

1) Imię i Nazwisko

Bartosz Zajączkowski

2) Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- **Magister inżynier** – Wydział Mechaniczno-Energetyczny Politechniki Wrocławskiej, 11 lipca 2003 r.
- **Doktor inżynier (z wyróżnieniem)** – nadany uchwałą Rady Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej dnia 18 marca 2009 roku, na podstawie rozprawy zatytułowanej „Przenoszenie ciepła i masy w reaktorze sorpcyjnej chemicznej pompy ciepła”.

3) Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych:

- **02/2011 – obecnie** – adiunkt na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej (obecnie w Katedrze Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Cielnych).
- **04/2009 – 02/2011** – asystent na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej (Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów, Zakład Chłodziactwa i Pomp Ciepła).

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

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Cykl prac, składający się z 10 publikacji, patentu oraz stanowiska badawczego powiązanych tematycznie:

Dynamika procesów wymiany ciepła i masy w systemach adsorpcyjnych.

b) Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa),

- A1. Zajączkowski Bartosz, Królicki Zbigniew, Jeżowski Andrzej: New type of sorption composite for chemical heat pump and refrigeration. Applied Thermal Engineering. 2010, vol. 30, nr 11/12, s. 1455-1460, **MNISW: 27 punktów (2010), IF: 1.826 (2010), 3,356 (2016)**
Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu koncepcji i składu kompozytu sorpcyjnego, wykonaniu kompozytu sorpcyjnego z wykorzystaniem materiałów węglowych i adsorbentu (w tym dobór proporcji składników oraz wykonanie próbek za pomocą prasy hydraulicznej), opracowaniu koncepcji oraz budowie stanowiska eksperymentalnego, opracowanie planu eksperymentu, doborze zmiennych kontrolnych, przeprowadzeniu eksperymentu, redukcji i wizualizacji rezultatów, opracowaniu przeglądu literaturowego, wyborze i weryfikacji materiałów źródłowych, korektach edytorskich i nomenklaturowych. Mój udział w tej publikacji szacuję na 60%.
- A2. Zajączkowski Bartosz: Theoretical and experimental analysis NH₃-CaCl₂ sorption heat pump filled with graphite-carbon fiber composite, The 23rd IIR International Congress of Refrigeration: refrigeration for sustainable development, August 21-26, 2011, Prague Czech Republic, Vol. 23, 3403-3410, **MNISW (WoS): 10 punktów** *Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu koncepcji oraz budowie stanowiska eksperymentalnego,*

doborze pary roboczej, testowaniu i kalibracji systemu pomiarowego do stanowiska eksperymentalnego, wzorcowaniu aparatury pomiarowej, opracowaniu planu eksperymentu wg założeń Metody Taguchi'ego, doborze zmiennych kontrolnych, ustaleniu zakresu regulacji, przeprowadzeniu eksperymentu, redukcji i wizualizacji rezultatów, przeprowadzeniu obliczeń termodynamicznych, analizie statystycznej czułości parametrów kontrolnych, opracowaniu przeglądu literaturowego, wyborze i weryfikacji materiałów źródłowych, pracach edytorskich. Mój udział w tej publikacji wynosi 100%.

- A3. Zajączkowski Bartosz, Królicki Zbigniew, Patent PL 213582. "Wielofunkcyjny formowany nośnik czynnika aktywnego i sposób wytwarzania wielofunkcyjnego formowanego nośnika czynnika aktywnego": Int. Cl. B01J 20/20, C01B 31/00, C04B 35/536. Data przyznania: 29.03.2013.

Mój wkład w opracowaniu tego patentu polegał na współpracy przy opracowaniu koncepcji metody wytwarzania kompozytu sorpcyjnego, weryfikacji technicznej metody wytwarzania oraz składu kompozytu sorpcyjnego (w tym przeprowadzenie analizy własności kompozytu w opatentowanym zakresie jego składu oraz sił nacisku prasy hydraulicznej). Mój udział w opracowaniu tego patentu wynosi 90%.

