

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Bohdal
Politechnika Koszalińska
Wydział Mechaniczny
Katedra Energetyki
ul. Raławicka 15-17
75-620 Koszalin

Koszalin, 12.01.2023 r.

Recenzja

wniosku o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego dr inż. Zbigniewowi Rogali na podstawie jednotematycznego cyklu prac składającego się z dziesięciu publikacji powiązanych tematycznie pod wspólnym tytułem:

„Badania eksperymentalne i modelowanie procesów skraplania, rekondensacji, regazyfikacji i odzysku egzergii LNG”

oraz opinia o dorobku naukowo-badawczym, dydaktycznym i organizacyjnym Kandydata, wykonana na podstawie zlecenia Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej dr hab. inż. Roberta Króla prof. uczelni z dnia 18 listopada 2022 roku (Uchwała nr 448/22/RDND08/2021-2024 z dnia 16.11.2022 r.).

1. Wstęp

Dr inż. Zbigniew Rogala urodził się 5 lipca 1990 roku we Wrocławiu. W 2009 roku rozpoczął studia pierwszego stopnia na kierunku Energetyka na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej. W 2013 roku na podstawie pracy dyplomowej pt.: „Projekt mikro-parowacza Rosenblada do zastosowania w domowych układach ORC” uzyskał stopień inżyniera o specjalności Energetyka cieplna i jądrowa. Promotorem pracy był dr inż. Piotr Kolański. W 2014 roku na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn obronił pracę dyplomową pod tytułem: „Termodynamiczna analiza optymalizacyjna kolumny rektyfikacyjnej” uzyskując tytuł magistra inżyniera o specjalności Refrigeration and Cryogenics. Promotorem pracy była dr inż. Agnieszka Piotrowska.

W dniu 3 lipca 2019 roku uzyskał stopień doktora nauk technicznych nadany uchwałą Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej, na podstawie rozprawy zatytułowanej „Analiza termodynamiczna intensyfikacji procesów adsorpcyjnego suszenia powietrza w chłodnictwie”. Praca doktorska została obroniona w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych, w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Promo-

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

48 / 40 / 2023
Wzłynęło dnia 12.01.23

torem w tej rozprawie był prof. dr hab. inż. Zbigniew Gnutek, a recenzentami: dr hab. inż. Kamil Śmierciew i prof. dr hab. inż. Sergey Anisimov.

Kandydat związany jest zawodowo z Politechniką Wrocławską od października 2019 roku, gdzie jest zatrudniony na stanowiska adiunkta naukowo-dydaktycznego na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej w Katedrze Kriogeniki i Inżynierii Lotniczej.

2. Ocena osiągnięcia naukowego

Podstawą do ubiegania się dr inż. Zbigniewa Rogali o stopień doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka jest jednotematyczny cykl prac składający się z dziesięciu publikacji powiązanych tematycznie pod wspólnym tytułem: „*Badania eksperymentalne i modelowanie procesów skraplania, rekondensacji, regazyfikacji i odzysku egzergii LNG*” Jest to zbiór Jego prac wykonanych w latach 2019 ÷ 2022, w postaci artykułów w uznanych czasopismach o zasięgu światowym i referatów konferencyjnych:

1. Zbigniew Rogala: *Application of precooling stage in MR JT cryocoolers*; Cryogenics. 2022, vol. 121, art. 103395, s. 1-10, IF: 2.226, punktacja MNiSW: 100 pkt. – *udział habilitanta 100%*;
2. Arkadiusz Brenk, Zbigniew Rogala, Ziemowit M. Malecha: *Analysis of freezing risk during LNG evaporation process*. W: *Advances in Cryogenic Engineering : Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference (CEC) 2019, 21-25 July 2019, Hartford, Connecticut, USA*. [Bristol : IOP Publishing, 2020]. art. 012114, s. 1-8.(IOP Conference Series - Materials Science and Engineering, ISSN 1757-899X; vol. 755)), – *udział habilitanta 30%*;
3. Arkadiusz Brenk, Jakub Kielar, Ziemowit M. Malecha, Zbigniew Rogala: *The effect of geometrical modifications to a shell and tube heat exchanger on performance and freezing risk during LNG regasification*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020, vol. 161, art. 120247, s. 1-12, IF: 5.584, punktacja MNiSW: 200 pkt – *udział habilitanta 25%*;
4. Tomasz Banaszekiewicz, Maciej Chorowski, Wojciech Gizicki, Artur Jędrusyna, Jakub Kielar, Ziemowit M. Malecha, Agnieszka H. Piotrowska-Hajnus, Jarosław Poliński, Zbigniew Rogala, Korneliusz Sierpowski, Janusz Skrzypacz, Michał W. Stanclik, Krzysztof Tomczuk, P. Dowzenko: *Liquefied natural gas in mobile applications - opportunities and challenges*. *Energies*. 2020, vol. 13, nr 21, art. 5673, s. 1-35, IF: 3.004, punktacja MNiSW: 100 pkt – *udział habilitanta 7%*;
5. Zbigniew Rogala: *Composition optimization method for mixed refrigerant MR JT cryocooler*; *Cryogenics*. 2020, vol. 113, art. 103223, s. 1-10.,IF: 2.226, punktacja MNiSW: 100 pkt – *udział habilitanta 100%*;
6. Wojciech Gizicki, Tomasz Banaszekiewicz, Paweł Wojcieszak, Zbigniew Rogala: *Performance analysis of small-scale power cycles for LNG physical exergy recovery*. W: 27th

