

Jan J. Wajs

Załącznik 2a

Katedra Energetyki i Aparatury Przemysłowej

Wydział Mechaniczny

Politechnika Gdańska

ul. G. Narutowicza 11/12

80-233 Gdańsk

AUTOREFERAT

Przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych zgodnie z rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 10 listopada 2015 r. (Dz. U. z 2016 r., poz. 1586)

Gdańsk 2017

SPIS TREŚCI

1. Imię i nazwisko	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu	3
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym	3
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	3
4.2. Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego	4
4.3. Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz ze wskazaniem ich ewentualnego wykorzystania	6
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	21
5.1. Prace zrealizowane dla potrzeb rozprawy doktorskiej	21
5.2. Pozostała działalność naukowo-badawcza	22

1. Imię i nazwisko:

Jan J. Wajs

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej:

- 2007 **stopień doktora nauk technicznych** w dyscyplinie naukowej Budowa i Eksploatacja Maszyn (specjalność: Termodynamika i wymiana ciepła), Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny. Tytuł rozprawy doktorskiej: *Ruch pęcherzyka w obecności ścianki w warunkach przepływu dwufazowego*,
promotor: dr hab. inż. Dariusz Mikieliewicz,
recenzenci: prof. dr hab. inż. Jan Stąsiek, prof. zw. Politechniki Gdańskiej
prof. dr hab. inż. Janusz Terpiłowski (Wojskowa Akademia Techniczna)
- 2000 **tytuł magistra inżyniera** – Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Silników Spalinowych i Sprężarek. Studia ukończone z wyróżnieniem (złota odznaka absolwenta Wydziału Mechanicznego PG).
Praca dyplomowa magisterska pt.: *Wykonanie pomiarów zawartości toksycznych składników spalin silnika Mercedes-Benz typu M111* na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn (specjalność: Systemy, Maszyny i Urządzenia Energetyczne),
promotor: dr inż. Zbigniew Kneba
recenzent: dr inż. Sławomir Makowski

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu:

- od 1.07.2007 **adiunkt** w Katedrze Energetyki i Aparatury Przemysłowej (poprzednia nazwa: Katedra Techniki Ciepłej), Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska;
- 1.11.2000 – 30.06.2007 **asystent naukowo-dydaktyczny** w Katedrze Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska;
- 1.07.2011 – 31.12.2014 **specjalista** w Ośrodku Termomechaniki Płynów, Zakład Energii Odnawialnych, Instytut Maszyn Przepływowych PAN

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm.):**4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego:**

Wysokosprawne wymienniki ciepła dla termodynamicznych obiegów ORC w oparciu o badania konwekcyjnej wymiany ciepła w minikanalach

4.2. Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Publikacje w czasopismach z bazy Journal Citation Reports (JCR):

- H-1. **Wajs J.**, Mikielawicz D., Fornalik-Wajs E., Bajor M., 2017, *High performance tubular heat exchanger with minijet heat transfer enhancement*, **Heat Transfer Engineering**, (w druku),
IF = 1.235, IF_{5-year} = 1.431 MNiSW = 20 pkt. udział habilitanta 70%
- H-2. Mikielawicz D., **Wajs J.**, Andrzejczyk R., Klugmann M., 2016, *Pressure drop of HFE7000 and HFE7100 during flow condensation in minichannels*, **International Journal of Refrigeration**, vol. 68, pp. 226-241,
IF = 2.779, IF_{5-year} = 2.877 MNiSW = 40 pkt. udział habilitanta 35%
- H-3. **Wajs J.**, Mikielawicz D., 2016, *Influence of metallic porous microlayer on pressure drop and heat transfer of stainless steel plate heat exchanger*, **Applied Thermal Engineering**, vol. 93, pp. 1337-1346,
IF = 3.356, IF_{5-year} = 3.634 MNiSW = 40 pkt. udział habilitanta 80%
- H-4. Mikielawicz D., **Wajs J.**, Gliński M., Zrooga A-B.R.S., 2013, *Experimental investigation of dryout of SES 36, R134a, R123 and ethanol in vertical small diameter tubes*, **Experimental Thermal and Fluid Science**, vol. 44, pp. 556-564,
IF = 2.080, IF_{5-year} = 2.177 MNiSW = 30 pkt. udział habilitanta 40%
- H-5. Mikielawicz D., Klugmann M., **Wajs J.**, 2012, *Experimental investigation of M-shape heat transfer coefficient distribution of R123 flow boiling in small-diameter tubes*, **Heat Transfer Engineering**, vol. 33, no.7, pp. 584-595,
IF = 0.694, IF_{5-year} = 1.024 MNiSW = 25 pkt. udział habilitanta 35%

Publikacje w czasopismach z listy B MNiSW:

- H-6 **Wajs J.**, Mikielawicz D., 2017, *Determination of dryout localization using a five equation model of annular flow for boiling in minichannels*, **Archives of Thermodynamics**, vol. 38, no. 1, pp. 123-139,
MNiSW = 13 pkt (indeks w WoS) udział habilitanta 80%
- H-7. **Wajs J.**, Mikielawicz D., Bajor M., Kneba Z., 2016, *Experimental investigation of domestic micro-CHP based on the gas boiler fitted with ORC module*, **Archives of Thermodynamics**, vol. 37, no. 3, pp. 79-93,
MNiSW = 13 pkt (indeks w WoS) udział habilitanta 70%
- H-8. **Wajs J.**, Mikielawicz D., Fornalik-Wajs E., 2016, *Thermal performance of a prototype plate heat exchanger with minichannels under boiling conditions*, **Journal of Physics, Conference Series**, vol. 745, art. Nr 032063, doi:10.1088/1742-6596/745/3/032063,
MNiSW = 15 pkt (indeks w WoS) udział habilitanta 80%

- H-9. **Wajs J.**, Mikielwicz D., Fornalik-Wajs E., Bajor M., 2015, *Recuperator with microjet technology as a proposal for heat recovery from low-temperature sources*, **Archives of Thermodynamics**, vol. 36, no. 4, pp. 49-64,

MNiSW = 13 pkt

udział habilitanta 70%

- H-10. Mikielwicz D., **Wajs J.**, Mikielwicz J., 2014, *Gas boiler as a heat source for a domestic micro-CHP*, **Journal of Power Technologies**, vol. 94, no. 4, pp. 317-322,

MNiSW = 10 pkt

udział habilitanta 70%

Publikacja monograficzna:

- H-11. Mikielwicz D., **Wajs J.**, 2015, *Wybrane zagadnienia projektowania mikrostrugowych wymienników ciepła*, Wyd. IMP PAN, Gdańsk, 2015,

MNiSW = 20 pkt

udział habilitanta 70%

Publikacje konferencyjne:

- H-12. Mikielwicz D., **Wajs J.**, Gliński M., Mikielwicz J., 2009, *Thermovisual investigation of dryout process in annular flow*, International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer in Sustainable Energy (CONV-09), Hammamet, 26.04-1.05.2009, (doi:10.1615/ICHMT.2009.CONV.1310)

udział habilitanta 40%

Patenty / zgłoszenia patentowe:

- H-13. **Wajs J.**, Mikielwicz D., Fornalik-Wajs E., **patent PL 224494**, *Strugowy wymiennik ciepła o budowie cylindrycznej, zwłaszcza do odzysku energii cieplnej z niskotemperaturowych źródeł odpadowych*, zgłoszenie z dnia 08.07.2013, uprawniony z patentu: Instytut Maszyn Przepływowych PAN, ENERGA Spółka Akcyjna,

udział habilitanta 80%

- H-14. **Wajs J.**, Mikielwicz D., Bajor M., Fornalik-Wajs E., **europeskie zgłoszenie patentowe EP 3067652 A1**, *Heat exchanger and method for exchanging heat*, zgłoszenie z dnia 11.03.2015, uprawniony z patentu: Politechnika Gdańska,

udział habilitanta 70%

Osiągnięcia konstrukcyjne i technologiczne wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

- H-15. Mikielwicz D., **Wajs J.**, mikrośilownia parowa ORC zintegrowana z domowym kotłem gazowym – prototypowa jednostka uhonorowana **złotym medalem w kategorii INNOWACJE 2014** na 10. Targach Techniki Przemysłowej, Nauki i Innowacji „Technicon Innowacje 2014”,

udział habilitanta 50%

- H-16. **Wajs J.**, Mikielwicz D., Fornalik-Wajs E., Bajor M., **innowacyjna konstrukcja płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła z technologią mikrostrugową** – uhonorowana **srebrnym medalem w kategorii INNOWACJE 2015** na 11. Targach Techniki Przemysłowej, Nauki i Innowacji „Technicon Innowacje 2015” oraz

srebrnym medalem na International Exhibition of Economic and Scientific Innovations INTARG 2015.

udział habilitanta 70%

H-17. Wajs J., prototypowe płaszczowo-rurowe wymienniki ciepła z minikanalami w pęku wymiennika – zaprojektowane i wdrożone w roli parownika i skraplacza w mikrośilowni ORC z domowym kotłem gazowym,

udział habilitanta 100%

Oświadczenia współautorów prac z omówieniem indywidualnego wkładu każdego współautora zamieszczono w Załączniku 5.

4.3. Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz ze wskazaniem ich ewentualnego wykorzystania

Wprowadzenie

Jednym z przejawów rozwoju techniki w szeroko rozumianym sektorze energetyki rozproszonej, jest budowa instalacji złożonych pod względem konstrukcji i organizacji przepływów, cechujących się wysoką efektywnością energetyczną podczas eksploatacji. Obserwowany trend wymusza pogłębianie wiedzy i poszukiwanie nowych rozwiązań w zakresie metod intensyfikacji wymiany ciepła, aby wymienniki ciepła nie stały się newralgicznym elementem zakłócającym kompaktowość takich instalacji albo podnoszącym materiałochłonność/energochłonność w procesie ich budowy. We współczesnej technice pojawia się w związku z tym szereg problemów cieplnych, powodowanych wzrostem obciążeń cieplnych urządzeń procesowych, a potęgowanych dodatkowo ich miniaturyzacją. To wyznacza nowe trendy w konstrukcji wymienników ciepła.