- A4. Hałon Tomasz, Zajączkowski Bartosz, Królicki Zbigniew: Modelowanie współczynnika efektywności ziębniczej w adsorpcyjnym systemie trigeneracyjnym. Chłodnictwo. 2013, t. 48, nr 11, s. 12-17, **MNISW: 5 punktów (2012), 6 punktów (2016)**

Mój wkład w opracowanie tej publikacji polegał na opracowaniu przeglądu literaturowego (w tym: doborze par roboczych, doborze i weryfikacji równań opisujących własności substancji), opracowaniu i analizie modelu matematycznego, rozszerzeniu modelu o parametry kontrolne, opracowaniu algorytmu rozwiązania, napisaniu skryptu obliczeniowego, ustaleniu zakresu analizy efektywności systemu, pracach edytorskich i korekcie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 60%.

- A5. Zajączkowski Bartosz: Performance analysis and cycle time optimization of a single evaporator three-bed solid-sorption refrigeration system driven by low-temperature heat source. Proceedings of the 24th IIR International Congress of Refrigeration, ICR 2015, Yokohama, Japan, August 16-22, 2015

Mój wkład w opracowanie tej publikacji polegał na opracowaniu krytycznego przeglądu literaturowego, opracowaniu modelu matematycznego, opracowaniu algorytmu optymalizacji czasu cyklu pracy trójzłożowego systemu sorpcyjnego, napisaniu programu komputerowego, implementacji w kodzie źródłowym biblioteki danych termodynamicznych CoolProp, rozwiązaniu modelu i optymalizacji działania systemu trójzłożowego z wykorzystaniem opracowanych narzędzi, doborze i weryfikacji materiałów źródłowych, pracach edytorskich, opracowaniu wizualizacji danych numerycznych. Mój udział w tej publikacji wynosi 100%.

- A6. Hałon Tomasz, Zajączkowski Bartosz, Królicki Zbigniew, Wojtasik Karolina: Calculation and experimental verification of heat transfer coefficient for low pressure methanol evaporator. Proceedings of the 24th IIR International Congress of Refrigeration, ICR 2015, Yokohama, Japan, August 16-22, 2015

Mój wkład w opracowanie tej publikacji polegał na współpracy przy opracowaniu przeglądu literaturowego, weryfikacji źródeł, korekcie modelu matematycznego, opracowaniu planu eksperymentu, weryfikacji poprawności danych eksperymentalnych, weryfikacji matematycznej korelacji w zestawieniu z wynikami badań eksperymentalnych, redukcji danych, napisaniu skryptu obliczeniowego, ustaleniu zakresu analizy efektywności systemu, pracach edytorskich i korekcie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 30%.

- A7. Zajączkowski Bartosz: Optimizing performance of a three-bed adsorption chiller using new cycle time allocation and mass recovery. Applied Thermal Engineering. 2016, vol. 100, s. 744-752, **MNISW: 40 punktów, IF: 3,356 (2016)**

Mój wkład w opracowanie tej publikacji polegał na opracowaniu krytycznego przeglądu literaturowego, opracowaniu koncepcji pasywnego odzysku ciepła przy jednoczesnym

odzysku masy (w trójfazowym systemie adsorpcyjnym), opracowaniu modelu matematycznego, napisaniu programu komputerowego w języku Python do rozwiązywania układu równań różniczkowych składających się na model matematyczny, implementacji w kodzie źródłowym biblioteki danych termodynamicznych CoolProp, rozwiązaniu modelu numerycznego, doborze i weryfikacji materiałów źródłowych, pracach edytorskich, opracowaniu wizualizacji danych numerycznych. Mój udział w tej publikacji wynosi 100%.

