

prof. dr hab. Artur Maciąg  
Politechnika Świętokrzyska  
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7  
25-314 Kielce  
tel. 41 34 24 362  
e-mail maciąg@tu.kielce.pl

WPLYNĘŁO DNIA	
.....15.06.2022.....	data
Kierownik administracyjny	
.....	nr pisma
..... podpis	

Kielce 07.06.2022r.

*mgr Kamila Czerniak*

**Recenzja pracy doktorskiej mgr. inż. Wojciecha Judta pt. „Analiza procesu wymiany ciepła uzyskiwanego ze spalania paliw stałych w warunkach nieruchomego źródła”  
(recenzja wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej na podstawie uchwały z dnia 22.04.2022r.)**

### **Podstawa prawna opracowania**

- Ustawa z dnia 20 lipca 2018r. prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi zmianami),
- Ustawa z dnia 3 lipca 2018r. przepisy wprowadzające ustawę – prawo o szkolnictwie wyższym i nauce,
- Ustawa z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami),
- Umowa o dzieło nr 0600/2022/114 zawarta z Politechniką Poznańską reprezentowaną przez dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP, Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej.

### **1. Ogólna charakterystyka doktoranta**

Magister inżynier Wojciech Judt odbył w latach 2012 - 2016 studia na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn (specjalność: Technika Ciepła) uzyskując tytuł inżyniera. Praca dyplomowa nosiła tytuł *Analiza pola temperatury w kotle Q-EKO 15 kW uzyskanego metodami eksperymentalnymi i numerycznymi*. Praca ta została wyróżniona w konkursie Federacji Stowarzyszeń Naukowo-technicznych NOT Rada w Poznaniu w obszarze techniki oraz organizacji produkcji i usług w 2017 roku. W roku 2017 doktorant ukończył studia magisterskie na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn (specjalność: Energetyka Ciepła). Praca nosiła tytuł *Analiza numeryczna powstawania tlenków azotu ze spalania węgla w kotłach małej mocy*. Już zatem od rozpoczęcia studiów stopnia pierwszego mgr inż. Wojciech Judt rozważa zagadnienia związane z analizą i modelowaniem procesów przepływu

ciepła w urządzeniach energetycznych. Od uzyskaniu stopnia magistra miejscem pracy Doktoranta pozostaje Politechnika Poznańska na stanowisku asystenta.

Otwarcie przewodu doktorskiego w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn nastąpiło 11.02.2019r. Tytułem jest *Analiza procesu wymiany ciepła uzyskiwanego ze spalania paliw w warunkach nieruchomego złoża*. Rolę promotora pełni dr hab. inż. Rafał Urbaniak. Funkcję promotora pomocniczego powierzono dr inż. Magdzie Joachimiak (obecnie dr hab.).

## 2. Zakres tematyczny pracy doktorskiej oraz ocena celowości podjęcia tematu

Redukcja zużycia energii, a co za tym idzie ograniczenie oddziaływania sektora energetycznego na środowisko naturalne, wydaje się kluczowe z punktu widzenia współczesnych uwarunkowań ekonomicznych oraz rosnących kosztów pozyskiwania energii. Istniejące analizy pokazują znaczne rezerwy w zakresie poprawy efektywności urządzeń wytwarzających energię. W szczególności dotyczy to efektywności powszechnie wykorzystywanych kotłów spalających paliwa stałe o mocy cieplnej poniżej 500 kW. Korzyści płynące ze zwiększenia efektywności energetycznej są bezdyskusyjne i dotyczą nie tylko ograniczenia zużycia paliw ale również ograniczenia emisji zanieczyszczeń. Jedno i drugie przekłada się na ograniczenie kosztów produkcji energii. W tym kontekście określenie celu pracy jako **ocenę możliwości poprawy efektywności energetycznej instalacji wyposażonych w kotły na paliwa stałe, realizujących spalanie w nieruchomym złożu dla zróżnicowanych warunków eksploatacyjnych** wydaje się w pełni zasadne. Cel główny determinował przyjęcie trzech celów szczegółowych, które Autor określił jako:

- określenie, jaki wpływ na procesy przepływu ciepła ma charakter przepływu gazów spalinowych przez wymienniki ciepła,
- stwierdzenie, jaki wpływ na zachodzące procesy przepływu ciepła ma zmieniające się obciążenie cieplne instalacji ciepłowniczych,
- wyznaczenie wpływu zastępowania spalania stałych paliw pierwotnych przez stała paliwa odnawialne na zachodzące w instalacjach ciepłowniczych procesy przepływu ciepła.