W rekuperacji decydujący wpływ na wydajność cieplną mają współczynniki przejmowania ciepła po obu stronach przegrody rozdzielającej czynniki robocze, a współczynnik przenikania ciepła (obecny w prawie Pecleta opisującym strumień przenoszonego ciepła na drodze przenikania ciepła) podyktowany jest wartością niższego z tych współczynników. Należy zatem ze szczególną dbałością organizować warunki wymiany ciepła po stronie nośnika o „gorszych” parametrach z punktu widzenia wymiany ciepła – kluczowego znaczenia nabiera tu jednofazowa konwekcja z udziałem gazów. Strona gazowa wymaga zatem implementacji metod intensyfikujących mechanizm konwekcyjnej wymiany ciepła, zarówno pasywnych (korespondujących przede wszystkim z rozwinięciem powierzchni wymiany ciepła), jak i aktywnych. Należy w tym miejscu wyraźnie podkreślić, że w dobie miniaturyzacji wymienników duży nacisk badawczy kładzie się na realizację przepływów czynników grzewczego/ogrzewanego w mini- i mikrokanalach, a intensyfikacja procesu wymiany ciepła osiągniata jest na drodze laminaryzacji tych przepływów.

W przypadku dwufazowej konwekcyjnej wymiany ciepła, literatura przedmiotu obfituje w doniesienia o wysokiej intensyfikacji wymiany ciepła w przepływie w mini- i mikrokanalach. Potwierdziły to również badania własne. Proces wrzenia i kondensacji jest w tym przypadku samoistnym źródłem turbulizacji (mikroturbulencji) w przepływie. Jednak problematyczne staje się modelowanie matematyczne wymiany ciepła i oporów

hydraulicznych w tej skali z uwagi na trudności, chociażby w tworzeniu map struktur przepływu, czy trudności w opisie zjawisk na powierzchni międzyfazowej. Autorzy fundamentalnych modeli wrzenia w przepływie w minikanalach są zgodni w kwestii wzrostu współczynnika przejmowania ciepła na skutek wzrostu gęstości przyłożonego strumienia ciepła, ale wpływ gęstości strumienia masy czy stopnia suchości pary nie jest już tak oczywisty – w badaniach eksperymentalnych odnotowuje się pewne rozbieżne trendy. Należy w tym miejscu wyraźnie podkreślić trudności w pomiarach parametrów termicznych w mini-/mikroskali, które mają decydujący wpływ na lokalne wartości współczynników przejmowania ciepła i dwufazowego mnożnika oporów hydraulicznych. Techniczne problemy potęgowane są szczególnie w eksperymentalnych analizach pierwszego kryzysu wrzenia. Z kolei w przypadku studiów nad kondensacją w przepływie w mini/mikrokanalach istotny jest wpływ nieadiabatywności procesu na współczynniki przejmowania ciepła i opory hydrauliczne – właściwie prowadzone badania eksperymentalne są wówczas źródłem cennych informacji dla rozwoju i walidacji modeli matematycznych.

Umiejętność poprawnego przewidywania parametrów cieplno-przepływowych w rekuperatorach jest cenna w świetle rozwoju jednostek kogeneracyjnych dla energetyki w skali domowej. O postępie w rozwoju systemu rozproszonego świadczą obecnie między innymi liczne kompleksy energetyczne lub agroenergetyczne, bazujące na lokalnych, często odnawialnych źródłach energii (OZE). Rozwój tych instalacji jest wspomagany polityką prosumencką, a dzięki ustawie o odnawialnych źródłach energii uprzywilejowane stają się tzw. mikroźródła (również kogeneracyjne), czyli jednostki o zainstalowanej mocy elektrycznej do 40 kW. Daje to ogromną szansę rozwoju jednostek wytwórczych micro-CHP instalowanych dla pokrycia potrzeb gospodarstw domowych. Do kluczowych elementów składowych w jednostkach micro-CHP należy zaliczyć silniki wirnikowe/objętościowe oraz wymienniki ciepła. Aplikacja nowoczesnych, kompaktowych konstrukcji parowników, skraplaczy i tzw. regeneratorów będzie miała zatem bezpośredni wpływ na sprawność termiczną realizowanych obiegów termodynamicznych, co pośrednio przełoży się na atrakcyjność technologii stosowanej w kogeneracyjnym mikroźródle.

Głównym celem naukowym prac badawczych wchodzących w skład osiągnięcia habilitacyjnego było opracowanie metod wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła oraz wyznaczania oporów przepływu podczas konwekcji jedno- i dwufazowej w minikanalach do zastosowania w nowoczesnych konstrukcjach kompaktowych wymienników ciepła, w szczególności dla potrzeb mikrośilowni parowych. Realizacja celu wymagała:

- przeprowadzenia badań konwekcji jednofazowej i dwufazowej w minikanalach z udziałem niskowrzących czynników organicznych (w aspekcie implementacji technologii ORC w węźle cieplnym gospodarstwa domowego),
- opracowania metod wyznaczania integralnych charakterystyk cieplno-przepływowych dla wrzenia i kondensacji w przepływie dla:
 - rozwoju dyssypacyjnego półempirycznego modelu matematycznego opisującego proces wrzenia (projektowanie parowników),
 - uogólnienia modelu wrzenia dla potrzeb opisu procesu kondensacji w minikanalach z uwzględnieniem wpływu efektów nieadiabatywności (projektowanie skraplaczy),

- matematycznego opisu wysychania filmu cieczowego na ścianie kanału (ang. dryout'u) w minikanalach,
- zaprojektowania wysokosprawnych konstrukcji kompaktowych wymienników ciepła dla mikrośilowni parowej ORC (parownik, skraplacz, regenerator).

Wyniki prac o charakterze badawczym i projektowym przyczyniły się do opracowania konstrukcji i budowy w pełni funkcjonalnej mikrośilowni parowej z technologią ORC do zastosowań w gospodarstwach domowych i małych przedsiębiorstwach.

Omówienie prac i osiągniętych rezultatów

Za punkt startowy dla prac wliczonych do dorobku habilitacyjnego uważam swój staż naukowy w South Bank University (wyszczególniony w zał. 3, III [L-2]), dający możliwość wglądu w realizowane tam badania wrzenia w przepływie. Dało to bodziec do sporządzenia wniosku o grant KBN – grant został pozyskany przez prof. D. Mikieliewicza i realizowany w latach 2003-2005 (zał. 3, II [J-10]). **Jestem autorem projektu pierwotnej wersji stanowiska do badań procesu wrzenia w przepływie w minikanalach, a także współwykonawcą tego stanowiska** – stanowisko zostało zbudowane w Katedrze Techniki Ciepłej Politechniki Gdańskiej (KTC PG). Badania w ramach projektu przeprowadzono z udziałem czynnika R123. **Byłem odpowiedzialny w tym okresie za przygotowanie stanowiska, opracowanie metodyki prowadzenia pomiarów i obróbki zarejestrowanych danych. Uczestniczyłem również w badaniach eksperymentalnych i modelowaniu matematycznym współczynników przejmowania ciepła.** Ewidencję prac w tym zakresie zawierają doniesienia konferencyjne i rozdział w książce (zał. 3, II [E-8]).

Publikacja [H-5] stanowi podsumowanie głównych osiągnięć prac badawczych zrealizowanych w ramach w/w projektu. W pierwszej kolejności przedstawiono w niej wyniki „skalowania” stanowiska w warunkach konwekcji jednofazowej (poprzez porównanie eksperymentalnych wartości współczynników przejmowania ciepła z wartościami obliczonymi za pomocą szeregu kluczowych korelacji dostępnych w literaturze przedmiotu). Zasadnicza część publikacji poświęcona jest natomiast omówieniu wyników systematycznych badań eksperymentalnych i modelowania matematycznego procesu wrzenia czynnika R123 w srebrnych rurkach o średnicy wewnętrznej odpowiednio 2.3 i 1.15 mm. Sekcją pomiarową w tych badaniach stanowiła pojedyncza rurka pionowa o długości 38 cm. Za pomocą wykresów scharakteryzowano wpływ gęstości strumienia masy oraz gęstości strumienia ciepła na współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia R123 w przedziale temperaturowym 30-85°C. Wyniki eksperymentalne porównywano z wynikami modelowania matematycznego z udziałem korelacji dostępnych w literaturze. **Znaczącym osiągnięciem badawczym zamieszczonym w pracy [H-5] jest udokumentowanie dla procesu wrzenia w minikanalach zjawiska występowania dwóch lokalnych ekstremów w profilach współczynnika przejmowania ciepła wykreślanych w funkcji stopnia suchości pary (przebieg określany w literaturze jako „M-shape”).** Zjawisko to było wcześniej sygnalizowane jedynie w pracach teoretycznych Bar-Cohena i Rahima (2009).

Ważnym akcentem w nurcie własnych prac nad procesami wrzenia w minikanalach były badania krytycznego strumienia ciepła związanego z wysychaniem filmu cieczowego na

ścianie kanału (pierwszego kryzysu wrzenia typu dryout) – lata 2006-2009. Prowadziłem je jako kierownik projektu (wyszczególnionego w zał. 3, II [J-1]). Eksperymentalna analiza około-krytycznych procesów wymiany ciepła jest stosunkowo trudna do realizacji w miniskali. Pomiary temperatury ściany kanału w precyzyjnie ustalonej lokalizacji wysychania filmu cieczowego na ścianie kanału są niezbędne do określenia krytycznych wartości strumienia ciepła. Konieczna jest przy tym restrykcyjna kontrola parametrów termiczno-przepływowych czynnika, ponieważ w warunkach kryzysu wrzenia gwałtownemu spadkowi lokalnej wartości współczynnika przejmowania ciepła towarzyszy jednocześnie wzrost temperatury ścianki kanału – mogący spowodować utratę spójności materiału (zniszczenie) sekcji pomiarowej. **Jestem współautorem zmian konstrukcyjnych w stanowisku eksperymentalnym, niezbędnych dla jego adaptacji do potrzeb projektu. Jestem autorem oryginalnej koncepcji aplikacji bezkontaktowej metody pomiaru temperatury ściany kanału w badaniach kryzysu wrzenia – zastosowania techniki termowizyjnej celem „ciągłego” pomiaru temperatury na zewnętrznej ścianie sekcji pomiarowej i lokalizacji kryzysu typu dryout.** Warto podkreślić, że w tej tematyce było to wówczas pionierskie osiągnięcie badawcze na tle prac prowadzonych w wiodących ośrodkach europejskich – co w 2009 r. potwierdziły moje wizyty w laboratoriach prof. Johna R. Thome’ego – EPFL, Lausanne (zał. 3, III [A-4]) i prof. Björna Palma – KTH, Stockholm (zał. 3, III [A-5]), jak również przegląd literatury przedmiotu sporządzony na poczet sprawozdania z realizacji projektu badawczego (zał. 3, II [F-3]). Własną publikację dokumentującą implementację metody termowizyjnej w badaniach eksperymentalnych kryzysu wrzenia, stanowi pozycja [H-12]. Jest to artykuł konferencyjny, w którym raportowano wyniki badań kryzysu wrzenia czynnika R123 w rurkach pionowych o średnicach wewnętrznych odpowiednio 1.15 i 2.3 mm. W mojej opinii jest to pierwsze oficjalne opublikowanie metody termowizyjnej w badaniach eksperymentalnych kryzysu wrzenia. Publikacja zawiera opis stanowiska badawczego i szereg charakterystyk rozkładu temperatury ściany oraz współczynnika przejmowania ciepła na długości sekcji pomiarowej. Charakterystyki te wyeksponowano wraz ze stosownymi obrazami termowizyjnymi, na których zaakcentowano lokalizację wysychania filmu cieczowego, które prowadzi do kryzysu wrzenia typu dryout.

