniem płynu i odrywaniem warstwy przyściennej, a tym samym intensyfikacją odbioru ciepła. Analiza wskazuje na zależności wzrostu liczby Nusselta wraz z malejącym współczynnikiem skręcenia. Wykazano również zmniejszenie różnicy temperatur płynu na obwodzie absorbera, co potencjalnie może wydłużyć okres eksploatacji absorberów i zmniejszyć wewnętrzne naprężenia termiczne w materiale absorbera. W wynikach badań określono maksymalny zakres stosowalności wkładek w analizowanej pętli solarnej, który maksymalizuje efektywność instalacji. Zastosowane rozwiązanie zostało przetestowane poprzez wykonanie analizy długoterminowej, przy zmiennych warunkach pogodowych na podstawie bazy danych pogodowych NREL.

## 6. Segmentowe zastosowanie nieselektywnej powłoki na zewnętrznej powierzchni absorbera w parabolicznych koncentratorach promieniowania - Artykuł III

Zewnętrzna powierzchnia seryjnie produkowanych absorberów liniowych jest zwykle pokryta powłoką selektywną, czyli powłoką o wysokiej absorpcyjności i niskiej emisyjności. Jest to wynik dostosowania standardowych kolektorów parabolicznych do ich odpowiedników w mniejszej skali i zachowania tej cechy konstrukcyjnej. Jednak niższy poziom temperatury występujący w sekcjach początkowych parabolicznych koncentratorów o niskim stopniu koncentracji daje możliwość zastosowania znacznie tańszych powłok, o charakterze nieselektywnym, ale o wyjątkowo wysokiej absorpcyjności, niskiej cenie i prostszym procesie

aplikacji. Analiza możliwości zastosowania tego nie rozważanego wcześniej sposobu postępowania w celu obniżenia kosztów inwestycji, a w niektórych przypadkach zwiększenia efektywności instalacji została przedstawiona w Artykule III.

Narzędziem, które umożliwiło tę analizę był opracowany dwuwymiarowy model wymiany ciepła, szczególnie dla parabolicznych koncentratorów o niskim współczynniku koncentracji. Opracowany zaawansowany model matematyczny uwzględnia takie parametry jak geometria instalacji kolektora parabolicznego, zastosowane materiały oraz ich właściwości termodynamiczne i optyczne, warunki atmosferyczne takie jak natężenie promieniowania słonecznego, temperatura otoczenia i powietrza, położenie słońca oraz prędkość wiatru. W modelu uwzględniono również wpływ błędu pozycjonowania, zabrudzenia lustra i odbiornika, rodzaju powłoki, zaciemnienia i modyfikatora kąta padania. Model wymiany ciepła w odbiorniku obejmuje konwekcję między wewnętrzną powierzchnią absorbera a płynem przenoszącym ciepło, przewodzenie przez rurę absorbera, straty radiacyjne i konwekcyjne między zewnętrzną powierzchnią absorbera (w tym powłoką) a wewnętrzną powierzchnią szklanej osłony, przewodzenie przez szklaną osłonę, straty konwekcyjne i radiacyjne od zewnętrznej szklanej osłony do otoczenia i nieba. Model wymiany ciepła został przedstawiony na Rys. 5.