International Cryogenics Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2018 : ICEC-ICMC 2018, 3-7 September 2018, Oxford, England / eds. T. Bradshaw, O. Kirichek, J. Vandore. [Bristol] : IOP Publishing, 2019. art. 012146, s. 1-5. (IOP Conference Series - Materials Science and Engineering, ISSN 1757-899X; vol. 502) – *udział habilitanta 25%*;

7. Zbigniew Rogala, Arkadiusz Brenk, Ziemowit M. Malecha: *Theoretical and numerical analysis of freezing risk during LNG evaporation process*; *Energies*, 2019, vol. 12, nr 8, art. 1426, s. 1-19, IF: 3.004, punktacja MNiSW: 100 pkt – *udział habilitanta 33%*;
8. Zbigniew Rogala, Rafał Siemasz, Błażej Baran, Adrian Kwiatkowski: *Design and experimental study on precooled MR JT cryocooler for LNG recondensation purposes*; *Applied Thermal Engineering* 2022, vol. 12, nr 8, art. 1426, s. 1-19, IF: 5.259, punktacja MNiSW: 140 pkt – *udział habilitanta 70%*;
9. Zbigniew Rogala, Wojciech Gizicki, Korneliusz Sierpowski: *Theoretical analysis of liquefied natural gas cold energy recovery using thermoelectric generators*; *Applied Thermal Engineering* 213 (2022) 118608, s. 1-15, IF: 5.259, punktacja MNiSW: 140 pkt – *udział habilitanta 70%*;
10. Zbigniew Rogala, Adrian Kwiatkowski: *Modeling of a Three-Stage Cascaded Refrigeration System Based on Standard Refrigeration Compressors in Cryogenic Application-sabove 110 K*; *Modelling* 3, 255 – 271, 2022 – *udział habilitanta 90%*.

Przedstawiony do oceny dorobek Habilitanta dotyczy możliwości uzyskania poprawy efektywności realizowanych procesów skraplania, rekondensacji i regazyfikacji skroplonego gazu ziemnego LNG. Obecnie zastosowanie skroplonych gazów nabiera coraz większego znaczenia. Wynika to z przesłanek ekologicznych, ekonomicznych, a także geopolitycznych. Wybierając gaz ziemny, zmniejszamy o 30% emisję CO₂ w stosunku do oleju opałowego i o 50% mniejszą niż przy stosowaniu węgla. Jego zastosowanie traktować jako ekologiczną alternatywę, która częściowo zapobiega powstawaniu zmian w środowisku, jakimi są efekt cieplarniany lub kwaśne deszcze. Skroplone gazy nadają się do dalekiego transportu, ponieważ ich objętość właściwa jest kilkaset razy niższa niż fazy lotnej. Oznacza to, że w jednostce objętości można zgromadzić bardzo dużą ilość energii, którą później można wykorzystać do różnych celów, w tym najczęściej w procesach spalania. Obecnie w Europie na skutek wojny w Ukrainie i wstrzymaniu dostaw rosyjskiego gazu, ciekły gaz LNG nabiera coraz większego znaczenia. Jednak konwersje lotnego gazu ziemnego do postaci LNG i ponownie do postaci gazowej wymagają znacznych nakładów energii związanych ze zmianą stanu skupienia (nawet do 10% energii zawartej w gazie dla każdego procesu). Dlatego ważnym jest doskonalenie tych procesów związanych z przetwarzaniem fazowym gazu ziemnego, zmniejszenie nakładów energetycznych i ograniczenie strat energii. Istotnego znaczenia nabiera też odzysk energii LNG. Mając powyższe na uwadze należy uznać, że wybór tematyki badawczej przez Habilitanta jest właściwy, zarówno pod względem poznawczym, jak i aplikacyjnym. W przedstawionym zakresie prowadził on prace teoretyczne w postaci modelowania matema-

tycznego procesów zachodzących przy skraplaniu i odparowaniu gazu oraz badania eksperymentalne na oryginalnych stanowiskach badawczych zbudowanych w laboratorium.

