

R E C E N Z J A

dorobku naukowo-badawczego, dydaktycznego i organizacyjnego dr inż. Rafała Andrzejczyka, w związku z postępowaniem o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego w dyscyplinie *Budowa i eksploatacja maszyn*

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny *Inżynieria Mechaniczna* Politechniki Gdańskiej, prof. dr hab. inż. Michała Wasilczuka, nr 011/WM/2020 z dnia 8 stycznia 2020 roku, w sprawie wystawienia oceny całokształtu dorobku naukowego, badawczego, dydaktycznego i organizacyjnego dr inż. Rafała Andrzejczyka w związku z wnioskiem o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego.

1. Sylwetka zawodowa Kandydata

Dr inż. Rafał Andrzejczyk, lat 33, ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej w 2010 roku, na kierunku *Mechanika i budowa maszyn*, uzyskując tytuł zawodowy magistra inżyniera w specjalności *Systemy i urządzenia chłodnicze i klimatyzacyjne*.

Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie *Budowa i Eksploatacja Maszyn* otrzymał decyzją Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej z 12 lutego 2014 roku, na podstawie rozprawy doktorskiej pt.: „Badanie wpływu efektu nieadiabatywności na opory przepływu podczas kondensacji w minikanalach”, wykonanej pod opieką naukową prof. dr hab. inż. Dariusza Mikieliewicza oraz pozytywnie zaopiniowanej przez prof. dr hab. inż. Tadeusza Bohdala i prof. dr hab. inż. Janusza Cieślińskiego.

W latach 2010-2013 Kandydat był słuchaczem studiów doktoranckich Politechniki Gdańskiej, a od końca 2013 roku jest zatrudniony na etacie nauczyciela akademickiego w Katedrze Energetyki i Aparatury Przemysłowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej, początkowo na stanowisku asystenta (przez trzy miesiące), a po uzyskaniu stopnia naukowego (w 2014 roku) na stanowisku adiunkta. W latach 2015-2016 pracował też jako specjalista w Instytucie Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk.

Ważnym w rozwoju zawodowym i naukowym Kandydata, zwłaszcza w zakresie pogłębiania wiedzy i praktyki dotyczących metod eksperymentalnych, obróbki, archiwizacji i analizy danych pomiarowych, było kilka krótkich staży naukowych i szkoleniowych w latach 2015-2017 w Norwegian University of Science and Technology (NTNU) w Trondheim. Podobnie, odbyte szkolenia z zakresu wykorzystania metod numerycznych i analitycznych metod optymalizacji obliczeń, a także zagadnień odwrotnych wymiany ciepła, poszerzyły Jego wiedzę, kompetencje i aparat badawczy.

2. Ocena osiągnięcia naukowego wskazanego do uzyskania stopnia naukowego

Jako główne osiągnięcie naukowe Kandydat wskazał 12 prac stanowiących cykl publikacji pod wspólnym tytułem „Wybrane zagadnienia poprawy efektywności konwekcyjnej wymiany ciepła w konstrukcjach aparatów cieplnych dla potrzeb HVAC”.

Cykl ten obejmuje jeden autorski i 7 współautorskich artykułów w prestiżowych czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Report (JCR), takich jak: *Applied Thermal Engineering* (2 artykuły, IF=3,771), *Int. J. of Refrigeration-Revue* (IF=3,233), *Experimental & Fluid Sciences* (IF=3,204), *Energies* (IF=2,676), *Chemical Engineering & Processing* (2 artykuły, IF=2,2826) oraz *Heat Transfer Engineering* (IF=1,216); 3 artykuły w notowanym na liście B MNiSzW periodyku Polskiej Akademii Nauk - *Archives of Thermodynamics* (13pkt) oraz współautorski referat umieszczony w recenzowanych materiałach konferencji międzynarodowej (ICCHMT 2018). Zgodnie

z danymi z bazy Web of Science (WoS) wymienione pozycje publikacyjne Kandydata były cytowane 61 razy, a sumaryczny *Impact Factor* (IF) czasopism, w których się ukazały wynosi 22,307.

Spójnym obszarem tematycznym zaprezentowanych przez Habilitanta badań jest poszukiwanie możliwości podniesienia efektywności energetycznej systemów i urządzeń grzewczych, chłodniczych i klimatyzacyjnych (HVAC) oraz sposobów minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko naturalne stosowanych w tych systemach czynników roboczych. Oceniane prace Kandydata dotyczą, w szczególności, zaawansowanych badań eksperymentalnych i w mniejszym stopniu modelowania matematycznego, powszechnie stosowanych wymienników ciepła, których rozwiązania konstrukcyjne i parametry eksploatacyjne decydują o wydajności i ekologiczności systemów HVAC.

Obszerny zakres przeprowadzonych przez dr inż. Rafała Andrzejczyka badań obejmował prace nad poprawą efektywności energetycznej w systemach HVAC, poprzez pasywną, aktywną i mieszaną intensyfikację wymiany ciepła po stronie płaszcza wymienników węzownicowych, typu „rura w rurze” i „U-rurka” oraz optymalizację pracy grawitacyjnego termosyfonu dwufazowego.