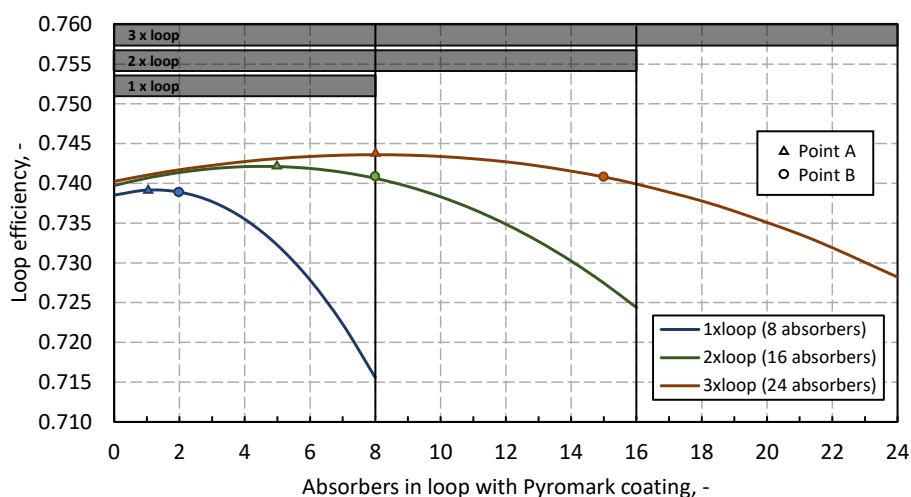


Rys. 5 Dwuwymiarowy model wymiany ciepła w absorberze w układzie parabolicznego koncentratora promieniowania słonecznego

Niezwykle wysoka absorpcyjność niektórych powłok nieselektywnych nakładanych na zewnętrzną powierzchnię absorbera kompensuje straty promieniowania wynikające z wysokiej emisyjności, która jest zależna od temperatury płynu wymiany ciepła i powierzchni absorbera. Optymalizacja stosowania tych powłok jest w dużym stopniu uzależniona od charakteru przepływu, rodzaju płynu do wymiany ciepła, temperatury i współczynnika koncentracji. W artykule III przeanalizowano potencjał aplikacyjny tego rozwiązania dla trzech geometrii PTC o różnych stopniach temperaturowych, odzwierciedlających możliwe zastosowania w procesach przemysłowych oraz jeden przypadek odzwierciedlający pełnowymiarową instalację energetyczną.

Zaletą powłok nieselektywnych, takich jak analizowany Pyromark, jest bardzo prosta metoda aplikacji, w tym przypadku jest to powłoka natryskowa. W porównaniu z wieloetapowym procesem aplikacji powłok selektywnych, wymagającym szeregu drogich urządzeń, potencjał redukcji kosztów inwestycji wydaje się znaczący.

W badaniu analizowano zarówno sprawność absorbera na jego długości, jak i sprawność całej pętli słonecznej, składającej się z kilku absorberów. Pierwsze wyniki wykazały potencjał w zastosowaniu nieselektywnej powłoki do zakresu temperatury płynu grzewczego około 115 °C dla pojedynczej pętli słonecznej o długości do 45 metrów. Jednocześnie wyniki zależały głównie od powłoki referencyjnej i przyjętego rodzaju przepływu, zgodnie z odpowiednimi instalacjami przemysłowymi. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki, w których temperatura na wlocie do pętli słonecznej wynosiła 100 °C, a minimalna zakładana temperatura na wylocie 200 °C. Analizę przeprowadzono dla  $G_B=800 \text{ W/m}^2$  i trzech różnych długości instalacji solarnej składającej się z 8, 16 lub 24 absorberów. Aby uzyskać minimalną pożądaną temperaturę dla tych samych warunków, należało dostosować odpowiedni przepływ masowy. Zastosowanie powłoki Pyromark we wstępnych sekcjach absorberów początkowo zwiększa sprawność pętli słonecznej, ale przy zbyt dużej ilości absorberów sprawność spada poniżej wartości referencyjnej. Punkty A i B, odpowiednio, określają punkty operacyjne, które maksymalizują sprawność i maksymalizują liczbę absorberów przy zachowaniu sprawności wyższej od wartości referencyjnej. Wykazano, że dla analizowanych warunków można zastosować tanią powłokę nieselektywną w maksymalnie 25%, 50% i 62,5% absorberów. Wyniki pokazały duży potencjał aplikacyjny tej metody jednocześnie wykazując jej dużą zależność od parametrów pracy.