Podsumowanie koordynowanych prac eksperymentalnych nad kryzysem wrzenia typu dryout dla 4 czynników roboczych (R123, R134a, SES36 i bezwodnego alkoholu etylowego) stanowi publikacja [H-4]. W przywołanej publikacji zaakcentowano zastosowanie techniki termowizyjnej w określaniu lokalizacji kryzysu wrzenia, za pomocą charakterystyk wykazano wpływ średnicy kanału, gęstości strumienia masy i stopnia suchości pary na krytyczny strumień ciepła.

W zakresie prac teoretycznych związanych z wysychaniem filmu cieczowego na ścianie kanału **jestem autorem oryginalnego pięciorównaniowego modelu kryzysu wrzenia typu dryout.** Model ten został opisany w publikacji [H-6] i jest dedykowany procesowi wrzenia w minikanalach przy założeniu, że w pierścieniowej strukturze przepływu ma miejsce laminarny ruch filmu cieczowego na ścianie kanału. W takim przypadku pomijalny jest efekt porywania kropel cieczy z filmu i ich transportu do rdzenia przepływu. Opracowany model jest oparty na bilansach masy i pędu dla cieczy i pary w pierścieniowej strukturze przepływu. Jego uzupełnienie stanowi między innymi korelacja opisująca rozkład

gęstości strumienia ciepła w filmie cieczowym na ścianie kanału (przywołana z pracy wymienionej w zał. 3 pod pozycją II [A-4]), kryterium oszacowania początku struktury pierścieniowej wrzenia (bazujące na parametrze Martinelli'ego) i gęstości strumienia masy kropeł na początku tej struktury. Współczynnik wymiany masy związany z osadzaniem się kropeł z rdzenia przepływu na filmie cieczowym (pokrywającym ścianę kanału) opisano za pomocą empirycznej korelacji Sugawary (1990). W pracy [H-6] poza opisem 5-równaniowego modelu dokonano także weryfikacji wyników obliczeń przeprowadzonych z jego wykorzystaniem. Wyniki porównano zarówno z wyniki własnych badań eksperymentalnych (kryzys wrzenia etanolu w rurkach o średnicach wewnętrznych 1.15 i 2.3 mm), jak i wynikami modelowania matematycznego z udziałem 3-równaniowego modelu opracowanego przez dr. inż. M. Glińskiego (2010) w ramach kierowanego przeze mnie projektu badawczego. W konfrontacji z modelem 3-równaniowym, własny model w każdym przypadku dostarczał wyników zdecydowanie bliższych wynikom badań eksperymentalnych.

Kolejny etap moich prac z dziedziny przepływów dwufazowych w minikanalach stanowiły badania kondensacji. Koordynatorem merytorycznym prac był prof. D. Mikielwicz, kierownik projektu badawczego (wyszczególnionego w zał. 3, II [J-9]). **Jestem autorem oryginalnego rozwiązania sekcji pomiarowej do badań lokalnych współczynników przejmowania ciepła podczas kondensacji w minikanalach, metodyki prowadzenia pomiarów i redukcji danych. Uczestniczyłem również w części badań eksperymentalnych** – przerwa wynikała z mojego udziału w 3-miesięcznym programie szkoleniowym „Nuclear Engineering training session” (zał. 3, III [A-3]) oraz 3-miesięcznego stażu zagranicznego (zał. 3, III [L-1]). W moim przekonaniu godne podkreślenia jest pionierskie podejście do konstrukcji sekcji badawczej i jej uniwersalność (możliwość prowadzenia badań minikanalów pionowych, poziomych i nachylonych, również metodą stałej temperatury ściany kanału). Uważam ją za konkurencyjną do sekcji stosowanych przez innych badaczy tego typu zjawisk. Skróconą charakterystykę stanowiska badawczego z autorską sekcją pomiarową zamieszczono w pozycji [H-2].

W ramach wyżej wymienionego projektu poświęconego kondensacji przeprowadzono systematyczne badania eksperymentalne w rurkach o średnicy wewnętrznej 2.3 mm z użyciem niezbadanych dotychczas czynników HFE 7000, HFE 7100 i R365mfc. Określono rozkłady temperatury ściany, spadków ciśnień i współczynników przejmowania ciepła na długości badanej sekcji pomiarowej.

Własny udział w pracach nad kondensacją w minikanalach był akcentowany w kilku doniesieniach konferencyjnych (zał. 3, II [E-50], [E-59], [E-63], [E-70]), ale publikację o najwyższej randze stanowi pozycja [H-2]. Omówiono w niej wyniki badań i modelowania matematycznego oporów hydraulicznych podczas kondensacji czynników HFE 7000 i HFE 7100. Warto w tym miejscu podkreślić, że prowadzenie badań doświadczalnych nad konwekcją dwufazową z wykorzystaniem etero-organicznych związków pochodnych alkoholi (HFE) było w tym czasie podejściem nowatorskim i dostarczyło cennych informacji w świetle potencjalnego zastosowania tych czynników w układach kogeneracyjnych. Trudność stanowiło wówczas nawet pozyskanie własności transportowych tych czynników, niezbędnych do modelowania matematycznego

charakterystyk cieplno-hydraulicznych podczas kondensacji. Wyniki badań miały zatem dodatkową wartość użytkową.

Podsumowując moje prace badawcze o charakterze podstawowym chciałbym podkreślić, że zarówno badaniom wrzenia (w ramach własnego grantu), jak i kondensacji w minikanalach (wykonawca w grancie prof. D. Mikielewicza) przyświecał cel aplikacji uzyskanych wyników i doświadczeń do równolegle prowadzonego przez nas nurtu tematycznego z obszaru mikrokogeneracji (przybliżonego w dalszej części autoreferatu). Dobór czynników do badań nie był przypadkowy – wynikał z analiz ich własności w aspekcie potrzeb mikrośilowni ORC, gdzie intensywność wrzenia/kondensacji ma kluczowe znaczenie nie tylko dla sprawności termicznej procesów, ale też dla gabarytów wymienników, a przez to również instalacji. Do pogłębienia mojej wiedzy teoretycznej w zakresie konwekcji jedno- i dwufazowej w mikroskali w znacznym stopniu przyczynił się kurs naukowy, który odbyłem w École Polytechnique Fédérale de Lausanne – wiodącym europejskim ośrodku badawczym (zał. 3, III [A-4]). Szerszego spojrzenia na zagadnienia cieplno-hydrauliczne w warunkach zmiany fazy dostarczył mi natomiast 3-miesięczny program szkoleniowy w specjalistycznym ośrodku Energii Atomowej we Francji (zał. 3, III [A-3]).

W 2007 roku zostałem włączony do grupy badawczej zagadnień cieplno-przepływowych, funkcjonującej w IMP PAN w ramach Sieci Naukowej o akronimie EKO-ENERGIA (zał. 3, III [E-2]), skupiając zainteresowanie na mikrośilowniach parowych ORC (Organic Rankine Cycle). Badania w obszarze mikroźródeł parowych, które również włączyłem do osiągnięcia habilitacyjnego, kontynuuję do chwili obecnej. Inicjatorem idei mikrośilowni domowej z technologią ORC oraz opiekunem naukowym prac w latach 2007-2014 był prof. J. Mikielewicz (ówczesny dyrektor IMP PAN w Gdańsku). Swoją aktywność w pracach związanych z rozwojem mikrośilowni mogę podzielić na 3 okresy. Pierwszy z nich obejmuje lata 2007-2010. W tym okresie **byłem autorem laboratoryjnego stanowiska badawczego do realizacji obiegu parowego z udziałem organicznych czynników roboczych. Byłem również jego współopiekunem merytorycznym. Z upływem czasu stanowisko podlegało modyfikacjom mojego autorstwa – testowano obieg z autorską konstrukcją kompaktowego wymiennika ciepła (omówionego w dalszej części autoreferatu) oraz prototypowymi silnikami objętościowymi, do pracy w charakterze maszyny ekspansyjnej. Do roku 2010 przeprowadziłem systematyczne eksperymentalno-teoretyczne badania obiegów ORC z udziałem 3 czynników roboczych (R123, SES36, bezwodny alkohol etylowy) i 3 rodzajów silników objętościowych (ekspander typu scroll, ekspander zbudowany na bazie pneumatycznego silnika wiertarki i klucza pneumatycznego).** W przypadku czynnika R123 badania obejmowały zarówno stany ustalone, jak i niestabilne podczas pracy mikrośilowni. Wybrane wyniki badań opublikowano w licznych artykułach konferencyjnych, czasopismach, a także w monografii (zał. 3, II [E-1]). Dokumentację fotograficzną stanowiska z tego okresu oraz szerszy opis prac nad silnikami objętościowymi można natomiast znaleźć w pozycjach (zał. 3, II [E-24], [E-26], [E-27]).