Pierwsza grupa badań, której wyniki przedstawiono w publikacjach [A1]-[A4], dotyczyła prac badawczo - konstrukcyjnych zmierzających do poprawy intensywności wymiany ciepła po stronie płaszcza wymiennika węzownicowego. Rekuperatory tego typu charakteryzują się zwartą konstrukcją, odpornością na naprężenia mechaniczne i samokompensacją naprężeń i odkształceń cieplnych, niskim spadkiem ciśnienia w przepływie i zwiększonym współczynnikiem wnikania ciepła (w stosunku do wymiennika o prostych rurach) na wewnętrznej ścianie węzownicy. Spowodowany on jest występowaniem sił odśrodkowych, wywołujących przepływ wtórny w płaszczyznach normalnych do głównego kierunku ruchu płynu roboczego wewnątrz struktury śrubowej. Stąd powszechne zastosowania wymienników węzownicowych w systemach ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji, w przemyśle nuklearnym, przetwórstwa chemicznego i spożywczego oraz systemach odzysku ciepła.

Podstawowym niedostatkim tej konstrukcji jest jednak znacznie mniejszy współczynnik wymiany ciepła obserwowany po stronie płaszcza wymiennika, zwłaszcza przy niższych liczbach Reynoldsa. Z przeprowadzonego przez Habilitanta przeglądu literaturowego wynika, że problem ten nie był dotychczas przedmiotem dostatecznych badań. Prace nad eliminacją takich niekorzystnych efektów jak: powstawanie martwych stref, nierównomierny rozkład temperatury wzdłuż osi wymiennika czy zaniżony współczynnik wymiany ciepła dla laminarnego i przejściowego przepływu czynnika po stronie płaszcza wymiennika były ograniczone do prób optymalizacji geometrii samej węzownicy.

Mając to na uwadze, Habilitant podjął prace nad zwiększeniem intensyfikacji mieszania czynnika roboczego wokół omywanej węzownicy. Zaprojektował i zbudował moduł pomiarowy wymiennika węzownicowego i stanowisko doświadczalne umożliwiające badania eksperymentalne rekuperatorów o zmiennej geometrii spirali, płaszcza oraz układów zasilania i odbioru czynnika omywającego węzownicę. Zaproponował nowatorskie rozwiązania, tj. zastosowanie specjalnych mikronacięć na zewnętrznej ścianie spirali oraz dodatkowych przegród wywołujących turbulizację przepływu i wtórny ruch czynnika roboczego po stronie płaszcza wymiennika.

W celu określenia wpływu zwiększonej przez żebrowanie powierzchni wymiany ciepła od strony płaszcza na efektywność energetyczną wymiennika, przeprowadził szerokie badania na autorskim stanowisku laboratoryjnym. Porównał spadki ciśnienia w przepływie oraz temperatury na wlotach i wylotach ciepłej i zimnej wody, występujące w referencyjnym wymienniku z gładką spiralą i w rekuperatorze z uźebrowaną węzownicą, przy różnych wydatkach czynników roboczych, w przepływach współprądowym i przeciwprądowym. Wykorzystując graficzną metodę Wilsona do wyznaczenia eksperymentalnych wartości współczynnika wymiany ciepła oraz bilanse energetyczne czynników roboczych, porównał efektywność energetyczną obu wymienników (zdefiniowaną jako stosunek mocy cieplnej wymienianej między czynnikami do jej maksymalnej wartości) oraz liczby Nusselta na powierzchni węzownicy omywanej zimną wodą. Badania te potwierdziły wyższą efektywność energetyczną rekuperatora z mikro-źebrowaniem (o około 5%), bez wyraźnego wzrostu oporów przepływu czynnika po stronie płaszcza wymiennika.

Kandydat zaproponował też oryginalną koncepcję intensyfikacji wymiany ciepła po stronie płaszcza wymiennika węzownicowego, polegającą na zastosowaniu przegród zwiększających powierzchnie wymiany i wywołujących dodatkowy wtórny ruch płynu. Przeprowadził szerokie

badania eksperymentalne konwekcji mieszanej dla przypadków pojedynczej, dwóch lub czterech przegród, przy stałym strumieniu ciepła i zmiennych wydatkach przepływu czynnika w płaszczu wymiennika. Potwierdziły one znaczne zwiększenie wymiany ciepła w rekuperatora (blisko 50% wzrost uśrednionej liczby Nusselta) w wyniku zastosowania przegród, bez widocznego wzrostu oporów przepływu czynnika omywającego węzownicę, oraz istotny wpływ konwekcji naturalnej płynu w płaszczu przy małych liczbach Reynoldsa i dużych strumieniach ciepła. W dalszych badaniach z wykorzystaniem obrazów termowizyjnych temperatury płaszczu, pomiarów temperatur wody na wlocie i wylocie i na zewnętrznej ścianie spirali oraz zmian temperatury płynu wzdłuż wysokości płaszczu, Kandydat wykazał, że zastosowanie w wymienniku nowego rozwiązania w postaci przegród ciągłych, wprowadzających dodatkowe zawirowania w przepływie, istotnie zmniejszyło obserwowane w rekuperatorze referencyjnym (bez przegród) zjawisko blokowania wypływu i spadku temperatury ogrzanego czynnika w górnej części pionowego wymiennika i zwiększyło wymianę ciepła dla niewielkich strumieni czynnika roboczego, tj. przy znaczącym udziale konwekcji naturalnej. Badania pokazały też istotny wpływ usytuowania przegród ciągłych w płaszczu rekuperatora. Ich umiejscowienie w górnej części pionowego wymiennika pozwoliło na eliminację lokalnych przegrzań, prawie jednorodny rozkład temperatur wody i ścianki spirali oraz zwiększenie współczynnika wymiany ciepła. Na podstawie uzyskanych wyników badań doświadczalnych Kandydat zaproponował nową korelację, w której uzależnił średnią liczbę Nusselta dla konwekcji mieszanej po stronie płaszczu wymiennika, nie tylko od liczb kryterialnych Grashoffa i Prandtla, ale też od liczby Deana – miary względnej intensywności wtórnego przepływu rotacyjnego oraz od współczynnika korekcyjnego będącego funkcją geometrii przegród i ich konfiguracji wewnątrz płaszczu rekuperatora.