W pracy zaprezentowano badania dla trzech instalacji ciepłowniczych, wykorzystywanych w sektorze przemysłowym oraz indywidualnym, których celem było określenie możliwości poprawy efektywności energetycznej tych instalacji.

Pierwszą z nich jest instalacja przemysłowa, wykorzystywana w przemyśle spożywczym, zawierająca modułowy wymiennika ciepła (ekonomizer), którego zadaniem jest odzysk ciepła gazów spalinowych. Należy zwrócić uwagę, że wymiennik zaprojektowano tak, aby uzyskać zmienną powierzchnię wymiany ciepła. Osiągnięto to dzięki zmiennej liczbie pracujących sekcji wymiennika. Drugą jest instalacja stosowana w ogrzewnictwie indywidualnym wyposażona w komorę dopalającą. Trzecią instalację zaprojektowano w celu uzyskania danych eksperymentalnych mających na celu weryfikację modelu numerycznego. Autor rozważa dwa rodzaje paliw. Jest to węgiel kamienny (ekogroszek) oraz pallet drzewny.

### 3. Ocena rozprawy doktorskiej

Mgr inż. Wojciech Judt przedstawił do oceny rozprawę doktorską mającą formę spójnego tematycznie zbioru trzech artykułów naukowych, opublikowanych w czasopismach notowanych w Journal Citation Reports. Osiągnięcie naukowe Doktoranta, zawarte w tych artykułach opisano szczegółowo w Autoreferacie, zamieszczając przy tym same artykuły. Autoreferat zawiera ponadto:

- dane osobowe doktoranta,
- wyszczególnienie posiadanych dyplomów, stopni zawodowy oraz odbytych szkoleń,
- przebieg dotychczasowego zatrudnienia,
- uzasadnienie podjęcia tematu,
- opis wkładu w rozwój dyscypliny naukowej,
- omówienie innych osiągnięć Doktoranta (prace na rzecz przemysłu, zgłoszenia patentowe, osiągnięcia dydaktyczne i organizacyjne, nagrody),
- bibliografię,
- poświadczony przez współautorów udział Doktoranta w artykułach naukowych.

#### 3.1. Omówienie artykułów wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

W skład osiągnięcia naukowego wchodzi trzy artykuły naukowe, które omówiono niżej.

**Judt W., Bartoszewicz J., Analysis of fluid flow and heat transfer phenomenon in a modular heat exchanger, Heat Transfer Engineering, vol. 42, is. 3-4, 2021 (opublikowano online w 2019), DOI: 10.1080/01457632.2019.1699291**

Artykuł zawiera badania dotyczące możliwości poprawy efektywności energetycznej kotła wykorzystywanego do produkcji pary technologicznej w zakładzie przemysłowym. Analizowano poprawę efektywności związanej z wykorzystaniem ekonomizera, który odzyskuje ciepło spalin. Odzyskane ciepło wykorzystywane jest przy realizacji innego procesu w tym zakładzie (podgrzewanie oleju). Przy projektowaniu wymiennika obliczenia oparto na równaniach kryterialnych. W celu ochrony instalacji założono temperaturę spalin powyżej wodnego i kwasowego punktu rosy. Aby umożliwić regulację strumienia ciepła zaprojektowano modułową konstrukcję. Dzięki temu możliwa jest zmiana efektywnej powierzchni wymiany ciepła. Maksymalny strumień ciepła odzyskanego określono na poziomie około 150 kW. Symulacje numeryczne wykonano z wykorzystaniem metod obliczeniowych CFD dla eksploatacji wymiennika z mocą nominalną. Obejmowały one trzy etapy. Pierwszy dotyczył przypadku pracy wymiennika w stanie stacjonarnym, dla którego analizowano rozkład prędkości przepływu oraz temperaturę spalin. Obliczenia prowadzono na zgrubej siatce z zastosowaniem modelu turbulencji  $k-\epsilon$ . Drugi etap dotyczył również przypadku stacjonarnego. Wykonano bardziej szczegółowe analizy dla dwóch sąsiadujących ze sobą sekcji wymiennika, z wykorzystaniem siatki o większej ilości elementów dla modelu turbulencji  $k-\omega$  SST, który pozwala na lepsze odwzorowanie warunków dla warstwy przyściennej. Przypadek niestacjonarny stanowił trzeci etap obliczeń, które

wykonywano dla trzech kroków czasowych 0,15, 0,20 oraz 0,25 sekund. Rozważania w pracy zilustrowano wieloma poglądowymi rysunkami, które ułatwiają lekturę. Przedstawiono schemat instalacji ciepłowniczej z dodatkowym wymiennikiem modułowym oraz schemat samego ekonomizera. Na rysunkach zamieszczono również rozkłady temperatury oraz prędkości uzyskane w wymienniku. Dodatkowo zamieszczono wykresy rozkładów temperatury oraz prędkości przepływu spalin między rzędami rur w pęczku dla okresowej części wymiennika.