Swego rodzaju przełom w rozwoju idei domowej mikrośilowni ORC nastąpił w roku 2011. Wytypowano wówczas kocioł gazowy De-Dietrich, konstrukcyjnie przygotowany do pracy w wysokich temperaturach. W kotle DTG X 23N dokonano pewnych modyfikacji (nie ingerując w powierzchnie ogrzewalne) celem przystosowania go do współpracy z modułem

ORC. Jestem autorem modyfikacji stanowiska badawczego, polegającej na wprowadzeniu do układu ORC domowego kotła gazowego jako autonomicznego źródła ciepła. Przeprowadziłem systematyczne badania eksperymentalno-teoretyczne nowego układu z udziałem 2 czynników roboczych, tj. alkoholu etylowego i HFE 7100 – układ pracował z silnikiem objętościowym. Syntetyczne podsumowanie prac z tego okresu stanowi publikacja [H-10]. Wykazano w niej stabilność pracy kotła w reżimie wysokotemperaturowym (temperatura oleju termalnego do 200 °C na wyjściu z kotła oraz do 180 °C na wejściu do parownika ORC), a także zdolność do generacji pary nasyconej/przegrzanej etanolu/HFE 7100 w module ORC sprzężonym z kotłem. Odnotowane parametry termiczne pary na wyjściu z parownika to odpowiednio: temperatura do ok. 150 °C przy ciśnieniu w zakresie 6.7÷7 bar (w przypadku etanolu) oraz temperatura do ok. 160 °C przy ciśnieniu ok. 6.5 bar (w przypadku HFE 7100). Warto podkreślić, że dobór czynników roboczych nie był w tych badaniach przypadkowy – bezwodny alkohol etylowy był czynnikiem roboczym wytypowanym dla mikrosiłowni rozwijanej w KEiAP PG (po własnych doświadczeniach na stanowisku ORC z okresu 2007-2010 oraz własnych doświadczeniach z badań wrzenia i kondensacji). Należy w tym miejscu także zaakcentować, że jestem wiodącym autorem projektu i koordynatorem budowy stanowiska badawczego dla IMP PAN, dedykowanego badaniom mikrosiłowni z czynnikiem HFE 7100 – projektu pierwszej tego typu instalacji IMP PAN. Prace projektowo-badawcze z udziałem kotła gazowego jako samodzielnego źródła ciepła w laboratoryjnej instalacji ORC stanowią mój drugi etap prac w obszarze mikrosiłowni. Prace te były realizowane w ramach projektu kluczowego POIG (zał. 3, II [J-7]).

Sukces osiągnięty w badaniach opisanych w pracy [H-10] umożliwił „przejście” do trzeciego etapu prac – budowy stanowiska demonstracyjnego mikrosiłowni ORC w ujęciu monoblokowym. Jestem autorem koncepcji budowy monoblokowej mikrosiłowni domowej z alkoholem etylowym jako czynnikiem roboczym w oparciu o kocioł gazowy De Dietrich DTG X 23N, jak również współautorem projektu technicznego i koordynatorem budowy prototypu [H-15]. Prototypowa mikrosiłownia została wyposażona w nowatorskie konstrukcje wymienników ciepła (parownika i skraplacza – opisane w dalszej części autoreferatu) oraz prototypową jednostopniową mikroturbinę osiową (osiągnięcie konstrukcyjne zespołu badawczego prof. K. Kosowskiego). Byłem również odpowiedzialny za dobór i montaż oprzyrządowania kontrolno-pomiarowego oraz opracowanie metodyki rozruchu stanowiska i prowadzenia pomiarów.

Rozważania teoretyczne, po systematycznych badaniach doświadczalnych prototypu, przeprowadziłem wspólnie z prof. D. Mikieliewiczem – obejmowały one analizy termodynamiczną i egzergetyczną obiegu, a także ocenę potencjału kogeneracyjnego jednostki w świetle potrzeb gospodarstwa domowego. Wybrane rezultaty tych prac zamieszczono w publikacji (zał. 3, II [E-10]). Wykazano w niej przede wszystkim funkcjonalność zaproponowanego rozwiązania konstrukcyjnego. Odnotowana w badaniach wartość generowanej mocy elektrycznej wyniosła jedynie ok. 0.75 kW, ale należy w tym miejscu podkreślić, że badania przeprowadzono przy zaniżonych parametrach termicznych pary alkoholu, w odniesieniu do założeń projektowych. Dotyczyło to zarówno obniżonego wydatku masowego pary alkoholu etylowego, jak i jej ciśnienia na wlocie do turbiny. Pewien

margines bezpieczeństwa przyjęto z uwagi na fakt testowania łożyskowania, współpracy generatora z układem odbioru mocy elektrycznej oraz na skutek braku układu automatycznej regulacji pracą turbiny. Warto w tym miejscu nadmienić, że **innowacyjne rozwiązanie było w tym czasie pierwszym w Europie monoblokowym stanowiskiem demonstracyjno-laboratoryjnym parowej mikrośilowni ORC zintegrowanej z domowym kotłem gazowym**. Potwierdzały to moje studia literaturowe oraz uczestnictwo w dwóch kongresach poświęconych technologii ORC – 1st Int. Seminar on ORC Power Systems w Delft (2011) oraz 2nd Int. Seminar On ORC Power Systems w Rotterdamie (2013). Można moim zdaniem postawić tezę, że domowy kocioł gazowy doposażony w układ realizujący obieg parowy zasługuje na miano kotła przyszłej generacji. Generacja energii elektrycznej w zaproponowanym mikroźródle (jako produktu ubocznego podczas wytwarzania ciepła) sprawia, że staje się ono atrakcyjną propozycją w świetle polityki prosumenckiej.

Osiągnięcie konstrukcyjne [H-15] wzbudziło szerokie zainteresowanie na 10. Targach Techniki Przemysłowej, Nauki i Innowacji „Technicon Innowacje 2014” i zostało uhonorowane złotym medalem w kategorii INNOWACJE 2014. Jestem autorem syntetycznego opisu mikrośilowni sporządzonego dla potrzeb konkursu. Podczas targów wygłosiłem także prelekcję pt. „Domowa mikrośilownia parowa” (zał. 3, III [I-3]).

Sukces odniesiony na targach był niewątpliwie pomocny w uzyskaniu projektu (II [J-2] / zał. 3). Jako kierownik tego projektu przeprowadziłem prace nad adaptacją mikrośilowni celem zastosowania w niej pary wodnej jako czynnika roboczego. Dla potrzeb badań zainstalowano komercyjną dwustopniową mikroturbinę (firmy Green Turbine) o mocy nominalnej 1.2 kW oraz wprowadzono podstawowe elementy automatyki w układzie zabezpieczenia turbiny oraz synchronizacji parametrów generowanego prądu elektrycznego z parametrami sieci. Wybrane wyniki badań przedstawiono w publikacji [H-7]. Wykazano w nich funkcjonalność mikrośilowni opartej na domowym kotle gazowym i zdolność do produkcji przegrzanej pary wodnej o temperaturze ok. 200°C przy ciśnieniu 5.7 bar i wydatku masowym 5.75 g/s (dotrzymano tym samym parametrów zapisanych w dokumentacji techniczno-ruchowej producenta turbiny). Maksymalna odnotowana sprawność obiegu wyniosła ok. 11%, a generowana moc elektryczna ok. 1.1 kW. Swego rodzaju niedoskonałość w obiegu stanowiła komercyjna mikroturbina cechująca się niskimi sprawnościami wewnętrznymi. Wykazała to analiza porównawcza wyników w zestawieniu z wynikami badań mikrośilowni z etanolem jako czynnikiem roboczym (również ukazana w artykule [H-7]).

Podsumowując opisane powyżej prace o charakterze konstrukcyjno-badawczym należy podkreślić, że zaowocowały one prototypem mikrośilowni parowej w ujęciu monoblokowym. Zaproponowana jednostka stanowi w moim przekonaniu dobrą propozycję mikroźródła kogeneracyjnego dla potrzeb gospodarstwa domowego. Jest pierwszym krokiem do tworzenia „typoszeregu mocy” obejmującego budynki użyteczności publicznej i małe przedsiębiorstwa. **Integracja obiegu ORC/RC z konwencjonalnym, domowym kotłem gazowym nie jest jedyną innowacją mikrośilowni. Prototypową jednostkę cechuje kompaktowość, uzyskana dzięki implementacji mikroturbiny parowej oraz nowatorskich konstrukcji wymienników ciepła.** Warto w tym miejscu podkreślić, że gabaryty wymienników ciepła i urządzenia ekspansyjnego stanowią istotną kwestię i wyzwanie

konstrukcyjne w projektowaniu mikrośilowni parowej w skali domowej. Obecnie trwają intensywne prace nad komercjalizacją mikrośilowni.

Własne prace w obszarze kompaktowych wymienników ciepła rozpocząłem w 2008 roku. Przesłankę do ich podjęcia stanowił nurt tematyczny mikrośilowni (wcześniej sygnalizowane prace własne w ramach Sieci Naukowej EKO-ENERGIA z tego okresu). Dla przypomnienia, byłem równolegle zaangażowany w badania o charakterze podstawowym, poświęcone konwekcyjnej wymianie ciepła w minikanalach. W związku z tym moją pierwszą propozycję wymiennika dla potrzeb mikrośilowni parowej ORC stanowiła konstrukcja płaszczowo-rurowa. **Jestem autorem konstrukcji płaszczowo-rurowego parownika z minikanalami w rurach pęku [H-17]**. Obliczenia o charakterze cieplno-przepływowym parownika zostały przeprowadzone przy założeniu, że wrzenie czynnika R123 zachodzi w rurkach pęku, a proces ten realizowany jest dzięki energii dostarczanej przez olej grzewczy Mobiltherm 603, omywający pęk. Dobór czynników był podyktowany własnymi pracami na laboratoryjnym stanowisku do realizacji obiegu parowego w technologii ORC (wcześniej opisany pierwszy etap prac nad mikrośilowniami). Obliczenia parownika i wybrane rysunki pokazano w rozdziale 4.2 monografii (II [E-2] / zał. 3). Efektem projektu jest konstrukcja, gdzie w pęku wymiennika zastosowano 103 rurki o długości 310 mm, średnicy wewnętrznej 2 mm i grubości ścianki 1 mm. Wkład wyposażono w przegrody wykonane z blachy o grubości 1 mm, zapewniające krzyżowy przepływ medium w płaszczu. Płaszcz zewnętrzny stanowiła rura o średnicy wewnętrznej 67 mm i grubości ścianki 3 mm. Powierzchnie czołowe wymiennika, podobnie jak dna sitowe wkładu, zaprojektowano z blachy o grubości 5 mm. Wszystkie elementy składowe wymiennika ciepła wykonano ze stali austenitycznej chromowo-niklowej (kwasoodpornej), oznaczonej według normy AISI symbolem 316L. Wydajność cieplna prototypu została przeze mnie zweryfikowana eksperymentalnie, a wybrane wyniki zawarto w publikacji (II [E-25] / zał. 3). W artykule tym wykazano ponad 3-krotnie większą gęstość przenoszonego strumienia ciepła autorskiej konstrukcji w stosunku do stosowanego wcześniej komercyjnego wymiennika płytowego (dobranego przez producenta do roli parownika w pierwotnej wersji stanowiska ORC z R123 jako czynnikiem roboczym). Osiągnięte rezultaty sprawiły, że w późniejszym okresie **autorski płaszczowo-rurowy wymiennik ciepła z minikanalami w rurach pęku został wdrożony jako parownik w monoblokowej mikrośilowni parowej z alkoholem etylowym jako czynnikiem roboczym**.