- A8. Zajączkowski Bartosz, Halon Tomasz, Królicki Zbigniew: Experimental verification of heat transfer coefficient for nucleate boiling at sub-atmospheric pressure and small heat fluxes. Heat and Mass Transfer. 2016, vol. 52, nr 2, s. 205-215, **MNiSW: 25 punktów (2015), IF: 1.233 (2015)**

Mój wkład w opracowanie tej publikacji polegał na opracowaniu krytycznego przeglądu literaturowego w kontekście znanych korelacji współczynnika wymiany ciepła podczas wrzenia w obniżonym ciśnieniu, projektowaniu i konstrukcji instalacji eksperymentalnej, kalibracji układu pomiarowego, opracowaniu planu eksperymentu, napisaniu skryptu obliczeniowego, analizie statystycznej błędów pomiarowych, pracach edytorskich i korekcie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 50%.

- A9. Halon Tomasz, Zajączkowski Bartosz, Michaie Sandra, Rulliere Romuald, Bonjour Jocelyn, Experimental study of low pressure pool boiling of water from narrow tunnel surfaces, International Journal of Thermal Sciences, 2017, 121, 348-357, **MNiSW: 45 punktów, IF: 3,615 (2016)**

Mój wkład w opracowanie tej publikacji polegał na opracowaniu krytycznego przeglądu literaturowego w kontekście wrzenia w obniżonym ciśnieniu, doborze, przygotowaniu i analizie próbek powierzchni rozwiniętych, opracowaniu planu eksperymentu, weryfikacji i redukcji uzyskanych eksperymentalnie danych, pracach edytorskich i korekcie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 30%.

- A10. Zajączkowski Bartosz, Halon Tomasz, Białko Bogusław, Królicki Zbigniew, Experimental Analysis of an Adsorption Chiller driven with Local District Heating Network, International Sorption Heat Pump Conference ISHPC 2017, Tokyo, Japan

Mój wkład w opracowanie tej publikacji polegał na opracowaniu przeglądu literaturowego, opracowaniu modelu matematycznego, napisaniu programu komputerowego w języku Python do rozwiązywania układu równań różniczkowych, modyfikacja modelu poprzez wprowadzenie nowatorskiego sposobu ujęcia wpływu ciśnienia na warunki we wnętrzu modułu adsorpcyjnego, porównaniu, weryfikacji i ostatecznie doborze równania równowagowego adsorpcji, weryfikacji wyników badań eksperymentalnych, redukcji i analizie danych eksperymentalnych, pracach edytorskich i korekcie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 60%.

- A11. Halon Tomasz, Zajączkowski Bartosz, Michaie Sandra, Rulliere Romuald, Bonjour Jocelyn, Enhanced tunneled surfaces for water pool boiling heat transfer under low pressure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, vol. 116, 93-103, **MNiSW: 40 punktów, IF: 3,458 (2016)** – opublikowany w wersji elektronicznej pisma IJHMT dnia 10 września 2017.

Mój wkład w opracowanie tej publikacji polegał na opracowaniu krytycznego przeglądu literaturowego w kontekście wrzenia w obniżonym ciśnieniu, doborze, przygotowaniu i analizie próbek powierzchni rozwiniętych, opracowaniu planu eksperymentu, weryfikacji i redukcji uzyskanych eksperymentalnie danych, pracach edytorskich i korekcie. Mój udział w tej publikacji szacuję na 30%.

- A12. Bartosz Zajączkowski, Tomasz Halon, Bogusław Białko, Zbigniew Królicki, *Stanowisko badawcze – prototypowy system adsorpcyjny zasilany z sieci ciepłowniczej i sieci kolektorów słonecznych* (projekt badawczy realizowany we współpracy z Firmą Fortum Power and Heat w ramach umowy S/135/12)

Mój wkład w powstanie stanowiska badawczego (prototypowego systemu adsorpcyjnego) jako kierownika projektu badawczego, polegał na przeprowadzeniu obliczeń teoretycznych oraz opracowaniu na ich podstawie założeń konstrukcyjnych oraz operacyjnych instalacji