Rys. 6 Solar loop efficiency as a function of number of absorbers with no-selective coating, results for selected case

## 7. Ocena wpływu odchylenia systemu nadążnego na sprawność parabolicznego koncentratora promieniowania - Artykuł IV

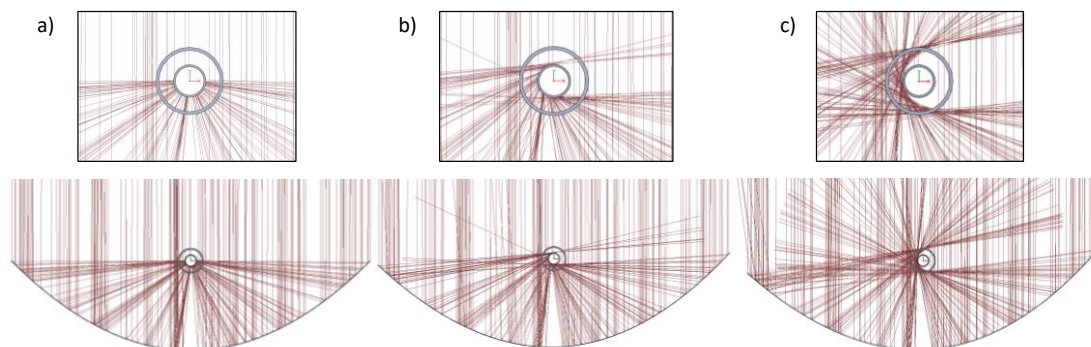
Ponieważ w instalacjach CSP wykorzystywane jest głównie bezpośrednio promieniowanie słoneczne, prawidłowa koncentracja promieniowania słonecznego jest procesem kluczowym dla osiągnięcia wysokiej sprawności. Dlatego w artykule IV podjęto decyzję o analizie tego

zjawiska i zbadaniu wpływu potencjalnego błędu, jaki może wystąpić w przypadku trackera słonecznego, który jest podatny na warunki atmosferyczne, zwłaszcza wiatr. Niniejsze badania mają na celu udzielenie odpowiedzi na następujące pytanie.

- Jaki jest maksymalny błąd trackera, który nie wpływa na działanie instalacji?
- Jaki jest wpływ pozycjonowania na sprawność nisko skoncentrowanych koncentratorów parabolicznych?
- Jak błąd śledzenia wpływa na rozkład promieniowania na powierzchni absorbera?

Wpływ błędu śledzenia słońca został zbadany przy użyciu oprogramowania APEX do śledzenia promieni optycznych Monte Carlo, które wykorzystuje dwukierunkową funkcję rozkładu odbicia (BRDF) do opisu zachowania wiązki odbitej. Metoda ta umożliwia śledzenie energii towarzyszącej każdemu promieniowi oraz obliczenie całkowitego strumienia i rozkładu na wybranej powierzchni, w tym przypadku zewnętrznej powierzchni absorbera. Funkcja BRDF opisuje formę, w jakiej światło padające na daną powierzchnię jest rozpraszane. Metoda ta uwzględnia właściwości materiałowe poszczególnych części, w tym współczynnik odbicia, transmisyjność i absorpcyjność.

Zmiana położenia lustra parabolicznego względem bezpośrednich promieni słonecznych przesuwa punkt skupienia osi absorbera, w jednym kierunku, co widać na rysunku 7. Niektóre promienie są skupiane nierównomiernie na powierzchni rurkowego absorbera, a inne całkowicie omijają jego powierzchnię. Wybrane wyniki graficznie wizualizują promienie świetlne, które po odbiciu od zwierciadła parabolicznego całkowicie omijają powierzchnię absorbera dla odchylenia trackera wynoszącego 4°. Zwykły rozkład strumienia ciepła na powierzchni absorbera generuje niejednorodny rozkład promieniowania, ale jednak taki, który ma swoją oś symetrii. W przeprowadzonych badaniach wykazano, że błąd położenia trackera generuje obszary o bardzo dużych wartościach strumienia ciepła.



Rys. 7 Ścieżka promieniowania słonecznego dla wybranego błędu trackera przedstawionego w przekroju, odchylenie położenia trackera: a) 0° (pozycja idealna), b) 2°, c) 4°

## 8. Podsumowanie i wnioski

Rozprawa doktorska oparta jest na czterech głównych monotematycznych publikacjach autora w następujących czasopismach: Artykuł I - *International Journal of Energy Research (publ. Wiley & Sons)*, Artykuł II - *Energies (publ. MDPI)*, Artykuł III - *Applied Energy (publ. Elsevier)*, Artykuł IV - *Renewable Energy (publ. Elsevier)*.