Dalsze badania nad intensyfikacją wymiany ciepła po stronie płaszczu wymiennika, poprzez zwiększenie cyrkulacji czynnika omywającego węzownicę, dotyczyły zmiany położenia szczeliny pojedynczej i podwójnej przegrody, umieszczonej w dolnej części rekuperatora, względem wlotu czynnika roboczego, dla różnych stałych wartości gęstości strumienia ciepła i strumienia masy. Wyznaczone na podstawie pomiarów rozkłady temperatury oraz lokalnej i uśrednionej liczby Nusselta potwierdziły istotny wpływ położenia przegród na intensywność wymiany ciepła oraz znaczący wpływ konwekcji naturalnej przy małych liczbach Reynoldsa. Porównując uzyskane liczby Nusselta z wyznaczonymi z dostępnych w literaturze zależności kryterialnych, Habilitant wskazał znaczne rozbieżności. Dlatego opracował autorską korelację empiryczną, lepiej oddającą wyniki własnych eksperymentów. Uzależnił wielkość bezwymiarowego współczynnika wymiany ciepła po stronie płaszczu od liczb Grashoffa, Deana (w której uwzględniono kształt przegrody) i Prandtla, bezwymiarowej średnicy płaszczu oraz parametrów określających ilość przegród i ich położenie względem wlotu. Ponadto, w celu oceny znaczenia zawirowania przepływu w płaszczu wymiennika węzownicowego z przegrodami, porównał jego efektywność energetyczną z innymi powszechnie stosowanymi konstrukcjami wymienników z pasywnymi turbulizatorami. Wyniki tych porównań pokazały ponad 20% wyższą efektywność energetyczną proponowanego rozwiązania dla niewielkich liczb Reynoldsa po stronie płaszczu wymiennika.

W pracach [A8]-[A10] dr inż. Rafał Andrzejczyk zaprezentował wyniki badań doświadczalnych i symulacji numerycznej pasywnych i aktywnych sposobów intensyfikacji konwekcyjnej wymiany ciepła w płaszczu wymienników „rura w rurze” i U-rurka. Opracował koncepcję stanowiska badawczego i przeprowadził obszerne pomiary cieplne wymienników obu typów, w których zastosował pasywny turbulizator przepływu, w postaci spiralnego drutu owiniętego wokół wewnętrznej rury wymiennika. Element ten wywołuje dodatkowy spiralny ruch czynnika roboczego, a wprowadzony bezpośrednio w okolice ścianki zmniejsza grubość warstwy przyściennej i intensyfikuje wymianę ciepła po stronie płaszczu wymiennika. Na podstawie uzyskanych wyników szerokich badań eksperymentalnych (dla czynników woda-woda) przedstawił zmiany współczynnika wydajności rekuperatorów, oporów przepływu oraz współczynnika przejmowania ciepła w szerokim zakresie liczb Reynoldsa, (zmiennego strumienia masy czynnika) przy stałej mocy grzałki. Porównując je z wartościami uzyskanymi z korelacji dostępnych w literaturze, pokazał znaczne rozbieżności i zaproponował nowe zależności kryterialne. Współczynnik tarcia uzależnił od liczby Reynoldsa w przypadku prostego wymiennika dwururowego i liczby kryterialnej Deana dla U-rurki oraz zmiennych z temperaturą własności wody oraz geometrii turbulizatora. Wykorzystał też klasyczną analizę ϵ -NTU do porównania wydajności energetycznej badanych konstrukcji

wymienników, w tym w szczególności współczynników przejmowania ciepła oraz proporcji mocy pompowania i mocy odbieranego ciepła w funkcji wydatku masowego przepływu. Na podstawie wyników badań przedstawił własny związek kryterialny na liczbę Nusselta po stronie płaszcza wymienników, uzależnioną od podobnych parametrów jak korelacja na współczynnik tarcia.

Kolejny innowacyjny, współautorski, pomysł Habilitanta dotyczył zwiększenia intensywności przepływu w płaszczu wymiennika przez zastosowanie wtrysku dodatkowego strumienia powietrza. Zaprezentowane w artykułach [A9] i [A10] wyniki badań eksperymentalnych pokazały, że jednocześnie zastosowanie spiralnego turbulizatora i wtrysku strumienia pęcherzyków powietrza zwiększyło prawie trzykrotnie efektywność rekuperatora w przepływie dwufazowym powietrze-woda, w porównaniu do referencyjnego zwykłego dwururowego wymiennika ciepła. Kandydat przeprowadził też symulacje numeryczne procesów cieplno-przepływowych w badanych wymiennikach, wykorzystując komercyjny kod Autodesk CFD 2016. Wyniki obliczeń pokazały, że siła odśrodkowa ma mniejszy wpływ na poprawę efektywności energetycznej wymienników dwururowych w porównaniu do efektów odpowiednio dobranego generatora wirów, pracującego w obszarze warstwy przyściennej. Potwierdziły też, że intensyfikacja mieszania czynnika roboczego eliminuje stratyfikację pola temperatury obserwowaną w płaszczu klasycznego wymiennika, zapewniając równomierny profil temperatury w objętości rekuperatora z dodatkową turbulizacją przepływu. Wyniki symulacji numerycznych znacznie jednak odbiegały od eksperymentalnych dla przepływu woda-powietrze, co Habilitant tłumaczy niedoskonałością przyjętego, uproszczonego modelu obliczeniowego dla przepływu dwufazowego.