Należy tu wyeksponować szczególne osiągnięcia Autora, w postaci istotnego wkładu naukowego, a dotyczącego takich problemów, jak:

1. Rekondensacja i skraplanie LNG z wykorzystaniem obiegów Joule'aThomsona

- opracowanie autorskiego modelu procesowego wraz z modelem optymalizacyjnym przeznaczonym do symulacji jednostopniowych obiegów MR JT

Przeprowadzono kompleksowe prace badawcze teoretyczne i eksperymentalne, których celem było wykorzystanie chłodziarek i skraplaarek MR JT (*ang. mixedrefrigerant Joule-Thomson*) do zastosowań LNG, szczególnie w małej skali obejmującej zastosowania samochodowe i kolejowe. Opracowano autorski model procesowy wraz z modelem optymalizacyjnym przeznaczonym do symulacji jednostopniowych obiegów MR JT. Zaprezentowano holistyczną metodę optymalizacji składu mieszaniny MR J-T opartą na metodzie największego spadku, gdzie modelowanie odbywa się za pomocą narzędzia Peng-Robinson EoS dostępnego w RefProp 10. Zaproponowane narzędzie optymalizacyjne uwzględnia wiele różnych czynników, które zwykle stosuje się osobno, jak np. średnia różnica temperatur w rekuperatorze, objętościowe i masowe jednostkowe moce chłodnicze oraz COP układu, ograniczenia ciśnieniowe i temperaturowe komercyjnych sprężarek chłodniczych, nieidealne izentropowe sprężanie i natężenie przepływu na ssaniu. Przeprowadzona optymalizacja wykazała znaczną zbieżność między kompozycjami zoptymalizowanymi pod względem COP i objętości SCP. Z drugiej strony, masowy SCP okazał się nieefektywnym czynnikiem optymalizacyjnym w przypadku sprężarek objętościowych. Uzyskane wyniki podkreślają ogólne zasady komponowania MR w zależności od temperatury chłodzenia.

- opracowanie autorskiego modelu dla kaskadowego obiegu MR JT

Opracowany dla układu jednostopniowego model procesowy został zmodyfikowany oraz ulepszony. Do modelu został dołożony submodel stopnia dochładzającego wyposażony we własną pętlę optymalizacyjną. Ponadto wprowadzono zależność sprawności izentropowej od ciśnień ssania i tłoczenia sprężarki, która zastąpiła założenie o stałej sprawności izentropowej. Przeanalizowano pracę układu dla temperatur dochłodzenia w zakresie od 290 do 235K. Przeprowadzone symulacje wykazały, że temperatura dochłodzenia ma istotny wpływ na skład optymalnej mieszaniny. Wykazano, że istnieje optymalna temperatura dochłodzenia, dla której jest osiągane optymalne COP. Wykazano także, że wskazanym jest stosowanie rekupeacji ciepła (rośnie wymagany iloczyn powierzchni i współczynników wymiany ciepła UA/m) wraz ze spadkiem temperatury dochłodzenia.

Zbadano również wpływ zastosowania etapu wstępnego schładzania na wydajność chłodnicy kriogenicznej MR JT w stanie ustalonym. Modelowanie przeprowadzono przy użyciu zmodyfikowanego podejścia dla nieschłodzonego cryocoolera MR JT z wykorzystaniem PengRobinson EoS. Takie podejście umożliwiło optymalizację składu MR dla danej temperatury wstępnego schładzania. Wykazano, że zastosowanie chłodzenia wstępnego znacznie poprawia wydajność systemów MR JT oraz, że temperaturę wstępnego schładzania można optymalizować pod kątem COP układów chłodniczych. Systemy z dochłodzeniem są nie tylko bardziej

wydajne, ale ta sama moc chłodnicza wymaga mniejszej pojemności objętościowej sprężarki MR.

- przeprowadzenie badań eksperymentalnych kaskadowej chłodziarki MR JT

Habilitant przeprowadził wstępne badania eksperymentalne kaskadowej chłodziarki MR JT, która powstała na bazie autorskiego projektu. Została ona zaprojektowana do celów rekondensacji i potencjalnego skraplania LNG. Uwzględniono najważniejsze aspekty projektowe: dobór i ograniczenia sprężarki, dobór i wielkość urządzeń rozprężnych, wpływ składu MR na stabilność temperatury obciążenia oraz minimalne zbliżenie temperatur czynników podczas rekuperacji. Przeprowadzono serię testów eksperymentalnych przy różnym obciążeniu cieplnym, ciśnieniu ssania, ciśnieniu tłoczenia i temperaturze wstępnego chłodzenia. Chłodziarka kriogeniczna zapewniała moc chłodzenia 270 W przy temperaturze $-158\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eksperymenty wskazały optymalną temperaturę wstępnego schładzania, podobną do tej uzyskanej z badań teoretycznych (około $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$).

2. Regazyfikacja LNG z wykorzystaniem cieczy grzewczej

- opracowanie analitycznego, 0-wymiarowego modelu wymiany ciepła wzdłuż płaskiej płyty pomiędzy wodą i wrzącym LNG

Celem opracowania modelu była analiza procesu regazyfikacji pod kątem zamrażania oraz identyfikacja kluczowych mechanizmów wymiany ciepła, które w największym stopniu wpływają na proces regazyfikacji. Przedstawiono szybką i niezawodną metodologię obliczeń zerowymiarowych do badania procesu zamrażania w prostym prostokątnym kanale. Zaproponowany uproszczony model 0D wykazał zgodność jakościową i ilościową z obliczeniami numerycznymi CFD. Jego główną zaletą była możliwość wykonywania obliczeń, które są znacznie mniej czasochłonne i zasobochłonne. Opracowany model 0D wykorzystano do analizy procesu regazyfikacji LNG dla szerokiej przestrzeni parametrów oraz do zbadania ryzyka zamrożenia czynnika grzewczego. Zbadano wzajemne oddziaływania i wpływ temperatury, liczby Reynoldsa, współczynnika przejmowania ciepła dla czynnika grzewczego i dla wrzenia LNG. Opracowany model może być wykorzystywany przez projektantów i operatorów niskotemperaturowych wymienników ciepła.