(wydajność chłodnicza, grzewcza, wydajność układu chłodzącego, przepływy cieczy grzewczych, itp.), a w następnej kolejności aktywny udział w opracowaniu projektu technicznego, dokumentacji technicznej oraz założeń włączenia prototypowego systemu adsorpcyjnego w strukturę innowacyjnego węzła cieplnego zbudowanego w siedzibie firmy Fortum we Wrocławiu. Współuczestniczyłem w decyzji wyborze dostawcy, organizacji zakupu i transportu elementów konstrukcyjnych systemu, a następnie w rozruchu i badaniach eksperymentalnych. Opracowałem plan eksperymentu oraz nadzorowałem analizę danych eksperymentalnych, w tym ich porównanie z wynikami przeprowadzonych przeze mnie symulacji numerycznych. Mój udział w procesie budowy i eksploatacji stanowiska badawczego szacuję na 60%.

Łączna ilość punktów MNiSW dla cyklu publikacji: **193**

Sumaryczny Impact Factor dla cyklu publikacji: **13,488**

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Wprowadzenie

Globalny rynek systemów ogrzewania, chłodnictwa i klimatyzacji (ang. HVAC) stanowi obok sektora energetycznego jedną z ważniejszych i dynamicznie rozwijających się gałęzi gospodarki, w szczególności w obliczu rosnącej liczby niestabilności klimatycznych oraz średniej globalnej temperatury. W 2015 roku wyceniano wielkość tego rynku na 116 miliardów USD, a wstępne oszacowania prognozują jego wzrost do 173 miliardów USD w roku 2022¹. Jak wykazano w raporcie “Energy Consumption and Energy Efficiency Trends in the EU-28 2000-2014”² ten trend wyraźnie rysuje się również w krajach Unii Europejskiej. Stosunkowo konserwatywne estymacje przewidują, że do roku 2025 wielkość samego tylko europejskiego rynku systemów grzewczych, chłodniczych i klimatyzacyjnych wzrośnie o 55-60% względem bazowego poziomu roku 2010³ i to bez brania pod uwagę dynamiki innych powiązanych obszarów gospodarki, np. sektora żywności, który zanotował znaczące wydłużenie okresów przechowywania i transportu⁴.

W kolejnych dekadach przewiduje się intensywny wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną. Szacuje się, że w krajach zrzeszonych w IEA (tu również Polska) sektor mieszkaniowy (prywatny, publiczny i komercyjny) pochłania 32% produkowanej energii (zasilanie urządzeń, ogrzewanie, chłodzenie oraz ciepła woda użytkowa)⁵. Tylko w Europie w roku 2020 wskaźnik zużycia energii elektrycznej ma sięgnąć 74 TWh⁶. Tymczasem kluczowym rozwiązaniem technologicznym, na którym opiera się produkcja chłodu są układy sprężarkowe zasilane energią elektryczną, najczęściej z sieci energetycznej. Pomimo rozwoju technologicznego oraz szeroko zakrojonych działań legislacyjnych i standaryzacyjnych, w chwili obecnej produkcja ciepła i chłodu wciąż opiera się przede wszystkim na spalaniu paliw kopalnych (w UE jedynie około 18% energii elektrycznej pochodzi ze źródeł odnawialnych⁷).