Głównym celem pracy było rozpoznanie zjawiska absorpcji ciepła w parabolicznym koncentratorze promieniowania oraz określenie metod intensyfikacji absorpcji ciepła poprzez analizę wybranych elementów PTC. W rozprawie podstawowym przedmiotem zainteresowania badawczego były koncentratory paraboliczne o niskich współczynnikach koncentracji, które mogą produkować ciepło z potencjałem do wykorzystania w procesach przemysłowych.

Działaniami badawczymi, które umożliwiły realizację celu rozprawy było opracowanie modelu przepływu ciepła w absorberze liniowym, opisanie tego modelu zbiorem równań matematycznych, stworzenie modeli dwu- i trójwymiarowych oraz opracowanie modelu optycznego zjawiska koncentracji promieniowania na zewnętrznej powierzchni absorbera rurowego. Walidacja opracowanych rozwiązań była możliwa dzięki przeprowadzeniu serii badań eksperymentalnych na stanowisku badawczym, gdzie za pomocą symulatora słonecznego badano koncentrator paraboliczny z wieloma absorberami. Stworzone w ramach pracy doktorskiej stanowisko do badań eksperymentalnych zostało kompleksowo zaprojektowane i wykonane przez autora niniejszej pracy.

Prace badawcze nad analizą wydajności kolektorów z koncentratora parabolicznego rozpoczęto prowadząc jednocześnie dwa działania badawcze. Pierwszy obejmował analizę i dogłębne zrozumienie procesu koncentracji promieniowania na zewnętrznej powierzchni absorbera oraz zjawiska pochłaniania tego ciepła w absorberach liniowych. Dane wynikające z tej analizy wpłynęły bezpośrednio na równoległe działania badawcze, jakim było określenie założeń i zaprojektowanie stanowiska do badań eksperymentalnych nad wspomnianym wcześniej zjawiskiem absorpcji ciepła.

W artykule I zawartym w rozprawie przedstawiono proces projektowania stanowiska badawczego, który rozpoczął się od analizy i wyboru rodzaju źródła światła, z uwzględnieniem widma promieniowania, jak również charakterystyki pracy. W analizie uwzględniono, trzy potencjalne źródła: halogenowe, metalohalogenkowe oraz lampę ksenonową. Pod względem, rozkładu spektralnego i charakteru emisji promieniowania odrzucono halogen, a do dalszych rozważań przyjęto potencjalne źródła metalohalogeny i ksenonowe lampy łukowe. Na tym etapie badań, biorąc pod uwagę zakładaną powierzchnię oświetlaną co najmniej 1 m<sup>2</sup> oraz różnorodność dostępnych na rynku źródeł HMI i Xenon, rozważano zastosowanie i odpowiednie rozmieszczenie odbłyśników z różnymi powłokami. Wybrano dwie geometrie, jedną dla HMI i jedną dla xenonu, biorąc pod uwagę założoną geometrię koncentratora parabolicznego i absorbera oraz możliwe odbłyśniki i ich kompatybilność ze źródłami światła. Kolejnym etapem było modelowanie układu optycznego za pomocą oprogramowania APEX, które bazuje na metodzie Monte Carlo Ray Tracing. Analiza wykazała, że dla obu przypadków część symulowanego promieniowania ma charakter rozproszony i po odbiciu od zwierciadła parabolicznego nie docierała do absorbera, co podkreśliło konieczność przewymiarowania źródeł światła w celu uzyskania wystarczającego strumienia ciepła. Ustalono, że najlepsze warunki symulacji promieniowania uzyskano dla przypadku, w którym rozpatrywano 22 sztuki

400 W HMI. Z analizy wynika, że symulacja układów optycznych zależy od wielu parametrów, a każdy z nich wpływa na charakter symulowanego promieniowania. Zastosowanie większej liczby mniejszych reflektorów ze źródłami metalohalogenkowymi pozwala na uzyskanie większego strumienia energii odbitego od zwierciadła koncentratora i docierającego do rury absorbera. Na etapie planowania stanowiska badawczego (2019/2020) koszt symulatora słonecznego szacowany był na około 20 000 euro.