Interesujące wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez Kandydata, stanowiące część głównego dzieła zgłoszonego do uzyskania stopnia naukowego (artykuły [A11] i [A12]), dotyczyły efektywności energetycznej grawitacyjnej rurki ciepła. Ten typ wymiennika, ze względu mały opór cieplny i prostą konstrukcję (bez elementów ruchomych i dodatkowego źródła energii) jest dziś szeroko stosowany w instalacjach HVAC i odzysku ciepła, systemach kontroli i regulacji temperatury i innych. Fizyka procesów przepływu dwufazowego, zmiany fazy i wymiany ciepła w termosyfonie jest stosunkowo mało poznana. Jednym z podstawowych, ale słabo przebadanych, niedostatków pracy grawitacyjnej rurki ciepła jest możliwość pojawienia się niestabilności procesów przemian fazowych, w tym w szczególności pulsacji ciśnienia i efektu wrzenia gejerowego oraz ich oddziaływania na parametry pracy i efektywność energetyczną termosyfonu dwufazowego. Mając to na uwadze, Habilitant przeprowadził analizę wpływu doboru czynnika roboczego, warunków cieplno-przepływowych parownika i skraplacza wymiennika oraz stopnia wypełnienia termosyfonu na jego stabilną pracę i efektywność cieplną. Badania obejmowały klasyczne czynniki dwufazowe (ciecz-para) takie jak woda, R1341a i etanol, ale także, dotychczas niestosowaną w rurkach cieplnych, syntetyczną niskowrzącą mieszaninę azeotropową o bardzo dobrych parametrach dielektrycznych - SES36. Na podstawie pomiarów czasowych zmian temperatur w parowniku, części adiabatycznej wymiennika i jego skraplaczu oraz zmian nadciśnienia w termosyfonie, Habilitant wykazał, że w przypadku wody destylowanej uzyskuje się pełną stabilność warunków pracy urządzenia – nie obserwuje się efektu wrzenia gejerowego. Użycie etanolu lub SES36 może prowadzić do wystąpienia tego zjawiska, w zależności od stopnia wypełnienia parownika cieczą i dostarczonej do niego mocy cieplnej. Pokazał też, że średni czas stabilizacji pracy grawitacyjnej rurki ciepła zależy od rodzaju płynu roboczego, stopnia wypełnienia parownika i dostarczonej mocy cieplnej. Największą efektywność energetyczną daje zastosowanie etanolu w przypadku, gdy rurka cieplna jest stosowana do odzysku ciepła odpadowego w temperaturach powyżej 75°C, lub chłodziwa R134a przy niższych temperaturach pracy parownika. Opór cieplny termosyfonu silnie zależy od stopnia wypełnienia parownika oraz wejściowej mocy cieplnej; wzrasta ze wzrostem pierwszego z parametrów, maleje dla większych wartości drugiego.

Innym obszarem zainteresowań naukowych Kandydata były badania podstawowe procesów wrzenia i kondensacji podczas przepływów dwufazowych czynników chłodniczych w kanałach. Czynniki takie charakteryzują się znaczną (w porównaniu do przepływów jednofazowych) intensyfikacją wymiany ciepła między płynem a ścianką, wywołaną dużymi prędkościami, zwiększonym poziomem turbulencji i efektem ciepła utajonego. Niepożądany jest jednak wyraźny wzrost oporów przepływu i związane z tym zwiększone zapotrzebowanie na energię napędową w systemach HVAC, gdzie wykorzystuje się czynniki dwufazowe. Mimo wieloletnich badań i licznych publikacji, dostępne w literaturze wyniki analiz i pół-empiryczne związki dają nie w pełni wiarygodne

i często rozbieżne wartości współczynników przenikania ciepła i gradientów ciśnienia dla przepływów czynników dwufazowych w kanałach. Było to inspiracją podjęcia zaawansowanych badań przez Habilitanta.