¹ (Markets and Markets Report (2016) HVAC Systems Market by Equipment Type (Heating (Heat Pump, Furnace), Ventilation (Air Filter, Dehumidifier, Air Purifier), Cooling (Room AC, Unitary AC, Chiller)), Software & Services, Implementation Type, Application, and Geography - Global Forecast to 2022

² Bertoldi P. et al. (2012) Energy efficiency status report 2012, JRC Science for Policy Report, EUR 25405 EN

³ Hitchin R., Pout C., Riviere P. (2013), Assessing the market for air conditioning systems in European buildings, Energy and Buildings 58, Pages 355-362

⁴ Tassou, S. a., Lewis, J. S., Ge, Y. T., Hadawey, a., & Chaer, I. (2010). A review of emerging technologies for food refrigeration applications. Applied Thermal Engineering, 30(4), 263–276

⁵ Al Moussawi, H., Fardoun, F., & Louahlia-Gualous, H. (2016). Review of tri-generation technologies: Design evaluation, optimization, decision-making, and selection approach. Energy Conversion and Management, 120, 157–196

⁶ VDMA (2011) Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland; VDMA Allgemeine Lufttechnik: Frankfurt/Main, Germany

⁷ European Commission COM (2016), An EU Strategy on Heating and Cooling

Poważnym problemem ekologicznym jest też oparcie sektora HVAC na zasilanych elektrycznie systemach sprężarkowych, ponieważ oznacza konieczność stosowania syntetycznych czynników roboczych. Ich obecność wiąże się z konsekwencjami dla środowiska naturalnego. Pomimo tego, że Protokół Montrealski wraz z poprawkami doprowadził do znacznego zredukowania użycia i produkcji czynników chłodniczych o działaniu szkodliwym dla warstwy ozonowej (tj. o wskaźniku potencjału niszczenia ozonu ODP większym od zera), większość substancji stosowanych obecnie charakteryzuje się dużymi wartościami potencjału efektu cieplarnianego (GWP). Ich wpływ na efekt cieplarniany często tysiąckrotnie przekracza ten wywierany przez dwutlenek węgla⁸. W związku z powyższym, jeśli kiedykolwiek w przyszłości mamy rzeczowo rozważyć radykalne ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, priorytetem powinien stać się rozwój oraz upowszechnianie energooszczędnych i ekologicznych technologii obniżania temperatury. Powinny to być technologie, których podstawowym źródłem zasilania nie będzie kosztowna energia elektryczna, ale takie, które wykorzystują źródła ciepła, a w szczególności niskotemperaturowe źródła ciepła odpadowego⁹.

Wśród kontestowanych obecnie rozwiązań, największy przetóm zdają się obiecywać **adsorpcyjne technologie grzewcze, chłodnicze i klimatyzacyjne**⁹. Do ich zasilania wykorzystuje się ciepło, a w szczególności niskotemperaturowe (60-70°C) ciepło odpadowe lub sieciowe. Dodatkowo bazują na czynnikach roboczych neutralnych dla środowiska, których współczynniki GWP i ODE są zerowe (np. na wodzie, węglowodorach, itp.)^{9,10}. Dynamiczny wzrost zapotrzebowania na moc chłodniczą w połączeniu z wyśrubowanymi wytycznymi w zakresie efektywności energetycznej oraz zużycia energii tworzy ogromne zapotrzebowanie na jak najszybsze wdrożenie adsorpcyjnych technologii chłodniczych.

Technologie adsorpcyjne znajdują się obecnie we wczesnym stadium komercjalizacji. Na rynku pojawiają się sprawdzone systemy pilotażowe lub instalacje małych mocy, których parametry operacyjne wciąż pozostają niższe od systemów opartych na technologiach sprężarkowych. Istnieje wciąż szereg problemów, które muszą zostać skutecznie rozwiązane przed ostatecznym zaakceptowaniem i upowszechnieniem się tej technologii. Na niektóre z tych problemów skierowałem moje zainteresowania naukowe, a wyniki przeprowadzonych przeze mnie analiz, badań i modelowania oraz konkretne propozycje rozwiązań technicznych są przedmiotem osiągnięcia naukowego, które przedstawiam w niniejszym wniosku.