Czasopismo Heat Transfer Engineering indeksowane jest w JCR. Posiada IF = 2,172 oraz 70 punktów. Deklarowany i potwierdzony podpisem współautora udział Doktoranta w pracy jest bardzo wysoki i stanowi 90%.

**Judt W., Ciupek B., Urbaniak R., Numerical study of a heat transfer process in a low power heating boiler equipped with afterburning chamber, Energy, vol. 196, 2020, DOI: 10.1016/j.energy.2020.117093**

Drugi etap badań Doktoranta koncentrował się wokół analizy pracy kotła wyposażonego w dodatkową komorę dopalającą. Był to kocioł małej mocy na paliwo stałe. Spaliny pochodzące z komory głównej zawierają frakcje palne. Zadaniem komory dopalającej jest uzyskanie energii ze spalania tych frakcji. Spaliny dostarczane są do komory dopalającej z jednej strony bezpośrednio z komory głównej oraz dodatkowo poprzez komorę łączącą pierwszy i drugi ciąg kotła. Przepływ spalin przez bezpośredni kanał łączący komorę główną z komorą dopalającą może być ograniczony. Stosowano dławienie na poziomie 50%, obserwując jego wpływ na temperaturę spalin opuszczających kocioł, wielkość strumienia masy spalin oraz na straty ciśnienia. Badania prowadzono dla obciążenia kotła na poziomie 30% oraz 100% mocy nominalnej. Wynika to z faktu sezonowego obciążenia kotła. Symulacje numeryczne prowadzono w programie Fluent Meshing, z wykorzystaniem elementów siatki typu polyhedral (element wielościenne). Podczas pracy urządzenia z mocą nominalną zaobserwowano w wyniku dławienia obniżenie temperatury spalin opuszczających kocioł o 7 °C co przekłada się na wzrost sprawności o około 4%. Efektu takiego nie odnotowano podczas obciążenia kotła na poziomie 30%. Pracę zilustrowano schematem konstrukcji kotła oraz schematem przepływu spalin przez komorę wymiennikową. Zamieszczono rozkłady temperatury i prędkości przepływu spalin w tej komorze.

Czasopismo Energy indeksowane jest w JCR. Posiada IF = 7,147 oraz 200 pkt. Deklarowany i potwierdzony podpisami współautorów udział Doktoranta w pracy jest bardzo wysoki i stanowi 85%];

**Judt W., Numerical and Experimental Analysis of Heat Transfer for Solid Fuels Combustion in Fixed Bed Conditions, Energies, vol. 13, is. 22, pp. 6141: 1-18, 2020, DOI: 10.3390/en13226141**

Trzecia publikacja stanowi kontynuację badań dwóch wcześniejszych. Jej celem była analiza wymiany ciepła podczas spalania różnych paliw stałych w przypadku stacjonarnym. Był to węgiel kamienny (ekogroszek) oraz biomasa w postaci pelletu. Pracę podzielono na dwa etapy. Pierwszym było wykonanie eksperymentu, dla celów którego zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze.

Należy podkreślić, że projekt cylindrycznej komory spalania jest autorski. Z uwagi na trudności w przypadku poziomu mocy komory badawczej równej 30% mocy nominalnej urządzenia badania przeprowadzono dla poziomu 50% oraz mocy nominalnej. Stanowisko badawcze zaprojektowano w taki sposób aby możliwy był pomiar temperatury spalin w różnych odległościach od palnika (co dziesięć centymetrów wzdłuż wysokości komory) oraz dla różnej głębokości wprowadzenia czujnika temperatury do komory spalania. Rozważano łącznie 84 punkty pomiarowe. Oprócz pomiarów temperatury dokonano również pomiarów składu spalin (obserwowano zawartość tlenu oraz dwutlenku węgla) oraz emisji pyłu. Wyniki uzyskane dzięki stanowisku badawczemu pozwoliły na walidację modelu numerycznego, zrealizowanego w środowisku Numeca IGG. W odróżnieniu od wcześniejszych prac odstąpiono od modelu k- $\omega$  SST i wykorzystano model Reynolds-Stress. Szczegółowo omówiono numeryczny model procesu spalania.