Kolejnym etapem prac była kompleksowa budowa stanowiska badawczego, w którym absorbery w układzie parabolicznych koncentratorów, mogły być badane w stałych i powtarzalnych warunkach. Był to najbardziej czasochłonny etap prac, ponieważ trwał łącznie około 3 lat. Ostatecznie na stanowisku wykorzystano 18 źródeł HMI 575 W z tej samej serii, co źródła badane w testach optycznych przedstawione w pierwszej części pracy. Analizy optyczne zostały powtórzone dla większej mocy źródła i mniejszej liczby reflektorów i potwierdziły możliwość zastosowania tej konfiguracji. Stanowisko doświadczalne podzielone było na 2 części, symulator promieniowania słonecznego oraz paraboliczny koncentrator. Promieniowanie padające na zewnętrzną powierzchnię absorbera liniowego odpowiadało wartości promieniowania naturalnego  $990 \text{ W/m}^2$ . Wyniki przeprowadzonego cyklu analiz miały na celu walidację opracowanych równolegle modeli numerycznych opisujących proces wymiany ciepła w parabolicznych koncentratorach promieniowania. Badania przeprowadzono dla warunków ustabilizowanych, gdzie uwzględniono intensyfikację odbioru ciepła poprzez np. wpływ powłok na sprawność absorbera, a także zastosowanie różnych wkładów wewnątrz absorbera liniowego po stronie płynu grzewczego. Wyniki walidacji wykazały wysoką zgodność pomiędzy modelami i badaniami eksperymentalnymi.

Jednocześnie opracowano modele matematyczne parabolicznych koncentratorów promieniowania. Zaproponowany model matematyczny został specjalnie dostosowany do instalacji nisko skoncentrowanych poprzez oddzielne rozpatrywanie promieniowania skoncentrowanego i nieskoncentrowanego.

Pod względem analizy pochłaniania ciepła przez absorber można wyróżnić badania skupiające się na części wewnętrznej i zewnętrznej absorbera liniowego. Wewnątrz absorbera skupiono się na zastosowaniu taśm skręconych, wprowadzających przepływ wirowy, którego efektem jest intensywne mieszanie płynu do wymiany ciepła wewnątrz absorbera rurowego oraz intensywniejszy odbiór ciepła z wewnętrznych ścian absorbera. Rozpatrywano taśmy skręcone o współczynnikach skręcenia 1, 2 i 4, gdzie średnica absorbera odpowiadała instalacji produkujących ciepło do zastosowań przemysłowych. Zakres temperaturowy przeprowadzonych analiz mieścił się w założeniach ciepła dla procesów przemysłowych i zawierał się w przedziale od  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Analizy wykazały, że każda z rozważanych wkładek powoduje intensyfikację odbioru ciepła, wzrost sprawności oraz zmniejszenie maksymalnych wartości szczytowych temperatury, co wpływa na zmniejszenie naprężenia w instalacji. Dla analizowanych wyników optymalizacja wykazała, że najbardziej optymalne jest zastosowanie wkładki o współczynniku skręcenia 1 do temperatury płynu termicznego  $190 \text{ }^\circ\text{C}$ , a współczynnika skręcenia 2 dla wyższych temperatur. Wyniki analizy numerycznej zostały zastosowane do modelu matematycznego w celu weryfikacji długoterminowego wpływu tego rozwiązania na sprawność instalacji PTC. Badanie zostało wykonane dla lokalizacji w południowej Hiszpanii, aby podkreślić możliwość zastosowania nisko skoncentrowanego PTC dla ciepła przetwarzanego przemysłowo w lokalizacjach o wyjątkowo wysokim potencjale zastosowania. Analiza została przeprowadzona z częstotliwością 1-godzinną, z uwzględnieniem zmiennych warunków pogodowych, dla pętli słonecznej o długości 90 metrów. Oprócz 12-