W ramach cyklu publikacji, wskazanego przez dr inż. Rafała Andrzejczyka jako głównego osiągnięcia, przedstawione zostały trzy współautorskie artykuły zamieszczone w *Experimental & Fluid Science*, *Archives of Thermodynamics* oraz w *Int. Journal of Refrigeration*, gdzie zaprezentowane zostały wyniki prac nad głębszym poznaniem fizyki przepływu tetrafluoretanu (R134a) w poziomym kanale – czynnika roboczego powszechnie stosowanego w instalacjach chłodniczych i klimatyzacyjnych. Obszerne badania eksperymentalne, prowadzone we współpracy z zespołem naukowym z NTNU Trondheim i na dostępnym w tym ośrodku badawczym stanowisku laboratoryjnym, dotyczyły głównie analizy oporów przepływu, spadku ciśnienia dwufazowego, zjawisk porywania i osadzania kropeł oraz tworzących się struktur dwufazowych podczas przepływu R134a w konwencjonalnym kanale poziomym. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów zostały zaprezentowane na wykresach spadku ciśnienia tarcia (w adiabatycznej części sekcji pomiarowej) w funkcji zmiennego strumienia masy i stopnia suchości mieszaniny parowo-cieczowej R134a oraz na zdjęciach struktur przepływu dwufazowego (uzyskanych z szybkiej kamery). Pokazały one wzrost spadku ciśnienia adiabatycznego ze zwiększaniem wydatku czynnika i jego stopnia suchości. Habilitant przebadał też wpływ temperatury przechłodzenia R134a (na wlocie do sekcji pomiarowej) na opór przepływu wywołany tarcie czynnika, przy stałej wartości stopnia suchości i temperatury nasycenia. Dla wyższych przechłodzeń, maksimum spadku ciśnienia przesunęło się w kierunku wyższych wartości stopnia suchości mieszaniny parowo-cieczowej R134a. Wnikliwe porównania własnych wyników pomiaru z dostępnymi w literaturze korelacjami pokazały znaczne rozbieżności w oszacowaniach oporów przepływu. Habilitant w przekonujący sposób uzasadnia je dotychczas prowadzonymi uproszczonymi analizami, w których korelacje oparto na wynikach badań dla przepływu mieszaniny gaz/ciecz, założeniu o niezmienności struktury przepływu w określonym zakresie stopnia suchości R134a oraz pominięciu zjawisk porywania i osadzania kropeł czynnika (widocznych na zdjęciach z szybkiej kamery). Kolejne badania Kandydata obejmowały analizę wpływu przyspieszenia i opóźnienia czynnika na spadek ciśnienia w kanale poziomym oraz wybranego modelu stopnia wypełnienia przekroju na wartości spadku ciśnienia tarcia w adiabatycznym przepływie dwufazowym. Na podstawie pomiarów całkowitego spadku ciśnienia w części adiabatycznej eksperymentu oraz spadków adiabatycznego ciśnienia tarcia, Habilitant wyznaczył obniżenie ciśnienia wynikające z przyspieszenia płynu, jako funkcję stopnia suchości par i masowego strumienia R134a. Porównując uzyskane wyniki z dostępnymi w literaturze korelacjami, opartymi na różnych modelach stopnia wypełnienia, wskazał znaczne rozbieżności pomiędzy wykonanymi pomiarami i wspomnianymi pół-empirycznymi związkami, wynikające z niedoskonałości korelacji dla frakcji pustych. Zaproponował własny związek, pomiędzy stopniem wypełnienia przekroju a stopniem suchości pary i masowym strumieniem przepływu, dający znacznie lepiej dopasowane wyniki eksperymentów i oszacowań korelacyjnych dla spadków ciśnienia przyspieszenia.

Opiniowane osiągnięcie naukowe, w postaci cyklu 12 publikacji, wskazane przez dr inż. Rafała Andrzejczyka jako podstawa do uzyskania stopnia naukowego doktora habilitowanego, zawiera wyniki oryginalnych i nowatorskich badań Kandydata dotyczących doskonalenia parametrów pracy wymienników ciepła, powszechnie stosowanych w systemach grzewczych, chłodniczych i klimatyzacyjnych. Na podstawie szerokich badań eksperymentalnych Habilitant dokonał wnikliwej analizy fizyki złożonych procesów przepływowych i wymiany ciepła w płynach jedno i dwufazowych, pracujących w rekuperatorach stosowanych w systemach HVAC. Na tej podstawie zaproponował autorskie modyfikacje konstrukcji wymienników węzownicowych, prostych dwururowych i typu U-rurka, które intensyfikują wymianę ciepła w obszarach i zakresie przepływowym, w którym efektywność energetyczna klasycznych konstrukcji tych urządzeń jest wyraźnie niższa.

W mojej opinii, za oryginalne osiągnięcia dr inż. Rafała Andrzejczyka należy uznać:

- zaprojektowanie i wykonanie autorskich koncepcji pasywnej i aktywnej intensyfikacji wymiany ciepła po stronie płaszcza wspomnianych wymienników ciepła, przez zastosowanie żeber, przegród i dodatkowego wtrysku strumienia pęcherzyków powietrza;

- opracowanie planów eksperymentów i własnych koncepcji stanowisk doświadczalnych, w tym modułów badawczych i sekcji pomiarowych, oraz przeprowadzenie obszernych badań eksperymentalnych oporów i struktur przepływów oraz wymiany ciepła w zmodyfikowanych konstrukcjach rekuperatorów;
- opracowanie własnych korelacji empirycznych na współczynniki tarcia i przejmowania ciepła w zmodyfikowanych konstrukcjach wymienników węzownicowych, prostych dwururowych i typu U-rurka dla czynników jedno i dwufazowych;
- znaczące poszerzenie wiedzy dotyczącej niestabilności i nieustalonych charakterystyk pracy grawitacyjnej rurki ciepła oraz możliwości wykorzystania w tego typu wymiennikach ciepła nowych, ekologicznych czynników o pożądanym właściwościach dielektrycznych;
- współautorstwo nowej metodologii wyznaczania spadków ciśnienia w przepływie dwufazowym i związku korelacyjnego wiążącego te spadki ze stopniem wypełnienia przekroju, stopniem suchości pary i masowym strumieniem przepływu, uzyskanych na podstawie zaawansowanych badań eksperymentalnych oporów przepływu, ciśnienia dwufazowego, zjawisk porywania i osadzania kropeł oraz tworzących się struktur dwufazowych podczas przepływu R134a w konwencjonalnym kanale poziomym.