Drugą wersję autorskiego płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła z minikanalami stanowi skraplacz dedykowany dla prototypowej mikrośilowni parowej. Cechują go zmiany konstrukcyjne w konfiguracji rur pęku oraz przyłączy, dla ułatwienia odbioru pary z mikroturbiny. Obliczenia o charakterze cieplno-przepływowym skraplacza zostały przeprowadzone przy założeniu, że kondensacja alkoholu etylowego zachodzi w rurkach pęku, a odbiór ciepła zapewnia woda omywająca pęk. Dokumentację techniczną skraplacza można znaleźć w syntetycznym opisie monoblokowej mikrośilowni **[H-15]**, sporządzonym dla potrzeb konkursu w ramach targów Technicon Innowacje. Wymiennik został wykonany w firmie TKmatik. Oczekiwaną wydajność cieplną skraplacza (na poziomie 20 kW przy dochowaniu parametrów projektowych) potwierdzono w badaniach mikrośilowni z etanolem jako czynnikiem roboczym (pozycja **[H-7]**). Tematyka modelowania kondensacji w minikanalach na przykładzie autorskiego skraplacza, wraz z pomyslną eksperymentalną

walidacją prototypu była prezentowana na 5th Micro and Nano Flows Conference (zał. 3, II [E-42]). Warto podkreślić, że autorski skraplacz stanowił niezmienny element mikrośrodku również po jej adaptacji celem wprowadzenia pary wodnej jako czynnika roboczego w obiegu.

Odrębny nurt prac w zakresie wymienników dla technologii ORC był związany z płytowymi (klasycznymi) wymiennikami ciepła. Warto podkreślić, że wymienniki tej konstrukcji są preferowane dla małoskalowych jednostek ORC. **Własne prace nad pasywną intensyfikacją wymiany ciepła w wymiennikach płytowych ukierunkowano na analizę wpływu zmiany warstwy wierzchniej stalowych płyt wymiennika na jego charakterystyki cieplno-hydrauliczne. Prace były prowadzone dwuwariantowo. Pierwszy wariant badań obejmował płyty o zwiększonej chropowatości warstwy wierzchniej (płyty fabryczne poddawano w tym celu obróbce mechaniczno-strumieniowej), natomiast w drugim wariantcie płyty fabryczne pokrywano powłokami metalicznymi (chromową i miedzią) o grubości ok. 1.5 μm . Dla obu wariantów przeprowadziłem systematyczne badania eksperymentalne i modelowanie matematyczne konwekcyjnej wymiany ciepła w układzie woda-woda i/lub woda-etanol.** Prace te były realizowane w ramach programu strategicznego NCBiR (zał. 3, II [J-5]), zatem obszernie raporty z badań zarchiwizowano w IMP PAN (np. nr. 947/2011, 154/2013, 334/2013, 228/2014 i 68/2015). Wyniki rozpowszechniano w formie artykułów konferencyjnych (np. II [E-49], [E-55], [E-61] w zał. 3) lub publikacji w czasopiśmie (zał. 3, II [E-17], [E-33]), a publikację o najwyższej randze stanowi pozycja **[H-3]**. Zestawiono w niej wybrane wyniki badań nad konwekcją jednofazową w układzie woda-etanol, przy wykorzystaniu wymiennika z płytami o 3-krotnie większej chropowatości powierzchni względem płyt fabrycznych. Badania miały charakter porównawczy – w pierwszym etapie testowano wymiennik wyposażony w płyty fabryczne, natomiast w drugim etapie wymiennik z płytami o tych samych wymiarach geometrycznych lecz zmodyfikowanej powierzchni. Bezpośrednie porównanie uzyskanych charakterystyk cieplno-przepływowych było możliwe dzięki zapewnieniu równoważnych warunków prowadzenia eksperymentu, tzn. identycznych wydatków objętościowych oraz temperatur na wejściu nośników do wymiennika w odpowiednich seriach pomiarowych. Badania przeprowadzono dla dwóch temperatur czynnika grzewczego (wody) na wlocie do wymienników (odpowiednio 60 i 80°C) i stałej temperatury czynnika ogrzewanego (etanolu) na wlocie do wymiennika, wynoszącej 30°C. W ramach modelowania matematycznego obliczono średnie wartości współczynników przenikania i przejmowania ciepła (bazując na modelu Wilsona), a także współczynniki oporów tarcia. W pracy wykazano pozytywny wpływ modyfikacji warstwy wierzchniej płyt roboczych wymiennika na rekuperację wyłącznie dla struktury laminarnej i przejściowej w przepływie (zakres do ok. $Re=300$ wg. J.E. Hesselgreaves, *Compact heat exchangers, selection, design and operation*, 2001). Warto natomiast podkreślić, że rozkłady współczynników przejmowania ciepła wskazują na jednoznaczny negatywny efekt modyfikacji dla strony wodnej i pozytywny dla strony etanolowej. Występuje zatem wyraźny wpływ własności czynników (szczególnie napięcia powierzchniowego i zwilżalności) na uzyskiwane rezultaty. Chociaż uogólnienie oddziaływania chropowatości na hydrodynamiczną i termiczną warstwę przyścienną wymaga dalszych badań z udziałem większej liczby czynników roboczych i zaangażowania płyt

o zróżnicowanej chropowatości warstwy wierzchniej, publikacja [H-3] miała duże znaczenie dla własnych prac w obszarze technologii ORC. Alkohol etylowy był czynnikiem roboczym w rozwijanej mikrośilowni, zatem autorskie wymienniki płytowe z płytami o zwiększonej chropowatości warstwy wierzchniej stanowiły postęp w tym nurcie badawczym.

Kontynuację własnych prac badawczych nad kondensacją w wymiennikach płytowych miał zapewnić staż zagraniczny w Universite de Provence, który zrealizowałem w ramach stypendium Ministerstwa Gospodarki RP (podsumowany w zał. 3, III [A-1]). Przedmiotem tych prac były wymienniki płytowe firmy CIAT – badania prowadzono na zlecenie producenta. Trzymiesięczny okres stażu okazał się za krótki w świetle zaplanowanych badań kondensacji pentanu w wymiennikach płytowych, z uwagi na opóźnienie w budowie dedykowanego stanowiska. Pozwolił jedynie na budowę pomocniczego stanowiska i przeprowadzenie badań konwekcji jednofazowej w układzie woda-woda oraz skalowanie systemu termowizyjnego do opracowywanej w laboratorium metody szacowania współczynników przejmowania ciepła. Sposób finansowania prac wymuszał przy tym dochowanie poufności wyników i pozostawienie praw autorskich jednostce prowadzącej staż.

Odmierna konstrukcja wymienników płytowych (płyty z minikanalami o średnicy hydraulicznej 0.824 mm) została zaproponowana przez prof. D. Mikieliewicza w nurcie prac nad mikrośilownią parową. Szczegółowy opis konstrukcji oraz dedykowanego algorytmu obliczeniowego zawiera monografia (zał. 3, II [E-2]). **Mój udział w rozwoju konstrukcji płytowych wymienników ciepła z minikanalami sprowadzał się do propozycji zbieżnego kolektora ułatwiającego dystrybucję czynnika roboczego do minikanalów na płycie roboczej** (zgodnie z Fig. 2 pozycji [H-8]) **oraz przeprowadzenia kompleksowych badań doświadczalnych wraz z modelowaniem matematycznym konwekcji jednofazowej i dwufazowej prototypu wymiennika (z 3 wariantami minikanalów)**. Na ich podstawie weryfikowano między innymi wpływ zrywania rozbiegu termicznego w przepływie w minikanalach na charakterystyki cieplno-hydrauliczne wymiennika (celem optymalizacji konstrukcji). Prace były realizowane w ramach projektu kluczowego POIG (zał. 3, II [J-7]), zatem obszerne raporty z badań zarchiwizowano w IMP PAN (nr. 66/2013, 201/2013, 989/2013). Syntetyczne podsumowanie własnych badań płytowego minikanalowego wymiennika ciepła w warunkach wrzenia etanolu stanowi publikacja [H-8]. W artykule omówiono pokrótce konstrukcję wymiennika i wyniki jego badań cieplnych w układzie woda (czynnik grzewczy) – etanol (czynnik ogrzewany). Badania zrealizowano w zakresie stopni suchości pary etanolu do 0.5 (skutek ograniczenia stanowiskowego). Wykreślono na ich podstawie charakterystyki współczynników przenikania ciepła, modelowanych matematycznie liczb Nusselta oraz współczynników przejmowania ciepła. Godny podkreślenia jest fakt uzyskania satysfakcjonującej zbieżności współczynników przejmowania ciepła po stronie wrzącego etanolu z wynikami badań podstawowych wrzenia w minikanalach z udziałem etanolu. Zweryfikowane doświadczalnie charakterystyki płytowych wymienników ciepła z minikanalami sprawiły, że zaplanowano implementację tej konstrukcji w roli parownika w monoblokowej mikrośilowni ORC z alkoholem jako czynnikiem roboczym. Potwierdzenia dostarcza dokumentacja konstrukcyjna zawarta w [H-15]. Ostatecznie trudności z zachowaniem szczelności skręcane prototypu w podwyższonych parametrach termicznych oraz niedostatek mocy cieplnej parownika zbudowanego z 25 płyt (wykazany w pracach poprzedzających uruchomienie mikrośilowni –

raport zarchiwizowany w IMP PAN pod nr. 176/2014) wyeliminowały konstrukcję z aplikacji. Wymiennik płytowy został zastąpiony autorskim płaszczowo-rurowym wymiennikiem ciepła z minikanalami w rurach pęku (zgodnie z wcześniejszym opisem dot. osiągnięcia [H-17]) – potwierdzenia dostarcza raport IMP PAN nr. 198/2014 oraz publikacja [H-7].