- opracowanie modelu numerycznego opływu wodą poprzecznego pęczka rurek

Przedstawiono analizę ryzyka zamrażania wody podczas eksploatacji wymiennika ciepła typu LNG-woda. Model numeryczny został opracowany dla opływu przez wodę pojedynczego kanału oraz opływu pęczka rur. Zaproponowaną geometrię można postrzegać jako uproszczone uogólnienie płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła. Opracowany model posłużył do analizy procesu regazyfikacji LNG w dwóch wersjach: normalnej pracy oraz awaryjnego braku przepływu. W obu przypadkach analizowano dynamikę zamrażania wody i narastania lodu na poszczególnych rurkach. Wykazano, że dynamika zamrażania jest bardziej intensywna w przypadkach o mniejszych przestrzeniach, wraz ze zmniejszaniem prędkości przepływu warstwa lodu zwiększa się. Stwierdzono, że dla modelowanych przypadków ryzyko zamrożenia i całkowitego zablokowania przepływu występuje w tym samym regionie, w którym liczba Reynoldsa wynosi około 50, co można traktować jako wartość krytyczną. Analiza wymiany ciepła wskazuje na zmniejszenie strumienia ciepła dla mniejszej liczby Reynoldsa. Uzy-

skane wyniki pokazały, że prawidłowa praca wymiennika ciepła do regazyfikacji LNG może pomóc w zabezpieczeniu przed ryzykiem zamarznięcia i zablokowania przepływu wody.

- opracowanie modelu numerycznego wymiennika płaszczowo-rurowego o różnej geometrii rurek

Zaproponowano i opracowano model numeryczny do analizy ryzyka powstawania lodu podczas procesu odparowania LNG w płaszczowo-rurowym wymienniku ciepła (STHX). Opracowany model składa się z dwóch odrębnych części: wymiany ciepła przez wrzący LNG i dynamiki zamarzania płynu grzewczego. W celu uogólnienia opracowanego modelu dla różnych reżimów wrzenia zaproponowano ciągłe i różniczkowalne wyrażenie krzywej wrzenia LNG. Opracowany model numeryczny wykorzystano do zbadania szerokiego zakresu warunków przepływu oraz różnych kształtów i rozstawów rur w STHX. Wykazano, że o ryzyku całkowitego zamarznięcia może świadczyć krytyczna wartość liczby Reynoldsa. Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie współczynnika stosunku wymienianego ciepła do obciążenia pompy, który wykazał, że spłaszczony rury mogą zapewnić lepszą wymianę ciepła, większą niezawodność, a także zmniejszyć obciążenie pompy potrzebnej do zasilania STHX. Stwierdzono, że właściwa konstrukcja wymiennika ciepła do regazyfikacji LNG może pomóc w zabezpieczeniu przed ryzykiem zamarznięcia i zablokowania przepływu wody. Współczynnik przejmowania ciepła od strony czynnika grzewczego powinien być utrzymywany na odpowiednio wysokim poziomie w całym wymienniku ciepła, co powinno być jednym z głównych kryteriów doboru wymiennika ciepła w regazyfikacji LNG.

3. Odzysk energii podczas regazyfikacji LNG

- odzysk energii poprzez wykorzystanie układu ORC

Zaproponowano odzysk energii poprzez wykorzystanie układu ORC, gdzie wymiennik z odparowywanym LNG stanowi dolne źródło ciepła dla obiegu silnikowego. Choć systemy odzysku energii LNG z wykorzystaniem ORC są dobrze znane i szeroko stosowane w istniejących jednostkach regazyfikacji, to dotyczy to obiektów stacjonarnych o bardzo dużej wydajności. Z przeprowadzonych przez Habilitanta obliczeń wynika, że w zastosowaniach mobilnych układy energii LNG oparte na ORC mogą być stosowane tylko z silnikami o dużym zapotrzebowaniu na gaz ziemny. W innych przypadkach zastosowanie systemu odzysku energii ORC może nie być uzasadnione ze względu na niewystarczającą wydajność i znaczną złożoność.