Podstawowy obszar moich zainteresowań naukowych, a jednocześnie cel naukowy zaprezentowany w niniejszym wniosku stanowią **teoretyczne oraz eksperymentalne badania dynamiki pracy adsorpcyjnych systemów chłodniczych**, włączając w to badanie zjawisk fizycznych leżących u podstaw ich działania. W osiągnięciu habilitacyjnym przedstawiony w formie cyklu 10 prac publikowanych, patentu oraz stanowiska badawczego, dokonałem analizy i syntezy wybranych zagadnień szczegółowych dotyczących adsorpcyjnych technologii chłodniczych.

Zająłem się następującymi obszarami badawczymi:

1. Intensyfikacja parametrów przewodzenia ciepła i masy w złożu adsorbentu za pomocą autorskiego i opatentowanego kompozytu sorpcyjnego.
2. Termodynamika oraz numeryczna analiza dynamiki pracy systemów adsorpcyjnych, a w szczególności wykorzystanie układów równań różniczkowych do opisu pracy elementów składowych (złóż adsorpcyjnych oraz wymienników ciepła) oraz ich jednoczesne rozwiązanie za pomocą autorskiego programu komputerowego. Optymalizacja wydajności i efektywności

⁸ Calm J.M. (2002) Emissions and environmental impacts from air-conditioning and refrigeration systems, Int. J. Ref. 25, 293–305

⁹ Deng, J., Wang, R. R. Z., & Han, G. Y. G. (2011). A review of thermally activated cooling technologies for combined cooling, heating and power systems. Progress in Energy and Combustion Science, 37(2), 172–203

¹⁰ Shmroukh A.N. et al. (2015) Adsorption working pairs for adsorption cooling chillers: A review based on adsorption capacity and environmental impact. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50, 445–456

pracy urządzeń adsorpcyjnych poprzez implementację zaawansowanych trybów pracy - rekuperacji ciepła oraz odzysku masy prowadzących do wzrostu wydajności oraz efektywności. Wprowadzenie asymetrii alokacji cyklu pracy, tj. modyfikacja długości czasu trwania faz składających się na cykl pracy urządzenia adsorpcyjnego.

3. Intensyfikacja niskociśnieniowego procesu wrzenia czynnika chłodniczego poprzez zastosowanie powierzchni rozwiniętych w parowniku adsorpcyjnego systemu chłodniczego; realizacja przemian fazowych w wymiennikach stanowiących część systemu sorpcyjnego; możliwości intensyfikacji procesów wrzenia w parowniku niskociśnieniowym.
4. Badania eksperymentalne systemu sorpcyjnego zasilanego z sieci ciepłowniczej.

Na podstawie przeprowadzonych analiz teoretycznych, rozwiązań problemów technicznych i eksploatacyjnych uważam, że powyższe zagadnienia stanowią istotne obszary poznawcze, których badanie jest kluczowe do awansu stanu wiedzy w tematyce chłodnictwa adsorpcyjnego. Wpisują się one w światowe tendencje prac prowadzonych nad tym zagadnieniem. Zaprezentowane przeze mnie rezultaty mogą stanowić uzupełnienie prowadzonych prac badawczych w wiodących placówkach naukowych, a w tematyce optymalizacji procesów przemiany fazowej w warunkach niskiego ciśnienia eksplorują zupełnie nowe koncepcje badawcze.

Ad. 1 Przewodzenie ciepła i masy w złożu adsorbentu - kompozyt sorpcyjny

Jedno z istotnych zagadnień związanych z dynamiką pracy systemów adsorpcyjnych jest problematyka przenoszenia ciepła i masy w złożu adsorbentu. Problem ten jest szczególnie zauważalny układach opartych o zjawisko adsorpcji chemicznej, w których czynnik roboczy wchodzi w reakcję chemiczną z adsorbentem.