Podjęta przez dr inż. Rafała Andrzejczyka tematyka badawcza dobrze wpisuje się w aktualną światową politykę energetyczną i związane z nią współczesne kierunki badań nad możliwościami efektywnego energetycznie i optymalnego wykorzystania urządzeń grzewczych, chłodniczych i klimatyzacyjnych oraz poszukiwanie bardziej ekologicznych zamienników obecnie stosowanych czynników roboczych. Należy też zwrócić uwagę, że wyniki badań Habilitanta mają istotne znaczenie praktyczne. Proponowane modyfikacje typowych konstrukcji wymienników mogą być z łatwością zaimplementowane w domowych i przemysłowych instalacjach HVAC, zaś opracowane bazy danych eksperymentalnych i korelacje empiryczne są cennym narzędziem w doborze parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, zapewniających podniesienie efektywności energetycznej i ekologicznej wymienników węzownicowych, rurowych i grawitacyjnych rurek ciepła, powszechnie stosowanych w systemach HVAC, instalacjach odzysku ciepła odpadowego i innych.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że przedstawione do recenzji osiągnięcie naukowe stanowi oryginalny i istotny wkład dr inż. Rafała Andrzejczyka w rozwój dyscypliny *Budowa i eksploatacja maszyn*, w tym w szczególności w optymalizację konstrukcji i parametrów pracy systemów grzewczych, chłodniczych i klimatyzacyjnych. Spełnia zatem warunki stawiane w postępowaniu habilitacyjnym, zapisane w Art.16 ust.2 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dn. 14 marca 2003 r (Dz.U. 2016. Poz. 882 ze zm. W Dz.U. z 2016r. poz.1311).

3. Ocena całokształtu dorobku naukowo-badawczego i publikacyjnego

Zainteresowania i dorobek naukowo-badawczy dr inż. Rafała Andrzejczyka, od początku Jego kariery akademickiej, dotyczyły spójnej tematyki związanej z doskonaleniem konstrukcji oraz parametrów pracy elementów i całych instalacji energetyki rozproszonej oraz układów chłodniczych, grzewczych i klimatyzacyjnych. Ich obszerny zakres obejmował: badania podstawowe procesów wrzenia i przepływów dwufazowych w kanałach, mikro-kanałach i mikro-strugowych wymiennikach ciepła, poszukiwania perspektywicznych ekologicznych płynów chłodniczych i energetycznych, w tym stosowanych w systemach OZE; optymalizację konstrukcji i parametrów pracy różnych typów wymienników ciepła w instalacjach HVAC i układach odzysku energii odpadowej, pod kątem ich efektywności energetycznej i ekologiczności; poszukiwania nowych, bardziej ekonomicznych energetycznie, rozwiązań związanych z jednoczesnym wytwarzaniem energii elektrycznej, ciepła i chłodu oraz magazynowaniem energii termicznej, a także poprawy komfortu cieplnego i strat energetycznych w budynkach.

Przed uzyskaniem stopnia doktora (przed 2014 rokiem), działalność naukowa Kandydata koncentrowała się na badaniach eksperymentalnych i modelowaniu matematycznym przepływów dwufazowych podczas wrzenia i kondensacji w mini-kanałach oraz na opracowaniu na podstawie ich wyników uniwersalnego modelu oporów przepływu podczas tych przemian fazowych.

Po 2014 roku Habilitant znacznie poszerzył zakres tematyczny prac naukowych. Jego zainteresowania skoncentrowały się na detalicznej, eksperymentalnej analizie procesów przepływowych i wymiany ciepła w rekuperatorach wężownicowych, rurowych i grawitacyjnej rurce ciepła, tj. wymiennikach powszechnie wykorzystywanych w instalacjach HVAC, oraz na autorskich modyfikacjach konstrukcji tych rekuperatorów pod kątem większej efektywności energetycznej. We współpracy z zespołem naukowym z norweskiego uniwersytetu NTNU Trondheim, dr inż. Rafał Andrzejczyk kontynuował też badania podstawowe, dotyczące lepszego poznania fizyki złożonych procesów przepływów czynnika dwufazowego w kanale poziomym. Wyniki badań z obu tych obszarów tematycznych zostały upowszechnione w ocenionym wyżej cyklu 12 publikacji, wskazanym przez Kandydata jako podstawa do uzyskania stopnia naukowego doktora habilitowanego. Były one też treścią 3-ch innych współautorskich artykułów zamieszczonych w prestiżowych periodykach naukowych znajdujących się w bazie JCR; 6-ciu współautorskich publikacji w czasopiśmie z listy B MNiSzW oraz 3-ch referatów opublikowanych w materiałach konferencji krajowych.

Inne badania realizowane przez Kandydata po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych dotyczyły: budowy innowacyjnego urządzenia do produkcji energii elektrycznej i chłodu z zastosowaniem gazowych silników niewielkiej mocy; wykorzystania pojemności cieplnej i ciepła przemiany fazowej materiałów zmiennofazowych w sezonowym zasobniku ciepła ze stratyfikacją termiczną; konstrukcji zasobnika ciepła i chłodu na bazie wypełnienia substancją biodegradowalną dla systemu klimatyzacji pojazdu elektrycznego; poszukiwania ekologicznych nośników energii dla układów HVAC i innych zmian konstrukcyjnych tych układów ograniczających zużycie energii; modelowania efektywności energetycznej układu sprężarkowej pompy ciepła; sposobów zagospodarowania energii odpadowej z instalacji chłodniczych i klimatyzacyjnych oraz magazynowania energii cieplnej i chłodu z systemów odzysku energii z silników jednostek pływających. Wyniki tych badań zostały opublikowane we współautorskich pracach obejmujących: 14 publikacji z listy B MNiSzW oraz 6-ciu rozdziałów w polskich monografiach pokonferencyjnych.