- konwersja energii na energię elektryczną przy użyciu ogniw termoelektrycznych

Przeprowadzono kompleksową analizę termoelektryczną systemu odzyskiwania energii chłodu skroplonego gazu ziemnego (LNG) z wykorzystaniem generatorów termoelektrycznych TEG (ang. *Thermoelectric Generator*). W modelowaniu wykorzystano pojęcie efektywnego przewodnictwa cieplnego, zjawiska elektryczne w module TEG oraz inne wtórne procesy wymiany ciepła: wrzenie skroplonego gazu ziemnego, przewodzenie przez ściany, styki termiczne po obu stronach TEG oraz konwekcję po stronie wody. Wykazano, że optymalizacja geometrii TEG dla warunków LNG może doprowadzić do 50% wzrostu produkcji energii elektrycznej. Stwierdzono, że przewodnictwo cieplne modułu TEG jest dominującym mechanizmem wymiany ciepła, a efektywność temperaturowa modułu jest niewrażliwa na tempera-

ture źródła ciepła, Przeprowadzona optymalizacja pokazała, że liczba materiałów termoelektrycznych obecnie używanych do budowy modułu TEG może być mniejsza, co spowoduje niższe koszty TEG i mniejsze gabaryty całego systemu.

Należy wyraźnie podkreślić, że prezentowana przez Habilitanta tematyka cyklu prac jest bardzo interesująca, oryginalna i nowoczesna. Bazuje na najnowszych osiągnięciach naukowych z ostatnich lat. Przedstawiony do oceny jednotematyczny cykl publikacji, pomimo że może stanowić kompletne dzieło naukowe, wskazuje również kierunki dalszego rozwoju badań i może inspirować do prowadzenia nowych badań w zakresie szeroko pojętej kriogeniki. Wyróżnia się wysokim poziomem opracowania, jest wypełniony kompleksowo wynikami badań i nowoczesną metodyką badawczą. Wnosi nową wiedzę do zagadnień szeroko pojętej energetyki niskotemperaturowej i jest przydatny inżynierom oraz pracownikom naukowym, zwłaszcza nauk technicznych. Habilitant przeprowadził kompleksowe analizy teoretyczne z wykorzystaniem autorskich modeli, które zostały opracowane w celu uzupełnienia niedoboru wiedzy w literaturze naukowej w tym zakresie. Zaprojektował i wykonał stanowisko badawcze kaskadowej chłodziarki Joule'a-Thomsona o mocy 290 W w temperaturze 119 K, na którym przeprowadził badania wpływu parametrów procesowych na efektywność pracy urządzenia. Duża część przeprowadzonych prac i uzyskanych wyników ma unikalny charakter. Interesujące są również wyniki badań w zakresie wymiany ciepła podczas procesu regazyfikacji LNG.

Dotyczy to w szczególności analizy procesu regazyfikacji pod kątem zamrażania wody oraz identyfikacji kluczowych mechanizmów wymiany ciepła, które w największym stopniu wpływają na proces regazyfikacji. Dotyczy to zarówno pojedynczej rury, jak i całego pęczka rur. Przedstawiony dorobek naukowy znacząco wpływa na rozwój aktualnego stanu wiedzy i stosowanych technik modelowania matematyczno-fizycznego w zakresie niskich temperatur.

Opiniowane prace dr inż. Zbigniewa Rogali uważam za ważny i wartościowy wkład do poznania i analizy zjawisk cieplno-przepływowych związanych z procesem skraplania, rekondensacji i regazyfikacji skroplonego gazu ziemnego LNG, co oznacza, że założony cel został zrealizowany. Postawione w publikacjach problemy zostały rozwiązane prawidłowo. **Tym samym jednotematyczny cykl publikacji, jako osiągnięcie naukowe spełnia w moim przekonaniu, w sposób w pełni zadowalający wymagania określone w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.**

3. Ocena istotnej działalności naukowej

Dr inż. Zbigniew Rogala po ukończeniu studiów prowadził prace badawcze związane z tematyką chłodnictwa adsorpcyjnego. Prace dotyczyły niskociśnieniowych chłodziarek adsorpcyjnych (*Adsorption cooling*) oraz adsorpcyjnego osuszania powietrza (*Desiccant cooling*). Dokonano modyfikacji w oprogramowaniu sterującym prototypowej trójzłożowej dwuparownikowej chłodziarki adsorpcyjnej. Wprowadzone zmiany dotyczyły głównie sekwencji przełączania zaworów i nie miały wpływu na osprzęt urządzenia. Umożliwiły one wprowadzenie odzysku ciepła i regeneracji masy. Ponadto usprawniono proces wstępnego chłodzenia złożeń. Zastosowane modyfikacje spowodowały znaczną poprawę współczynnika

COP agregatu chłodniczego oraz zwiększyły stabilność źródła ciepła, co ma duże znaczenie w przypadku zasilania z sieci ciepłowniczej. Przedstawione modyfikacje można wprowadzić do większości adsorpcyjnych agregatów chłodniczych a przedstawiona konfiguracja agregatu może być uznana za wiodące rozwiązanie rynkowe.

Przeprowadził również analizę egzergetyczną fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej FDC (ang. *Fluidized Desiccant Cooler*), w celu zidentyfikowania tych komponentów i procesów w systemie FDC, które są głównie odpowiedzialne za destrukcję egzergii. Określił sprawność egzergetyczną prostej fluidalnej chłodziarki adsorpcyjnej. Przeprowadzone analizy wykazały, jakie są główne źródła strat egzergii w systemach FDC podczas adsorpcji i desorpcji. Bezpośrednia chłodnica wyparna i chłodnica powietrzna umieszczone za desorbującym złożem fluidalnym charakteryzowały się najniższą sprawnością egzergetyczną. Praca ta przyczyniła się do lepszego zrozumienia zasad działania FDC i poprawy wydajności technologii FDC. Ponadto zoptymalizowano destrukcję egzergii regeneracyjnego wymiennika ciepła, która prowadziła również do zmniejszenia strat egzergii w nagrzewnicy powietrza.