Znaczące osiągnięcie konstrukcyjno-badawcze w zakresie kompaktowych wymienników ciepła stanowi nowatorska konstrukcja wymiennika mikrostrugowego. **Jestem głównym autorem koncepcji wymiennika ciepła o budowie cylindrycznej z technologią mikrostrugową/strugową. Jest to konstrukcja chroniona patentem PL 224494** (pozycja [H-13] w wykazie). Własne prace nad rozwojem konstrukcji mogę podzielić na dwa okresy. Pierwszy z nich obejmuje systematyczne badania eksperymentalne prototypów w warunkach konwekcji jednofazowej w układzie woda-woda i woda-etanol wraz z matematycznym modelowaniem współczynników przejmowania ciepła (w oparciu o metodę Wilsona) – badania przeprowadziłem w ramach programu strategicznego NCBiR (zał. 3, II [J-6]). W drugim etapie prowadzono natomiast badania w układzie gaz-ciecz – celem określenia potencjału wymiennika z punktu widzenia zastosowań do wewnętrznej regeneracji ciepła w mikrośilowniach parowych z tzw. „suchymi” czynnikami roboczymi (wymiennik zwany powszechnie regeneratorem w takim obiegu) oraz procesów odzysku ciepła z niskotemperaturowych nośników gazowych. Wymienniki prototypowe (zróżnicowane rozwiązaniami konstrukcyjnymi króćców przyłączeniowych oraz liczbą kryz w przegrodach sitowych generujących strugi) zostały zbudowane zgodnie z moim projektem przez doktoranta M. Bajora (jestem promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim – zał. 3, III [K-2]), a tematyka tego doktoratu jest ściśle związana z opatentowaną konstrukcją wymiennika. Doktorant uczestniczył w związku z tym w badaniach eksperymentalnych prototypów.

Syntetyczne podsumowanie pierwszego etapu badań autorskiego wymiennika strugowego zawiera monografia [H-11]. Omówiono w niej nowatorską konstrukcję wymiennika, stanowiska i metodykę prowadzenia pomiarów oraz wyniki systematycznych badań eksperymentalnych – podsumowane stosownymi charakterystykami cieplno-przepływowymi. Największą wartością tej publikacji stanowi w moim przekonaniu analiza porównawcza charakterystyk (gęstości przenoszonego strumienia ciepła i oporów hydraulicznych) z charakterystykami wymienników kompaktowych odmiennej konstrukcji (w tym również własnych konstrukcji, wcześniej przywołanych w autoreferacie). We wszystkich referencyjnych przypadkach badania eksperymentalne wraz z matematycznym modelowaniem wymiany ciepła przeprowadziłem samodzielnie. Jestem również autorem i współwykonawcą stosownych stanowisk doświadczalnych (zał. 3, III [Q-2(5)]). Porównawcze charakterystyki zostały skonstruowane dla niemal identycznych warunków eksperymentalnych (wydatków objętościowych czynników roboczych i ich temperatur w króćcach wlotowych wymiennika). Dla konwekcyjnej wymiany ciepła w układzie woda-woda porównanie przeprowadzone „wprost” uwidoczniało istotne zalety autorskiego wymiennika strugowego. Otóż cechuje się on większą (czasami kilkukrotnie) intensywnością transportu ciepła i kilkukrotnie niższymi oporami hydraulicznymi w stosunku do wymienników: płytowego dostępnego komercyjnie oraz płaszczowo-rurowego z minikanalami. Jedynie płytowy wymiennik ciepła z modyfikowaną warstwą wierzchnią przegrody cechuje się

nieznacznie wyższymi gęstościami strumienia ciepła (ok. 20%), ale jego opory hydrauliczne są ok. 30% wyższe po stronie czynnika ogrzewanego i 3-krotnie wyższe po stronie czynnika grzewczego. Z kolei referencyjny wymiennik płytowy z minikanalami cechuje się co prawda ok. 3-krotnie wyższą gęstością przenoszonego strumienia ciepła w stosunku do proponowanej własnej konstrukcji, ale równocześnie generuje wielokrotnie wyższe opory hydrauliczne (ok. 20-krotnie po stronie ogrzewanej i nawet 40-krotnie wyższe po stronie grzewczej). Konfrontacja z wymiennikiem mikrokanalowym płytowym wykazała ok. 2-krotnie wyższe gęstości strumienia ciepła w autorskiej konstrukcji strugowej i jednocześnie ok. 150-krotnie niższe opory przepływu. Podsumowując pokrótce konwekcję jednofazową w układzie woda-etanol na bazie charakterystyk porównawczych z wymiennikiem płytowym minikanalowym, własna konstrukcja wymiennika strugowego cechuje się co prawda ok. 2-krotnie niższymi gęstościami strumienia ciepła, ale przy tym generuje ponad 20-krotnie niższe opory hydrauliczne (po stronie wodnej) i ok. 4-krotnie niższe po stronie etanolu. Interesujące jest zestawienie rezultatów dla wymienników z technologią strugową, a mianowicie własnego wymiennika o konstrukcji cylindrycznej i wymiennika mikrostrumieniowego płytowego (patent WO 2009095896A1). Otóż w badaniach w układzie woda-woda wykazano ok. 4-krotnie niższe gęstości przenoszonego strumienia ciepła w przypadku własnej konstrukcji, ale równocześnie ponad 50-krotnie niższe generowane przez nią opory hydrauliczne.

Podsumowując wyniki badań zaprezentowane w monografii [H-11], w bardzo korzystnym świetle przedstawiają one autorską konstrukcję wymiennika ciepła o budowie cylindrycznej z technologią mikrostrugową/strugową. Tematyka była prezentowana na kilku konferencjach (np. II [E-41], [E-46], [E-47] w zał. 3), budząc duże zainteresowanie, a wybrane wyniki badań prototypu opublikowano dodatkowo w czasopiśmie – pozycja [H-9]. W artykule tym zaakcentowano potencjał wymiennika w świetle dynamicznie rozwijających się technologii zagospodarowania ciepła odpadowego. Dla szerszego spojrzenia na charakterystyki cieplno-przepływowe nowatorskiej konstrukcji, dokonano ich porównania z charakterystykami płytowego wymiennika ciepła oferowanego na rynku przez firmę Sondex. Uzyskane dla wymiennika strugowego ok. 5-krotnie wyższe gęstości strumienia ciepła przy równocześnie znacznie niższych oporach hydraulicznych potwierdzają atrakcyjność i „energetyczną konkurencyjność” proponowanej konstrukcji.

Efektom prac z udziałem wymiennika strugowego jest także publikacja [H-1]. Zestawiono w niej między innymi niepublikowane wcześniej wyniki badań eksperymentalnych i modelowania współczynników przejmowania ciepła dla konwekcji jednofazowej w układzie gaz-ciecz. W badaniach tych czynnikiem grzewczym było powietrze (o temperaturze 70, 100 i 130°C na wlocie do wymiennika), a ogrzewanym woda o stałej temperaturze 23°C na wlocie do wymiennika. Obliczone na podstawie badań liczby Nusselta odniesiono do wyników modelowania z użyciem czterech korelacji wybranych z literatury przedmiotu, wykazując potrzebę opracowania własnej korelacji, w szczególności dla strony wodnej wymiennika.

W ostatnim czasie, w układzie gaz-ciecz przeprowadzono badania porównawcze wymiennika strugowego z referencyjnym wymiennikiem płaszczowo-rurowym bez technologii strugowej. Wymiennik taki zbudowano przy dopełnieniu tożsamej powierzchni wymiany ciepła oraz wymiarów zewnętrznych. Podczas badań w najmniej korzystnych warunkach termicznych (temperatura powietrza i wody na wlocie do wymiennika

odpowiednio 70°C i 23°C) wykazano ok. 30% przyrost współczynników przejmowania ciepła, co jest szczególnie cenne dla strony gazowej. Wyniki te prezentowano podczas zebrania Sekcji Termodynamiki KTiS PAN (zał. 3, III [I-1]). Aktualnie trwają prace nad określeniem wskaźnika intensyfikacji wymiany ciepła i nad opracowaniem własnej korelacji opisującej liczbę Nusselta. Wyniki badań będą prezentowane na XXIII Zjeździe Termodynamików.

Choć opisana powyżej konstrukcja nie przeszła jeszcze procesu optymalizacji, w mojej opinii nowatorski wymiennik ciepła o budowie cylindrycznej z technologią mikrostrugową/strugową [H-13] już teraz ma potencjał aplikacyjny w obiegach termodynamicznych jednostek kogeneracyjnych. Cechuje go przede wszystkim wysoka wydajność przy stosunkowo niskich oporach hydraulicznych, co potwierdzono eksperymentalnie. Technologia strugowa pozwala uzyskać wysokie wartości współczynników przejmowania ciepła, ponieważ odpowiednio uformowana struga płynu może lokalnie rozbić warstwę przyścienną na powierzchni przegrody, redukując opór cieplny przejmowania ciepła między płynem a powierzchnią tej przegrody. Odporność konstrukcji na naprężenia cieplno-mechaniczne (wynikająca z budowy cylindrycznej), a także łatwość ograniczenia strat cieplnych stanowią dodatkowe atuty. Intensyfikacja wymiany ciepła po stronie gazowej uatrakcyjnia propozycję aplikacji wymiennika w układach zagospodarowania ciepła odpadowego z nośników gazowych (w szczególności nośników niskotemperaturowych). Wymienione cechy w połączeniu z kompaktowością sprawiają, że wymiennik stanowi również dobrą propozycję dla mikrośilowni parowych. Zastosowanie go w roli regeneratora z pewnością zaowocuje redukcją gabarytów mikrośilowni.

Połączenia własnych doświadczeń w zakresie płaszczowo-rurowych wymienników ciepła i wymienników cylindrycznych z technologią mikrostrugową dokonano w osiągnięciu wyszczególnionym pod pozycją [H-14]. Jestem głównym autorem nowatorskiego płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła z implementacją technologii mikrostrugowej w rurach pęku. Konstrukcja hybrydowa jest przede wszystkim dedykowana procesom wymiany ciepła w układzie gaz-ciecz, gdzie gaz jest schładzany/nagrzewany w pęku wymiennika (obecność technologii strugowej), a ciecz omywa pęk. Świadomie ukierunkowano intensyfikację wymiany ciepła na „gazową stronę” wymiennika, ponieważ w konfiguracji gaz-ciecz decyduje ona o efektywności procesu przenikania ciepła. Bazując na wcześniejszych doświadczeniach badawczych można postawić tezę, że proponowane rozwiązanie zapewni intensyfikację wymiany ciepła także przy małych prędkościach przepływu mediów roboczych i w przypadku małej różnicy temperatur pomiędzy nimi. **Konstrukcja podlega ochronie na mocy europejskiego zgłoszenia patentowego nr EP 3067652A1.** Dotychczasowe prace nad jej rozwojem były prowadzone w ramach projektu (zał. 3, II [J-3]) – byłem kierownikiem tego projektu. Omawiana konstrukcja była dwukrotnie prezentowana na targach (międzynarodowych i krajowych), budząc duże zainteresowanie i zyskując uznanie w postaci srebrnych medali ([H-16]). Pierwszy z nich został przyznany na International Exhibition of Economic and Scientific Innovations INTARG 2015, a drugi w kategorii INNOWACJE 2015 na 11. Targach Techniki Przemysłowej, Nauki i Innowacji „Technicon Innowacje 2015”. Warto podkreślić, że mój udział w międzynarodowych targach zaowocował nawiązaniem współpracy przemysłowej – w Centrum Transferu Wiedzy

i Technologii Politechniki Gdańskiej negocjowana jest obecnie sprzedaż licencji. Jeśli sprzedaż licencji zakończy się sukcesem, autorska konstrukcja zyska wdrożenie w przemysłowej instalacji skraplania gazu ziemnego, pełniąc funkcję skraplacza. Analizę potencjału rynkowego omawianej konstrukcji sporządziła firma INVESTIN specjalizująca się w komercjalizacji technologii na wczesnym etapie rozwoju. Z analizy tej wynika, że konstrukcja ma potencjał aplikacyjny w szeroko pojętej energetyce opartej o paliwa kopalne i odnawialne źródła energii oraz w układach odzysku ciepła odpadowego.