miesięcznej analizy dla całego roku, przedstawiono wyniki dla trzech wybranych dni. Średni wzrost sprawności systemu wyniósł 0,27%, uwzględniając straty ciśnienia w instalacji oraz większą moc zapotrzebowaną na potrzeby własne. Przeprowadzone badania ograniczają się do analiz termodynamicznych. W badaniach nie uwzględniono oceny kosztu skręconych taśm oraz potencjalnie wyższego kosztu zakupu pompy do cyrkulacji płynu, co stanowi potencjał do dalszych badań nad zastosowaniem tej metody zwiększania odbioru ciepła. Analiza została przeprowadzona dla konkretnego płynu termicznego i geometrii PTC. Zmiana niektórych parametrów może znacząco wpłynąć na optymalne możliwości zastosowania skręconych taśm, dlatego w przyszłych pracach można przeprowadzić szerszą analizę.

Po zewnętrznej stronie absorbera zbadano zastosowanie wcześniej nieuwzględnionej powłoki nieselektywnej, która charakteryzuje się wysoką absorpcyjnością, ale również wysoką emisyjnością. Jako przykład w badaniach wykorzystano powłokę Pyromark, która również została zastosowana na absorberze w stanowisku badawczym. Motywacją do przeprowadzenia badań nad powłokami był stosunkowo wysoki koszt powłok selektywnych, które nakładane są metodami wieloetapowymi, co zwiększa ich koszt, a także, ze względu na możliwość zastosowania powłok nieselektywnych we wstępnych odcinkach pętli absorberów. W analizie uwzględniono wiele współczynników koncentracji i temperatur, aby zapewnić wstępną ocenę możliwości wykorzystania tej powłoki do różnych zastosowań w instalacjach produkujących ciepło dla procesów przemysłowych. Wstępne analizy wskazywały na brak możliwości zastosowania powłoki nieselektywnej w instalacji pełnowymiarowej, co podkreśla powód, dla którego nie rozważano wcześniej takiego rozwiązania. Badane geometrie i parametry pracy, odzwierciedlały w całości lub były bardzo zbliżone do rozwiązań stosowanych w przemyśle. Dla przypadku, gdy apertura wynosiła 1 metr, analiza wykazała, że powłoka nieselektywna może być zastosowana w całym obiegu solarnym. W tym przypadku rozpatrywano zakres niskich temperatur płynu do wymiany ciepła 60 - 120 °C. Układ PTC o średnim zakresie temperatur i współczynniku koncentracji 17,3 wykazał możliwość optymalizacji dla absorberów, w których temperatura płynu wynosi do 115°C. Zmiana połączenia 3 równoległych pętli solarnych na 1 szeregową zwiększa możliwość optymalizacji liczby absorberów. W najlepszym optymalnym przypadku (800 W/m<sup>2</sup>) 15 z 24 absorberów można pokryć powłoką Pyromark zamiast referencyjnej powłoki selektywnej. Cena powłoki Pyromark dla absorberów została oszacowana na 12,8 \$/m<sup>2</sup>. W przyszłych analizach warto rozważyć inne powłoki nieselektywne i wykazać możliwości ich zastosowania w celu obniżenia kosztów inwestycyjnych. W niniejszej analizie przeprowadzono analizę przypadków dla założenia, w którym przepływ masowy jest regulowany w zależności od parametrów warunków atmosferycznych, aby osiągnąć dany poziom temperatury. W przyszłych pracach, które zostały już częściowo wykonane, jak wspomniano w rozprawie, można rozważyć przypadek, w którym przepływ masowy jest stały, a temperatura na wylocie zależy od warunków pogodowych. Następnie można zastosować dodatkowe źródło ciepła, które dogrzewa dany płyn grzewczy do pożądanych parametrów. Potencjał aplikacyjny tego rozwiązania jest szeroki, co umożliwi również szeroki zakres przyszłych badań.

Analizą wartą rozważenia w przyszłości jest zastosowanie obu metod jednocześnie: segmentowego pozycjonowania skręconych taśm oraz segmentowego nakładania powłoki nieselektywnej w pętli absorbera.