Habilitant przeprowadził również interesujące badania dotyczące wpływu obróbki zimną plazmą zdemineralizowanej wody pod kątem wymiany ciepła. Celem badań było określenie potencjału GPTW (ang. *Glow Plasma Treated Water*) w procesach technologicznych poprzez wyznaczenie wartości współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu i porównanie go z wartością dla wrzenia wody demineralizowanej. Wykazano, że proces obróbki plazmowej nie wpływa znacząco na wrzenie wody w objętości przy ciśnieniu atmosferycznym, a wartości współczynnika przejmowania ciepła zarówno dla próbek GPTW, jak i wody demineralizowanej są niemal identyczne. Znaczące odchylenia zaobserwowano podczas badań przy obniżonym ciśnieniu. Przyczyną pogorszenia się warunków wymiany ciepła może być również wzrost napięcia powierzchniowego cieczy. Ponadto, badania wykazały, że GPTW nie jest stabilna i w pełni powraca do stanu początkowego po około dwóch tygodniach. Dlatego jego stosowanie w procesach technologicznych, zwłaszcza procesach przemiany fazowej, nie jest uzasadnione.

Dorobek naukowy Kandydata jest znaczny i został wydatnie pomnożony po uzyskaniu stopnia doktora. Jest on autorem lub współautorem łącznie 30 opublikowanych prac naukowych, w tym 22 opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora (z IF 47.46). Sumaryczna liczba punktów według kryteriów MNiSzW za publikacje wynosi 1472, z czego 152 punktów jest wg punktacji przed reformą a 1320 po reformie. Publikacje wymienione w osiągnięciu naukowym stanowią łącznie 800 punktów. W dorobku posiada 3 raporty i 2 patenty, w tym jeden autorski. Wykonał 20 recenzji artykułów naukowych. Odbił jeden 3-miesięczny staż naukowy w przedsiębiorstwie o profilu B+R.

Wyniki swoich badań przedstawił na 5 międzynarodowych konferencjach naukowych, w tym: *2nd International Seminar on ORC Power Systems, October 7th & 8th, 2013, Rotterdam, The Netherlands, 8th International Renewable Energy Congress (IREC 2017) : Amman, Jordan 21-23 March 2017, Danvers, International Cryogenics Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2018 : ICEC-ICMC 2018, 3-7 September 2018, Oxford, England, Cryogenic Engineering Conference (CEC) 2019, 21-25*

July 2019, Hartford, Connecticut, USA, *International Conference on Advances in Energy Systems and Environmental Engineering*

(ASEE17), 2-5 July, 2017, Wrocław, Poland. Na szczególne wyróżnienie zasługują publikacje w czasopismach o zasięgu międzynarodowym: *Cryogenics, International Journal of Heat and Mass Transfer, Energies, Applied Thermal Engineering, Modelling, Entropy, International Journal of Refrigeration*.

Dorobek naukowy Habilitanta charakteryzuje wg bazy Web of Science indeksem Hirscha 6 i liczbą cytowań 95 (tym 16 autocytowań). Wg bazy Scopus indeks Hirscha wynosi 7, liczba cytowanych prac 106, w tym liczba autocytowań 17. Wg bazy Google Scholar indeks Hirscha wynosi 7, liczba cytowani 138 cytowań, w tym 17 autocytowań.

Swoje prace badawcze Habilitant częściowo realizował w ramach projektów badawczych finansowanych z grantów zdobywanych w konkursach krajowych i zagranicznych. W latach 2018 ÷ 2022 brał udział w realizacji projektu badawczo-wdrożeniowego pt.: „*Industrial research and development works regarding the technology of innovative development of hybrid and electric WBC cryochambers*” POIR.01.01.01-00-1225/17 współfinansowanego przez NCBiR w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój. Początkowo był zaangażowany w charakterze eksperta R&D, a następnie od roku 2020 był kierownikiem naukowym projektu. Celem projektu było opracowanie innowacyjnej technologii kriokomór elektrycznych pozwalających przeprowadzać zabiegi w temperaturach do -140°C . W ramach projektu powstały 3 instalacje badawcze: instalacja demonstracyjna oraz dwie instalacje prototypowe. Ponadto brał udział w dwóch innych projektach finansowanych przez NCBiR: „*Development of plate heat exchangers for liquid inert gas vaporization and the modelling of the two-phase flow in heat exchangers*”, nr projektu: PL-TWIII/7/2016, (program Polish-Taiwanese /Taiwanese-Polish Joint Research Call, 2017 ÷ 2018) oraz „*Optymalizacja systemów zasilających napędy pracujące w transporcie morskim, drogowym i kolejowym, które wykorzystują gaz naturalny w postaci skroplonej*”, nr projektu: POIR.01.01.01-00-0842/16-00, 2017 ÷ 2020. W latach 2024 ÷ 2015 również brał udział w realizacji projektu „*System energetyczny oparty na trigeneracji*” finansowanego przez MNiSW, nr projektu: K0901/S40104.