Wysoko oceniam dorobek publikacyjny i bibliometryczny dr inż. Rafała Andrzejczyka, na który składają się 84 pozycje, z czego 68 publikacji ukazało się po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych. Najważniejsze z nich obejmują: jeden autorski i 12 współautorskich artykułów w prestiżowych czasopiśmie znajdujących się w bazie JCR (IF od 1,235 do 3,771, z udziałem Kandydata od 15% do 85%); 36 współautorskich publikacji w periodykach z listy B MNiSzW (z udziałem Habilitanta od 20 do 50%); 6 współautorskich referatów na konferencjach międzynarodowych (dwa notowane w bazie WoS) oraz 13 wystąpień opublikowanych w materiałach konferencji krajowych, w tym 8 z nich można uznać za rozdziały w monografiach pokonferencyjnych.

Zgodnie z danymi z bazy *Web of Science* widoczne w niej prace Pana Doktora były cytowane 121 razy, sumaryczny *Impact Factor* czasopiśm, w których zostały zamieszczone wynosi 36,98, zaś indeks *Hirscha* Kandydata $IH=7$.

Dorobek naukowo badawczy i aplikacyjny Habilitanta uzupełniają 4 współautorskie, krajowe zgłoszenia patentowe (udział Kandydata od 30 do 70%); dotyczące innowacyjnych modyfikacji konstrukcji wymienników ciepła oraz przenośnego magazynu energii termicznej do współpracy z układem klimatyzacyjnym pojazdu elektrycznego. Za to ostatnie zgłoszenie, Kandydat był nominowany do Polskiej Nagrody Inteligentnego Rozwoju Prezesa Urzędu Patentowego RP w 2018 roku w kategorii Młody Innowacyjny Lider Nauki.

Dr inż. Rafał Andrzejczyk posiada ponad 10-letnie doświadczenie w realizacji projektów badawczych – był wykonawcą w 7 grantach, w tym trzech międzynarodowych i czterech finansowanych przez NCBiR i NCN. Ma też już znaczące, jak na młodego badacza, osiągnięcie w kierowaniu zespołami badawczymi – jest kierownikiem dużego projektu finansowanego przez NCBiR, kierował też 4 projektami ze środków statutowych macierzystej jednostki.

Za swoje osiągnięcia naukowe Habilitant był wyróżniony: dwiema nagrodami za najlepsze prezentacje na międzynarodowych konferencjach młodych badaczy w 2015 roku; trzema nagrodami Rektora Politechniki Gdańskiej dla „Młodych Pracowników Nauki” (2013, 2014, 2015) oraz dwiema nagrodami indywidualnymi III stopnia Rektora Politechniki Gdańskiej za szczególne osiągnięcia na

Analiza całokształtu dorobku naukowego i aplikacyjnego dr inż. Rafała Andrzejczyka wskazuje na Jego bardzo dużą aktywność badawczą i ekspercką, obejmującą szeroką gamę zagadnień w spójnym obszarze tematycznym, związanym z doskonaleniem konstrukcji i parametrów pracy elementów instalacji urządzeń grzewczych, klimatyzacyjnych, chłodniczych i energetyki rozproszonej. Tematyka ta dobrze wpisuje się w aktualną światową politykę energetyczną i związane z nią współczesne kierunki badań nad możliwościami efektywnego energetycznie i przyjaznego dla środowiska wykorzystania wspomnianych instalacji, przez doskonalenie ich konstrukcji i optymalizację parametrów pracy - na bazie lepszego poznania fizyki zjawisk, przy wykorzystaniu możliwości współczesnych technik pomiarowych i wizualizacyjnych oraz symulacji komputerowych.

Wyniki szerokich badań eksperymentalnych, proponowane na ich podstawie modyfikacje konstrukcji wybranych maszyn cieplnych, opracowane bazy danych i korelacje empiryczne stanowią znaczący, autorski wkład Kandydata w rozwój dyscypliny naukowej *Budowa i eksploatacja maszyn* (obecnie *Inżynieria mechaniczna*). Spełnione są tym samym wymogi zapisane w §4 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego z dnia 1 września 2011 (Dz.U. Nr 196, poz. 1165).

4. Ocena dorobku dydaktycznego, organizacyjnego i popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej

Wysoko oceniam osiągnięcia dr inż. Rafała Andrzejczyka w zakresie kształcenia studentów i doktorantów, zwracając uwagę na szeroki zakres nauczanych przez Niego treści. W swojej krótkiej, pięcioletniej karierze nauczyciela akademickiego Kandydat prowadził wykłady, ćwiczenia i laboratoria w języku polskim i angielskim na studiach I i II stopnia z: *Wymiany ciepła i wymienników, Termodynamiki technicznej, Podstaw systemów chłodniczych i klimatyzacyjnych, Metod komputerowych w technice cieplnej, Przepływów dwufazowych instalacjach przemysłowych, Termodynamiki procesów nierównowagowych oraz Odzysku ciepła w instalacjach chłodniczych*. Był promotorem 17 prac dyplomowych inżynierskich, 6 prac magisterskich oraz 10 indywidualnych projektów studenckich. Od 2018 roku jest też promotorem rozprawy doktorskiej dotyczącej badań teoretycznych i eksperymentalnych krótkoterminowego magazynu ciepła zintegrowanego z konstrukcją budynku. W 2017 roku Pan Doktor został wyróżniony nagrodą zespołową I-ego stopnia Rektora Politechniki Gdańskiej za wyróżniającą działalność dydaktyczną.