Badania eksperymentalne pozwoliły na wyznaczenie rozkładu temperatury spalin, który porównano z rozkładem uzyskanym dzięki modelowi numerycznemu. Okazało się, że model wskazywał na wyższe niż w rzeczywistości wielkości temperatury, szczególnie w okolicach płomienia. Dodatkowo analizowano strumień ciepła przekazywany do wody chłodzącej, temperaturę spalin, temperaturę wody chłodzącej na wylocie z kotła, prędkość przepływu spalin oraz udział masowy tlenu i dwutlenku węgla w spalinach.

Bardzo cennym aspektem pracy jest uwzględnienie podziału strumienia ciepła na radiację oraz konwekcji. Stwierdzono, że radiacja dominuje w dolnej części komory spalania i maleje wraz z oddalaniem się od palnika. Nie zaobserwowano tak silnej zależności zmiany wartości strumienia ciepła przekazywanego wskutek konwekcji od odległości od złoża paliwa. Wykazano, że udział radiacji oraz konwekcji zależny jest w znacznym stopniu od obciążenia cieplnego urządzenia grzewczego oraz w mniejszym stopniu od rodzaju paliwa.

Również ta praca została zilustrowana schematami i rysunkami ułatwiającymi jej lekturę. Zamieszczono schematy zaprojektowanej komory cylindrycznej, instalacji chłodzącej stanowisko badawcze oraz domeny obliczeniowej. Przedstawiono rysunki porównujące temperatury uzyskane na drodze eksperymentu oraz symulacji numerycznych, wykresy rozkładów temperatury spalin w warstwie przyściennej oraz średniej temperatury spalin, rozkładu prędkości przepływu spalin wewnątrz komory spalania, rozkładu radiacyjnej oraz konwekcyjnej gęstości strumienia ciepła, rozkładu radiacyjnego i konwekcyjnego współczynnika przejmowania ciepła oraz rozkładu Liczby Reynoldsa dla przepływu spalin wewnątrz komory spalania dla różnych przypadków.

Czasopismo Energies indeksowane w JCR. Posiada IF = 3,004 oraz 140 pkt. Jest to autorska publikacja Doktoranta.

W podsumowaniu charakterystyki publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe należy stwierdzić, że przedstawione artykuły odnoszą się do jednolitej tematyki problemów wymiany ciepła w kotłach na paliwo stałe. Artykuły te są spójne tematycznie. Opublikowano je w znaczących czasopismach. Prace te stanowią znaczące osiągnięcie naukowe Doktoranta. We wszystkich artykułach współautorskich mgr inż. Wojciech Judt ma znaczący udział potwierdzony podpisami pozostałych autorów, przy czym jeden artykuł jest autorski.

### 3.2. Omówienie pozostałych osiągnięć

Należy podkreślić, że jakość pracy naukowej mgr. inż. Wojciecha Judta została potwierdzona licznymi wyróżnieniami i nagrodami. Należy tu wspomnieć o Stypendium Marszałka Województwa Wielkopolskiego III stopnia oraz medal rektora Politechniki Poznańskiej. Doktorant odbył wiele szkoleń z zakresu modelowania numerycznego procesów wymiany ciepła.

Mgr inż. Wojciech Judt był wykonawcą dwóch projektów badawczych finansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu operacyjnego Inteligentny Rozwój oraz dwóch finansowanych z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój (POIR) nawiązując przy tym współpracę z firmami Elektrorecykling Polska sp. z o.o., Ecoprotech sp. z o.o. oraz ASFI sp. z o.o. Współpraca z przemysłem obejmowała również realizację kilkunastu zleceń oraz opinii w zakresie eksploatacji kotłów na paliwa stałe, pomp ciepła oraz głowic termostatycznych. W swoim dorobku Doktorant posiada dwa zgłoszenia patentowe. W dorobku naukowym Doktoranta pozostają trzy artykuły w czasopiśmie naukowych wyróżnionych w Journal Citation Reports oraz dwadzieścia dwa artykuły w innych czasopiśmie. H-indeks wynosi 2 według bazy Web of Science oraz 3 według bazy Scopus. Sumaryczny Impact Factor Doktoranta wynosi 16,189. Na tym etapie kariery naukowej wskaźniki powyższe należy uznać za dalece wystarczające.