Podsumowując omówione prace, za najważniejsze osiągnięcia w dziedzinie nauk technicznych uważam:

- współautorstwo monoblokowej mikrośiłowni parowej z technologią ORC zbudowanej w oparciu o domowy kocioł gazowy – oryginalny w skali Europy prototyp wyposażony we własne konstrukcje kompaktowych wymienników ciepła; konstrukcja ma ogromny potencjał aplikacyjny w sektorze gospodarstw domowych i małych przedsiębiorstw;
- autorstwo i wdrożenie oryginalnej koncepcji bezkontaktowego pomiaru temperatury w badaniach kryzysu wrzenia – zastosowanie techniki termowizyjnej celem „ciągłego” pomiaru temperatury na zewnętrznej ścianie sekcji pomiarowej i precyzyjnej lokalizacji kryzysu wrzenia typu dryout;
- opracowanie 5-równaniowego modelu kryzysu wrzenia typu dryout – model bazuje na bilansie masy cieczy w filmie i w rdzeniu, bilansie masy pary w rdzeniu oraz bilansie pędu dla filmu cieczowego i rdzenia przepływu;
- autorstwo i wdrożenie oryginalnego rozwiązania sekcji pomiarowej do badań lokalnych współczynników przejmowania ciepła podczas kondensacji w minikanalach, a także dedykowanej metodyki prowadzenia pomiarów i redukcji danych;
- opracowanie i wdrożenie kompaktowego płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła z minikanalami w rurach pęku (parownik i skraplacz w monoblokowej mikrośiłowni parowej);
- opracowanie nowatorskiej konstrukcji wymiennika ciepła o budowie cylindrycznej z technologią strugową, przeprowadzenie systematycznych badań eksperymentalnych prototypów wraz z modelowaniem matematycznym, które potwierdziły wysoką efektywność wymiennika – konstrukcja ma potencjał aplikacyjny w technologiach kogeneracyjnych (np. mikrośiłowniach parowych) oraz układach odzysku ciepła z nośników niskotemperaturowych;
- opracowanie hybrydowej konstrukcji płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła ze strugową technologią w rurach pęku – konstrukcja może znaleźć aplikację w szeroko pojętej energetyce oraz w układach odzysku ciepła odpadowego (w szczególności z nośników gazowych). Finalizowana jest sprzedaż licencji – licencjobiorca planuje wdrożenie konstrukcji w przemysłowej instalacji skraplania gazu ziemnego;
- opracowanie metody intensyfikacji wymiany ciepła w wymiennikach płytowych (poprzez wzrost chropowatości warstwy wierzchniej) – metoda może znaleźć aplikację w wymiennikach płytowych dla technologii ORC z alkoholem etylowym jako czynnikiem roboczym;

- opracowanie metodyki badawczej, budowę i ciągły rozwój stanowiska doświadczalnego do prowadzenia kompleksowych badań wrzenia i kondensacji w minikanalach – badano czynniki o potencjale aplikacyjnym w mikrośrodkach parowych;
- koordynowanie badań, w których dla procesu wrzenia w minikanalach udokumentowano zjawisko występowania podwójnego maksimum współczynnika przejmowania ciepła w funkcji stopnia suchości pary (przebieg określany w literaturze jako „M-shape”);
- udział w opracowaniu płytowego wymiennika ciepła z minikanalami – ewentualna aplikacja konstrukcji w mikrośrodku parowej.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

5.1. Prace zrealizowane dla potrzeb rozprawy doktorskiej

Prace eksperymentalno-teoretyczne były skupione na analizie sił poprzecznych działających na pojedynczy pęcherzyk poruszający się w sąsiedztwie pionowej ścianki. Pęcherzyk modelowano w badaniach sztywną kulą. Głównym celem tych prac było określenie wpływu obecności ścianki na trajektorię pęcherzyka oraz zaproponowanie własnego modelu matematycznego opisującego to zjawisko. Dla realizacji celu zbudowano stanowisko pomiarowe, na którym w pierwszej fazie badań dokonano obserwacji przyściennej trajektorii ruchu pęcherzyka powietrznego, a następnie przeprowadzono systematyczne badania eksperymentalne z wykorzystaniem trzech kul o różnych średnicach wykonanych z poliamidu. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń wykazano, że pionowa ścianka kanału wyraźnie wpływa na trajektorię ruchu pęcherzyka i sztywnej kuli – w obu przypadkach jest to ruch periodyczny. Dla zakresu liczby Reynoldsa $Re = 600-1800$ (zdefiniowanej w oparciu o średnicę kuli) odnotowano ruch płaski, przy czym tor kuli jest zależny od jej początkowego położenia względem ścianki – wraz ze wzrostem odległości początkowej kula przechodzi z ruchu płaskiego w ruch prostoliniowy, co świadczy o zaniku oddziaływania ścianki. Bazując na bilansie sił działających na kulę, zaproponowano formułę umożliwiającą obliczanie siły odpychającej kulę od ścianki. W efekcie analizy danych eksperymentalnych i modelowania matematycznego zaproponowano oryginalną korelację o charakterze wykładniczym, opisującą "efekt ścianki" w funkcji liczby Reynoldsa, średnicy kuli i jej odległości od ścianki. Weryfikacji własnej korelacji dokonano za pomocą empirycznych korelacji Antala i in. (1991) oraz Tomiyamy (1998) - w obu przypadkach wykazano dobrą zgodność pod względem jakościowym i ilościowym. Przydatność własnej korelacji oceniono również dzięki dodatkowym obliczeniom wykonanym dla pęcherzyka powietrznego unoszącego się swobodnie w uspokozonej cieczy. Uzyskane wyniki były również porównywalne jakościowo i ilościowo z wynikami uzyskanymi za pomocą modelu Antala i Tomiyamy. Pozwala to wnioskować, że korelacja wyprowadzona na podstawie badań ze sztywną kulą ma podstawy fizyczne do opisu oddziaływania ścianki na pojedynczy kulisty pęcherzyk. Własną korelację "efektu ścianki" zaimplementowano do modelu przepływu pęcherzykowego w warstwie przyściennej (modelu prof. D. Mikieliewicza, opracowanego przez niego w ramach rozprawy habilitacyjnej) modyfikując w niej pole prędkości i rozkład temperatury.

5.2. Pozostała działalność naukowo-badawcza

Moją działalność naukowo-badawczą spoza wykazu dokumentującego osiągnięcie habilitacyjne można zgrupować w trzy główne nurty badawcze. Część prac ma swój początek w tematyce głównej, wcześniej omówionej w autoreferacie. Dobrym tego przykładem jest działalność naukowo-badawcza w obszarze odzysku ciepła odpadowego z procesów technologicznych lub energetycznych, gdzie technologia ORC jest technologią niejako uprzywilejowaną dla zagospodarowania niskotemperaturowych źródeł odpadowych.

Największe moje osiągnięcia w obszarze odzysku ciepła z procesów energetycznych są związane z realizacją zadania badawczego nr. 1 w programie strategicznym NCBiR (zał. 3, II [J-5]), koordynowanym przez Politechnikę Śląską. Jestem współautorem oryginalnej koncepcji efektywnego sposobu zagospodarowania ciepła odpadowego z bloków energetycznych (przede wszystkim elektrowni kondensacyjnych) w oparciu o technologię ORC. W ramach prac zaproponowano sposoby i przeprowadzono wielowariantowe analizy dla przypadku zagospodarowania ciepła odpadowego będącego do dyspozycji w referencyjnym bloku energetycznym o mocy elektrycznej 900 MWe. Nośnikiem ciepła była w tym przypadku woda podgrzana do temperatury 90°C na skutek odzysku entalpii fizycznej spalin kotłowych, a dyspozycyjna moc cieplna wynosiła 200 MWt. Warto w tym miejscu podkreślić, że schłodzenie spalin przed ich wprowadzeniem do instalacji odsiarczania jest pożądane z punktu widzenia efektywności procesu odsiarczania. W trakcie realizacji projektu powstał oryginalny sposób zagospodarowania ciepła odpadowego poprzez dogrzew obiegu ORC za pomocą pary upustowej z niskoprężnej części turbiny (chroniony patentem krajowym PL 224462, zał. 3, II [C-2]) – jestem współautorem tego patentu. Zaproponowane rozwiązanie ma potencjał aplikacyjny zarówno w modernizowanych, jak i nowo budowanych obiektach energetycznych, ponieważ przyczynia się do poprawy sprawności bloku energetycznego. Dla przywołanego wcześniej przypadku referencyjnej elektrowni o mocy 900 MWe oszacowano wzrost sprawności o minimum 1.8% – autorskie rozwiązanie umożliwi zatem dodatkową generację 16.35 MWe mocy elektrycznej. Natomiast przy założeniu dodatkowego wykorzystania ciepła z instalacji wychwyty CO_2 ze spalin, wartość ta wzrośnie nawet do 31.78 MWe (wzrost sprawności o 3.5%).