Osiągnięcia organizacyjne Kandydata związane są z organizacją kształcenia i badań. Jest On autorem projektów i nadzorował merytorycznie budowę trzech stanowisk naukowo-dydaktycznych do badania procesów ciepło-przepływowych w urządzeniach chłodniczych i pompach ciepła, dwufazowego przepływu adiabatycznego oraz zjawiska wrzenia objętościowego.

W ocenie aktywności Habilitanta w promocji nauki i techniki, należy zwrócić uwagę na Jego udział w komitetach naukowych i organizacyjnych krajowej i międzynarodowej konferencji (Konferencja Młodych Naukowców, Business Potentials for SMEs with Bioeconomy (Gdańsk, 2018), przewodniczenie sesji naukowej międzynarodowej konferencji we Włoszech (5th Micro nad Nano Flows Conference (2016, Mediolan) oraz wygłoszenie plenarnego referatu na International Conference Proclimate (Warszawa, 2015). Pan Doktor jest też członkiem Rady Naukowo-Programowej Stowarzyszenia Pomp Ciepła.

Pozytywnie oceniam dorobek dr inż. Rafała Andrzejczyka w zakresie współpracy międzynarodowej. W ramach kilku staży i wizyt studyjnych w NTNU Trondheim prowadził On wspólnie z partnerami norweskimi badania fizyki przepływów czynnika dwufazowego w kanale poziomym. Ich wyniki udokumentował kilkoma wspólnymi publikacjami. Kandydat jest lub był członkiem dwóch konsorcjów międzynarodowych powstałych do realizacji wspólnych badań w ramach Programu FP7 oraz Interreg South Baltic Programme, gdzie reprezentuje bądź reprezentował IMP Gdańsk i Politechnikę Gdańską.

Znaczące są osiągnięcia Habilitanta, jak na młodego naukowca, w zakresie opiniowania publikacji zgłaszanych do prestiżowych czasopism o zasięgu światowym. Wykonał ponad 20 recenzji dla takich periodyków naukowych jak: *Int. Journal of Mechanical Science* – uzyskał certyfikat

wyróżniającego recenzenta tego czasopisma, *Energies, Sustainability, Int. J. Heat & Mass Transfer, Int. Journal of Refrigeration, Journal of Heat Transfer*, czy *Archives of Thermodynamics* – czasopisma Polskiej Akademii Nauk. Jest też członkiem zespołu redakcyjnego czasopisma *Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna*.

Kandydat posiada też widoczny dorobek we współpracy z krajowymi podmiotami gospodarczymi, samorządowymi i/lub organami władzy publicznej. Kierował lub był współwykonawcą opracowań eksperckich dotyczących: nowych rozwiązań odzysku ciepła w systemie grzewczym, studium wykonalności zasobnika ciepła ze stratyfikacją termiczną; energochłonności pralni przemysłowych z technologią ozonowania oraz opracowania dotyczącego energooszczędnych systemów chłodzenia i klimatyzacji obiektów. Wykonane one zostały na potrzeby krajowych MSP, w ramach dotacji celowej Polskiej Agencji Rozwoju Przemysłu oraz Regionalnych Programów Operacyjnych Województw Podkarpackiego i Małopolskiego. Habilitant jest też ekspertem Krajowego Forum Chłodnictwa – Związku Pracodawców w zakresie szkoleń i egzaminów personelu z dziedziny techniki chłodniczej, klimatyzacyjnej i pomp ciepła.

Podsumowując dorobek dr inż. Rafała Andrzejczyka w zakresie osiągnięć dydaktycznych i popularyzatorskich oraz współpracy międzynarodowej stwierdzam, że spełnia on w stopniu ponadprzeciętnym wymogi zapisane w §5 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego z dnia 1 września 2011 (Dz.U. Nr 196, poz. 1165).

5. Wniosek końcowy

Uwzględniając przeprowadzoną powyżej szczegółową ocenę cyklu 12 publikacji, wskazanego jako osiągnięcie naukowe będące podstawą nadania stopnia doktora habilitowanego, oraz ocenę całokształtu osiągnięć naukowo-badawczych, dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzatorskich dr inż. Rafała Andrzejczyka, stwierdzam, że Jego osiągnięcia we wszystkich tych aspektach spełniają wymagania zapisane w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14 marca 2013 roku oraz w §4 i §5 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego z dnia 1 września 2011 (Dz.U. Nr 196, poz. 1165).

W realizacji ambitnych zadań badawczych Habilitant wykazał się kompetencjami oraz dojrzałością naukową i ekspercką, uzasadniającymi uzyskanie statusu samodzielnego badacza. W znaczący sposób powiększył swój dorobek naukowo-badawczy i publikacyjny po doktoracie, a Jego wskaźniki bibliometryczne są wyróżniające. Wyniki prac Habilitanta mają znaczący aspekt poznawczy i praktyczny w doskonaleniu konstrukcji i parametrów pracy współczesnych urządzeń i instalacji grzewczych, chłodniczych, klimatyzacyjnych i energetyki rozproszonej. Wnoszą więc istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej *Budowa i eksploatacja maszyn* (obecnie *Inżynieria mechaniczna*).

Wnioskuje więc do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Gdańskiej o nadanie dr inż. Rafałowi Andrzejczykowi stopnia doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie *Budowa i eksploatacja maszyn*.