Zajęcia dydaktyczne prowadzone przez mgr inż. Wojciecha Judta z zakresu termomechaniki numerycznej, modelowania procesów cieplnych, spalania paliw i biomasy, kotłów przemysłowych, sterowania i automatyzacja procesów cieplno-przepływowych oraz termodynamiki technicznej są wysoko oceniane przez studentów. Skutkiem tego był uzyskanie listu gratulacyjnego dla wyróżniającego się nauczyciela akademickiego (dziekan Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki) oraz nagrody rektora Politechniki Poznańskiej w 2021 roku. Mgr inż. Wojciech Judt jest koordynatorem współpracy pomiędzy Politechniką Poznańską a firmą Mesco (oficjalny dystrybutor oprogramowania Ansys).

### 3.3. Mocne strony pracy i uwagi krytyczne

Zawartość pracy doktorskiej stanowi znaczący wkład w rozwój wiedzy dotyczącej wymiany ciepła uzyskiwanego ze spalania paliw stałych. Wyniki uzyskane w pracy mogą i powinny być zastosowane w praktyce, przyczyniając się do poprawy efektywności energetycznej instalacji ciepłowniczych. Do niewątpliwych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- zaprojektowanie wymiennika modułowego podnoszącego efektywność energetyczną kotła,
- wykonanie rozmaitych symulacji numerycznych dotyczących eksploatacji kotłów na paliwa stałe z wykorzystaniem narzędzi CFD,
- wyznaczenie obszarów stagnacji przepływu, dla których istnieje zagrożenie skraplania spalin,
- wyznaczenie miejsc narażonych na osadzanie się popiołu,
- analiza wpływu dławienia przepływu spalin na sprawność cieplną,
- opracowanie modelu spalania paliw stałych,
- wykonanie stanowiska badawczego pozwalającego na weryfikację wyników numerycznych,
- określenie udziału konwekcji oraz radiacji w czasie eksploatacji kotła,

- wyznaczenie konwekcyjnego oraz radiacyjnego współczynnika przejmowania ciepła w trakcie eksploatacji kotła.

Praca napisana jest językiem poprawnym. Autor w sposób przejrzysty prowadzi narrację, dzięki czemu pracę czyta się z przyjemnością. W trakcie lektury można jednak miejscami odnieść wrażenie, pewne aspekty mogłyby być wyjaśnione szerzej. Wymieniono je niżej.

- Większość warunków brzegowych podana jest w dość lakoniczny i opisowy sposób.
- Dla rozważanej komory cylindrycznej oraz dla 30% mocy uzyskano niestabilne parametry pracy stanowiska badawczego. Nie opisano na czym te niestabilności polegały oraz nie podjęto próby wyjaśnienia tego zjawiska. Ponadto bez uzasadnienia przeprowadzono analizy dla obciążenia na poziomie 50%.
- Na rysunku 16 widoczne są znaczne różnice wartości temperatury spalin uzyskiwanych na drodze modelu numerycznego oraz eksperymentu, szczególnie w sąsiedztwie płomienia. Wskazana jest tutaj bardziej pogłębiona analiza przyczyn tego zjawiska.
- Nie uzasadniono postaci wzorów (16) oraz (17) ani też nie podano skąd je zaczerpnięto.
- Dla różnych kroków czasowych (0,15, 0,2 oraz 0,25 sekund) uzyskuje nie nieco odmienne rozkłady temperatur oraz prędkości przepływu spalin w periodycznej części wymiennika. Nasuwa się pytanie, dla którego z tych kroków wyniki są najlepsze?

#### 4. Podsumowanie oraz wnioski końcowe

Mimo bardzo licznych niedoskonałości pracy należy stwierdzić, że analizowany temat badawczy jest aktualny a zaprezentowane wyniki przyczyniają się do rozwoju nauki. Doktorant wykazał się umiejętnościami wymaganymi w trakcie samodzielnej pracy badawczej, dysponując przy tym niezbędną wiedzą teoretyczną.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska mgra inż. Wojciecha Judta pt. „Analiza procesu wymiany ciepła uzyskiwanego ze spalania paliw stałych w warunkach nieruchomego źródła” **spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnoszę o przyjęcie rozprawy oraz dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.** Z uwagi na publikacje naukowe w renomowanych czasopismach, własny projekt wymiennika modułowego, wykonanie stanowiska badawczego, użyteczny charakter wyników pracy oraz osiągnięcia Doktoranta w zakresie dydaktyki wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