Wybrane wyniki prac związanych z przywołanym projektem i oryginalnym sposobem zagospodarowania ciepła odpadowego w bloku energetycznym były rozpowszechniane na licznych konferencjach, w czasopismach (również z listy JCR) – pozycje II [A-2], [E-12], [E-20] w zał. 3, a także w postaci rozdziałów w książkach – pozycje II [E-3], [E-5] w zał. 3. Godny podkreślenia jest jeszcze inny wymierny efekt zrealizowanego projektu, a mianowicie zbudowane w KEiAP PG wielofunkcyjne, demonstracyjno-badawcze stanowisko z technologią ORC. Pozwala ono prowadzić termodynamiczne i egzergetyczne analizy w zakresie odzysku ciepła z procesów przemysłowych lub energetycznych. Umożliwia ocenę efektywności jednoczesnej współpracy modułu parowego z kilkoma zewnętrznymi źródłami ciepła (substytutami źródeł odpadowych). Źródła te mogą być sprzęgane z modułem parowym w kilku konfiguracjach, co rozszerza możliwości badawcze i jednocześnie stanowi o oryginalności stanowiska. Jestem współautorem koncepcji i projektu tego stanowiska. Koordynowałem jego budowę, a w późniejszym okresie także prace optymalizacyjne. Byłem

odpowiedzialny za opracowanie metodyki rozruchu instalacji i prowadzenia pomiarów. Przeprowadziłem również systematyczne badania eksperymentalne, zgodnie z harmonogramem projektu (zał. 3, II [J-5]). W badaniach uczestniczyła doktorantka E. Żmuda. Uzupełniając informacje, jestem promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim mgr. inż. E. Żmudy, a tematyka tego doktoratu jest powiązana z opatentowaną koncepcją współpracy obiegu ORC z obiegiem cieplnym klasycznego bloku energetycznego. Za cykl nowatorskich prac zostałem uhonorowany nagrodą naukową Rektora PG „Sukces Roku na Wydziale Mechanicznym” (zał. 3, II [K-1]).

Autorskie analizy wykraczają poza omówioną powyżej współpracę kondensacyjnego bloku energetycznego z obiegiem ORC (w różnych konfiguracjach). Obejmują one także aspekty termodynamiczne, energetyczne, techniczno-ekonomiczne i ekologiczne współpracy obiegu ORC z układem turbiny gazowej, blokiem gazowo-parowym, węglową ciepłownią miejską, czy silnikowymi modułami kogeneracyjnymi zasilanymi biogazem. Ma to swoje odzwierciedlenie zarówno w doniesieniach konferencyjnych, jak i artykułach publikowanych na łamach czasopism naukowych (np. pozycje II [E-11], [E-18], [E-19], [E-22] w zał. 3). Tematykę promuję również na poziomie dydaktycznym – jest obecna w licznych projektach inżynierskich lub pracach magisterskich realizowanych pod moją opieką.

Inny nurt prac poświęcony jest zagadnieniom solarnym i dotyczy zarówno kolektorów słonecznych, jak i hybrydowych ogniw fotowoltaicznych. Został on zapoczątkowany w roku 2005, podczas współpracy z Gdańskimi Zakładami Teleelektronicznymi Telkom-Telmor. Na zlecenie przedsiębiorstwa prowadziłem wówczas badania weryfikujące efektywność płaskich kolektorów słonecznych firmy Yuxi Tongle Solar Energy (Chiny) i Juhmeei Enterprise Co. (Tajwan), poprzedzające ich import na rynek krajowy. Byłem też współautorem koncepcji dedykowanego stanowiska badawczego – zbudowanego w Katedrze Techniki Ciepłej zgodnie z wytycznymi stosownej normy branżowej. Równolegle uczestniczyłem w pracach nad optymalizacją prototypu nowatorskiej konstrukcji kolektora słonecznego, zbudowanego z poliwęglanu komorowego (autorstwa mgr. inż. J. Zygmunta, ówczesnego pracownika KTC PG). Innowacyjność rozwiązania polegała na zastosowaniu poliwęglanu w podwójnej roli – pokrycia dachowego i kolektora słonecznego. W porozumieniu z firmą Telkom-Telmor przeprowadziłem w świetle naturalnym i sztucznym systematyczne badania porównawcze prototypu z kolektorem komercyjnym (firmy Apanel) – wybrane wyniki tych badań opublikowano na międzynarodowej konferencji (zał. 3, II [E-84]). Prace konstrukcyjno-badawcze zaowocowały wdrożeniem produktu. Firma oferuje wspomniany kolektor do instalacji podgrzewu wody basenowej, wody użytkowej lub powietrza dla celów suszarniczych.

Innym osiągnięciem o charakterze konstrukcyjnym jest oryginalny układ do odśnieżania i oczyszczania płaskich kolektorów słonecznych lub ogniw fotowoltaicznych. Jest on chroniony patentem PL 225388 (zał. 3, II [C-2]) – jestem współautorem tego patentu. Proponowany układ był prezentowany na targach Technicon Innowacje (zał. 3, II [D-1]).

W 2015 roku rozpocząłem prace projektowo-badawcze z udziałem hybrydowych układów PV/T. Impulsem do ich podjęcia było nawiązanie kontaktu z przedstawicielami firmy Solar Life SA i firmy Invert Energy Sp. z o.o. Prowadzę od tego czasu badania z wykorzystaniem dachówek fotowoltaicznych PROTECTOR Quad35. Celem prac jest

określenie możliwości odzysku ciepła z fotowoltaicznego pokrycia dachowego i jego zagospodarowania dla potrzeb budownictwa, a także oszacowanie wpływu chłodzenia fotoogniwa na jego użytkowe charakterystyki elektryczne. Badania doświadczalne z udziałem powietrza jako chłodziwa prowadzone są w warunkach laboratoryjnych (z udziałem halogenowego symulatora światła słonecznego), jak również w warunkach naturalnych (z wykorzystaniem promieniowania słonecznego). Dla potrzeb badań wykonano specjalną obudowę fotodachówki noszącą znamiona fragmentu korytarza powietrznego utworzonego pomiędzy krokwiami dachowymi. Celem prowadzenia badań w warunkach laboratoryjnych zbudowano również dedykowany symulator światła słonecznego – w obydwu przypadkach jestem autorem koncepcji i współautorem projektów technicznych wymienionych elementów. Aktualnie prace skupione są nad optymalizacją kształtu i liczby turbulizatorów mocowanych do fotodachówki dla intensyfikacji odbioru ciepła z wykorzystaniem powietrza.

Zainteresowanie metodami konwersji promieniowania słonecznego, wzmocnione doświadczeniem badawczym, przełożyło się na sferę dydaktyki (w tym autorski wykład z systemów solarnych i laboratorium z badań kolektora słonecznego – zał. 3, III [I-5]). Jest to tematyka obecna w projektach inżynierskich i pracach magisterskich realizowanych pod moją opieką. Jedną z prac magisterskich pt. „*Analiza odzysku ciepła z hybrydowego ogniwa fotowoltaicznego*” uzyskała wyróżnienie w Konkursie im. prof. Romualda Szczęsnego dla autorów najlepszych prac dyplomowych z zakresu nowoczesnych technologii (zał. 3, III [J-1]). Technikę solarną promowałem również w ramach XIV Bałtyckiego Festiwalu Nauki (informacja o temacie autorskiej imprezy popularno-naukowej znajduje się w zał. 3, III [I-13]).

Ostatni nurt tematyczny, zaliczany przeze mnie do głównych nurtów naukowo-badawczych spoza działalności na rzecz osiągnięcia habilitacyjnego, skupia zintegrowane systemy dla energetyki rozproszonej. Zagadnienia w tym obszarze są przeze mnie podejmowane od 2014 roku i prowadzone przy współpracy z partnerami przemysłowymi, którzy zwykle definiują zakres prac. W większości przypadków rozwinięcie/kontynuacja prac badawczych o wyraźnym akcencie rozwojowym jest niestety uzależniona od sukcesu przedsiębiorstwa w pozyskiwaniu dofinansowania ze źródeł zewnętrznych (krajowych bądź europejskich). Poniżej przywołano jedynie prace o charakterze innowacyjnym.

Interesujący problem badawczo-rozwojowy podejmowałem z firmą Invert Energy. Dotyczył on wypracowanej wspólnie koncepcji modułowego inteligentnego gniazda energetycznego (o mocy znamionowej do 3 kW_e), dedykowanego pasywnym obiektom mieszkalnym, obiektom rekreacyjno-wypoczynkowym lub obiektom mobilnym (typu jachty, łódzie). Integralnym elementem systemu był magazyn energii elektrycznej oparty o technologię wodorową. Planowano między innymi wdrożenie nowatorskich rozwiązań elektrolizera, ogniwa PVT, magazynu ciepła z materiałem zmiennofazowym i wysokotemperaturowej pompy ciepła. Byłem koordynatorem merytorycznym prac poprzedzających przygotowanie projektu. Wniosek o nr. POIR.01.01.01-00-1040/15 nie uzyskał jednak dofinansowania. Pomimo tego kontynuuję badania nad hybrydowymi ogniwami fotowoltaicznymi (w zakresie wcześniej już wspomnianym w autoreferacie) oraz wysokotemperaturową pompą ciepła (prace z prof. D. Mikielwiczem).

W 2016 roku byłem członkiem zespołu badawczego (w składzie: prof. D. Mikieliewicz, dr inż. M. Jaskólski i moja osoba) opracowującego koncepcję „wyspowej” instalacji adsorpcyjnego urządzenia chłodniczego z zasobnikiem chłodu do zagospodarowania ciepła z miejskiej sieci ciepłowniczej. Tematyka jest niezwykle ważna, ponieważ dotyczy nowego kierunku dla rozwoju ciepłownictwa w Polsce. Prace były prowadzone dla Gdańskiego Przedsiębiorstwa Energetyki Ciepłej (GPEC), a w programie badawczym zakładano budowę instalacji demonstracyjnej w budynku Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki PG. Prace nie zakończyły się złożeniem wniosku o dofinansowanie z RPO Województwa Pomorskiego.

Zgodnie z ogłoszonymi w ostatnim czasie wynikami konkursu w ramach POIR, dofinansowanie uzyskał natomiast projekt o nr. POIR.02.03.02-22-0005/17, poświęcony opracowaniu wieloźródłowego systemu grzewczego dla obiektu mieszkalnego, integrującego odnawialne źródła energii, z nowatorskim systemem zarządzania tymi źródłami. Beneficjentem środków finansowych jest przedsiębiorstwo BmB Santech. Jestem członkiem interdyscyplinarnego zespołu badawczego, którego prace będą koordynowane przez prof. J. Stąsieka. Aktualnie przygotowywana jest umowa regulująca warunki współpracy z firmą BmB Santech.

Poza działalnością naukową prowadzę także działalność dydaktyczną i uczestniczę w pracach organizacyjnych Uczelni. Szczegółowy wykaz osiągnięć w obydwu obszarach został zamieszczony w załączniku 3 (sekcja III Wykazu dorobku).

Jan J. Wajs
1.08.2017