Realizując prace naukowe w zakresie techniki cieplnej i chłodniczej Kandydat kładzie duży nacisk również na aspekt aplikacyjny i wdrożeniowy swoich badań. Świadczą o tym zrealizowane liczne prace o charakterze stosowanym. W latach 2019 ÷ 2022 prowadził współpracę naukową z sześcioma podmiotami gospodarczymi realizując liczne projekty o charakterze stosowanym, w tym: „*Industrial research and development works regarding the technology of innovative development of hybrid and electric WBC cryochambers*” we współpracy z firmą Cryoscience, „*Opracowanie morskich kontenerów do przechowywania i transportu materiałów medycznych w temperaturach poniżej -80°C* ”, we współpracy ze spółką CryoCargo oraz „*Freezing issues in a shell and tube heat exchanger (STHX) for LNG regasification*” we współpracy z firmą Hyundai Heavy Industries, Korea Shipbuilding & Marine Engineering i DONGHWA ENTEC. Należy również wskazać na współpracę ze Związkiem Producentów AGD APPLiA Polska w zakresie prac dotyczących możliwości wykorzystania lodówek z akumulatorami chłodu, z firmą Whirlpool w zakresie pomiarów prędkości powie-

trza w kanałach klapy piekarnika, oraz współpracę z Nanolaboratory Nantes w zakresie pomiarów właściwości cieplnych nanowodów.

W okresie 7.2019 ÷ 9.2019 odbył 3-miesięczny staż naukowy w dziale badawczo-rozwojowym w firmie CryoScience Poland w Bielanach Wrocławskich w charakterze eksperta R&D w ramach projektu badawczo-rozwojowego „*Industrial research and development works regarding the technology of innovative development of hybrid and electric WBC cryo-chambers*” współfinansowanego przez NCBiR.

Współpraca z otoczeniem gospodarczym zaowocowała licznymi wdrożeniami. Należy tutaj wyróżnić opracowanie i drożenie do produkcji elektrycznej kriokomory jednoosobowej typu CRYO GLACIER ® we współpracy z firmą CryoScience, a także prototypowego kontener morskiego do transportu materiałów medycznych i biologicznych w temperaturach poniżej -80oC we współpracy z firmą CryoCargo. Ponadto został wykonany projekt i zbudowana kaskadowa chłodziarka Joule’a-Thomsona, stanowisko do badania wrzenia cieczy kriogenicznych oraz stanowisko do badania modułów termoelektrycznych TEG w temperaturach kriogenicznych.

Kandydat jest autorem patentu o nazwie: „*Sposób adsorpcyjnego osuszania gazu*”, nr 231754.: Int. Cl. B01D 53/26, B01D 53/96, ogłoszenie nr 415525 z dnia 23.12.2015, opublikowane w dniu 29.03.2019, 10 s. oraz współautorem patentu „*Sposób wytwarzania struktury intensyfikującej wymianę ciepła przy wrzeniu oraz struktura intensyfikująca wymianę ciepła przy wrzeniu*”, nr 425053, PRN/CWI/ONG/DWI/146/18 451-13/18, co można uznać za znaczne osiągnięcia.

Dorobek naukowy dr inż. Zbigniewa Rogali oceniam wysoko. Jest on autorem wielu oryginalnych opracowań naukowych o charakterze poznawczym i aplikacyjnym. Podjęta tematyka badawcza jest nowoczesna i dotyczy jeszcze mało zbadanych problemów naukowych związanych z wymianą ciepła, pędu i masy podczas procesów skraplania, rekondensacji i regazyfikacji skroplonego gazu ziemnego LNG. W swoich opracowaniach Habilitant opisuje fizykę zachodzących zjawisk i przedstawia modele matematyczne z nią związane. Są one bardzo przydatne w prowadzeniu rozważań naukowych i w obliczeniach inżynierskich. O ich przydatności świadczą liczne cytowania publikacji Autora. Na szczególną uwagę zasługuje prowadzenie badań pod kątem przyszłych zastosowań uzyskanych wyników. Dowodem tego jest uzyskanie patentów, udział w projektach badawczych, w tym międzynarodowych oraz współpraca z sektorem przemysłowym.

Podsumowując stwierdzam, że dorobek naukowy Kandydata po uzyskaniu stopnia doktora jest znaczący, a istotną działalność naukową Kandydata oceniam jako dobrą. Oznacza to, że w pełni rekomenduję Go do uzyskania stopnia doktora habilitowanego.