Ostatni parametr rozpatrywany w rozprawie miał na celu określenie wpływu odchylenia trackera słonecznego na sprawność PTC. Zastosowane oprogramowanie optyczno-inżynierskie umożliwiło wyznaczenie ścieżek rozchodzenia się promieni oraz analizę oświetlanej



powierzchni z uwzględnieniem wpływu poszczególnych elementów optycznych i ich właściwości. Maksymalne odchylenie kątowe pozycjonowania trackera słonecznego dla badanej geometrii, nie wpływające znacząco na pracę absorbera liniowego dla średnicy 33,7 mm odnotowano jako 1,5°, dla 21,3 mm - 0,9°. Stwierdzono, że zwiększenie współczynnika koncentracji poprzez zmniejszenie średnicy absorbera zwiększa wrażliwość systemu na błędy optyczne. Dla średnicy absorbera 33,7 mm odchylenie śledzenia o 3° powoduje spadek współczynnika koncentracji napromienienia z 7,36 do 3,92. Dla mniejszej średnicy absorbera obliczono zmniejszenie z 11,81 do 5,4 dla odchylenia 2°. Maksymalna odchyłka śledzenia dla średnic 33,7 mm i 21,3 mm oraz analizowanej geometrii wynosiła odpowiednio 4,5° i 2,7°. Przy wyższych wartościach promienie słoneczne w ogóle nie skupiają się na powierzchni absorbera. W analizowanych kolektorach parabolicznych o większych odchyleniach śledzenia promieni słonecznych można zaobserwować większe różnice w wartościach skoncentrowanego strumienia ciepła docierającego do powierzchni absorbera, co może powodować większe gradienty temperatury w absorberze i gorsze przekazywanie ciepła z wewnętrznej ścianki absorbera do czynnika obiegowego, ale także powodować duże naprężenia w materiale absorbera. Dla 1000 W/m<sup>2</sup> i odchylenia śledzenia 2°, największa wartość skupionego promieniowania dla absorbera 33,7 mm, wzrasta z 17,5 kW/m<sup>2</sup> do prawie 32 kW/m<sup>2</sup>. Uzyskane wyniki podkreślają potrzebę zastosowania wysoce dokładnego systemu śledzenia położenia słońca nawet dla technologii solarnych o niskiej koncentracji. Potencjalne przyszłe prace związane z procesem śledzenia słońca mogłyby polegać na optymalizacji kształtu lusterek parabolicznych i/lub zastosowaniu drugiego lustra o optymalnej geometrii, które wyeliminowałyby tak dużą wrażliwość układu optycznego na odchylenia w ustawieniu trackera, co mogłoby również zwiększyć wykorzystanie promieniowania niebezpośredniego i częściowo rozproszonego.

Podsumowując, w ramach obszernych badań zrelacjonowanych w niniejszej rozprawie przedstawiono metody analizy parabolicznych koncentratorów promieniowania, przede wszystkim o niskich współczynnikach koncentracji, metody intensyfikacji odbioru ciepła po wewnętrznej i zewnętrznej stronie absorbera liniowego, a także optymalizację tych metod dla wybranych konfiguracji oraz znaczenie funkcji śledzenia położenia słońca w aspekcie procesu koncentracji. Przedstawiono również metodykę kompleksowego projektowania symulatorów promieniowania słonecznego umożliwiającą badanie koncentratorów parabolicznych w stałych i powtarzalnych warunkach.

Doświadczenie autora związane z projektowaniem i budową symulatorów promieniowania słonecznego owocuje obecną współpracą z naukowcami z Solar Group w KTH Royal Institute of Technology, gdzie autor niniejszej rozprawy wykorzystuje zdobyte doświadczenie i współprojektuje symulator do testowania paneli fotowoltaicznych. Na początku 2023 roku autor rozprawy podjął również współpracę z pracownikiem naukowym z University for Continuing Education Krems. W ramach tej współpracy przeprowadzono wstępne badania procesu kalcynacji słonecznej na stanowisku badawczym. Całokształt zdobytych doświadczeń spowodował zaangażowanie autora w analizy związane z magazynowaniem energii, tematem komplementarnym do produkcji energii odnawialnej, co w przyszłości może stanowić solidną podstawę do dalszych analiz w tym kierunku.