4. Ocena osiągnięć dydaktycznych i organizacyjnych Kandydata

Dr inż. Zbigniew Rogala przed uzyskaniem stopnia doktora prowadził działalność dydaktyczną w ramach Katedry Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych. Po uzyskaniu stopnia doktora związał się z Katedrą Inżynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej a obecnie od 2019 roku pracuje w Katedrze Kriogeniki i Inżynierii Lotniczej. Po uzyskaniu

stopnia doktora został kierownikiem laboratorium naukowo-dydaktycznego Kriogeniki i Technologii Gazowych. Koordynował prace badawcze, projektowe, dydaktyczne i organizacyjne dotyczące Laboratorium Kriogeniki i Technologii Gazowych: budowy i przebudowy stanowisk dydaktycznych i badawczych, organizacji pracy laboratorium w trybie zdalnym w czasie pandemii COVID-19 oraz prace konsultacyjne związane z budową kompleksu Inno-Camp. Przeprowadził budowę lub przebudowę 5 stanowisk dydaktycznych, w tym: stanowisko do skraplania azotu metodą Joule'a-Thomsona, stanowisko jednostopniowej chłodziarki Joule'a-Thomsona pracującej na mieszaninie gazów, stanowisko prezentujące izolację zbiornika kriogenicznego, stanowisko do regazyfikacji azotu oraz do pomiarów stężenia tlenu w obecności ciekłego azotu.

Habilitant prowadzi zajęcia dydaktyczne, w tym wykłady, ćwiczenia i laboratoria w języku polskim i angielskim na specjalności z przedmiotów: Cryogenic Systems (W), Gas and Cryogenic Technologies (W), Cryogenics (L) oraz Gazownictwo (C, W), Termodynamika (L), Podstawy termodynamiki (C), Teoria maszyn cieplnych (C), Wymiana ciepła i wymienniki (C), Przenoszenie ciepła (C), Maszyny wyporowe (C, P), Numerical techniques related to heat transfer (L), Podstawy elektrotechniki i elektroniki (C, L), Podstawy automatyki (L). Opracował materiały do kursów Numerical techniques related to heat transfer z przedmiotów: Gazownictwo (W) oraz Podstawy elektrotechniki i elektroniki (C). W trakcie pracy na stanowisku adiunkta badawczo-dydaktycznego był promotorem 3 prac inżynierskich, 3 prac magisterskich, pisanych w języku polskim i angielskim.

Od 2020 roku jest członkiem Komisji programowej specjalności Chłodnictwo, Ciepłownictwo i Klimatyzacja. Od 2021 roku bierze udział w pracach grupy roboczej opracowującej nowy kierunek studiów inżynierskich Inżyniera Chłodnicza, Kriogeniczna i Procesowa. Brał udział w projektach dydaktycznych, między innymi w 2021 roku w projekcie pt. „Międzynarodowe programy nauczania w formie zdalnej i mieszanej realizowane w ramach szkół letnich i zimowych”. W ramach tego projektu opracował dwa kursy: „Cryogenic heat transfer” dla specjalności Refrigeration and Cryogenics oraz „Introduction to Fusion Power Generation Based on a Tokamak Solution” dla specjalności Nuclear Power Engineering. Od 2019 roku współpracuje w ramach Krajowego Konsorcjum FEMTOFizyka w budowie, uruchomieniu i działaniu Europejskiego Ośrodka Badań Antyprotonami i Jonami – FeedBoxes and Feed-in-lines for SIS100.

Kandydat opracował 20 recenzji artykułów skierowanych do publikacji w czasopiśmie międzynarodowych: *Applied Thermal Engineering (Elsevier)* – 6, *Cryogenics (Elsevier)* – 2, *Applied Energy (Elsevier)* – 1, *Energies (MDPI)* – 8, *Applied Sciences (MDPI)* – 1, *Processes (MDPI)* – 1 i *Atmosphere (MDPI)* – 1.

Za swoją działalność naukową, dydaktyczną i organizacyjną Kandydat otrzymał nagrody i wyróżnienia. Należą do nich: dwie Nagrody Rektora Politechniki Wrocławskiej w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni w latach 2020 i 2018, stypendium dla wybitnych Młodych Naukowców przyznawane przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w 2020 roku. W czerwcu 2022 r. został powołany do Academia Iuvenum – stowarzyszenia skupiającego zdolnych młodych naukowców Politechniki Wrocławskiej. Od 2018 roku jest członkiem Reviewers Board czasopisma *Atmosphere* z wydawnictwa MDPI.

Biorąc powyższe pod uwagę wyrażam przeświadczenie, że dorobek dydaktyczny i organizacyjny jest wystarczający i potwierdza kwalifikacje Kandydata do uzyskania stopnia doktora habilitowanego stanowiąc podstawę do dalszego awansu.

5. Wniosek końcowy

Na podstawie szczegółowej analizy przedstawionego osiągnięcia naukowego w postaci jednotematycznego cyklu 10 publikacji powiązanych tematycznie oraz działalności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej stwierdzam, że dr inż. Zbigniew Rogala posiada znaczące i oryginalne osiągnięcia, które poszerzają dotychczasowy stan wiedzy w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka. Upoważnia mnie to do stwierdzenia, że pod względem formalnym Jego kandydatura w pełni odpowiada warunkom określonym w art. 219 ust.1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz.U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Dorobek Kandydata jest zgodny z kryteriami oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego w obszarze nauk technicznych.