Niezależnie od małych wartości współczynników wnikania ciepła na styku fazy gazowej i stałej, w przypadku adsorpcji chemicznej należy się dodatkowo zwrócić z problemem zmiany struktury krystalicznej adsorbentu. Usieciowane kryształy w swojej początkowej konfiguracji posiadają „wakaty”, tworzące strukturę porowatą w której mogą lokować się molekuly czynnika roboczego. Zachodząca reakcja chemiczna, wiążąc molekuly czynnika roboczego, istotnie zmienia kształt sieci krystalicznej. Zjawisko to w literaturze określa się potocznie „puchnięciem”, ponieważ nasycenie adsorpcyjnym zmieniając strukturę sieci powiększa objętość zajmowaną przez kryształy adsorbentu¹¹. Dodatkowo regeneracja takiego złoża nigdy nie jest zupełna i wskutek przeprowadzenia procesu desorpcji większość luk w sieci krystalicznej przestaje istnieć, przez co zdolność adsorpcyjna złoża po regeneracji zostaje znacznie zredukowana. Powierzchnia aktywna adsorbentu oraz porowatość, dzięki której bez przeszkód mogła przebiegać dyfuzja gazowego czynnika w złożu, maleje o kilkanaście, nawet do kilkudziesięciu procent¹¹.

Transport ciepła i masy w złożu adsorbentu stanowił jeden z pierwszych problemów badawczych, którymi postanowiłem się zająć. W kontekście przedstawionych powyżej ograniczeń w transporcie ciepła i masy, podjąłem się opracowania takiej koncepcji złoża adsorpcyjnego, które zapewniało by wysokie parametry przewodzenia ciepła, a jednocześnie, jeśli to konieczne, uniemożliwiałyby degenerację adsorbentu. Udało mi się osiągnąć ten cel za pomocą autorskiego kompozytu sorpcyjnego, stanowiącego połączenie adsorbentu, grafitu ekspandowanego oraz włókien węglowych.

W artykule *New type of sorption composite for chemical heat pump and refrigeration* [A1] przedstawiłem rezultaty analizy wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla autorskiego kompozytu sorpcyjnego, przygotowanego specjalnie pod kątem intensyfikacji parametrów przewodzenia ciepła i masy w złożu. Opisana w pracy analiza współczynnika przewodności cieplnej

¹¹ Wang, S.G., Wang, R.Z., Li, X.R., Research and development of consolidated adsorbent for adsorption systems. *Renewable Energy*, 2005, 30(9), 1425-1441

kompozytu została wykonana w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych Polskiej Akademii Nauk. Pomiar wykonano metodą stacjonarnego osiowego przepływu ciepła w zakresie temperatury od -10°C do 54°C (263 – 328K). Próbkę, będącą paskami o długości 30 mm, szerokości 10 mm oraz grubości 10 mm, które zostały wycięte wzdłuż promienia z pojedynczego kompozytu o przekroju kołowym, a następnie umiejscowione na miedzianym panelu, zainstalowanym na punkcie grzewczym w kriostacie pomiarowym. Rezultaty badań wykazały, że współczynnik przewodzenia ciepła opracowanego kompozytu przewyższa znane i opisane w literaturze rozwiązania. Implementacja włókien węglowych spowodowała wzrost mierzalnych współczynników przewodzenia ciepła od około 10 W/mK (dla najlepszych stosowanych wcześniej kompozytów na bazie grafitu ekspandowanego) do 13,5-14,5 W/mK (35-45%). Publikacja doczekała się cytowania w opublikowanym w 2011 roku artykule przeglądowym poświęconym rozwojowi technologii adsorpcyjnych⁹.

W pracy *Theoretical and experimental analysis NH₃-CaCl₂ sorption heat pump filled with graphite-carbon fiber composite* [A2] przeanalizowałem eksperymentalnie pracę układu sorpcyjnego wykorzystującego opracowany przeze mnie kompozyt sorpcyjny. Posługując się analizą statystyczną opartą o Metodę Taguchi'ego zidentyfikowałem wydajności i efektywności dla zakresu parametrów kontrolnych oraz oszacowałem ich wrażliwość na termodynamiczne parametry pracy układu (tutaj, ciśnienie początkowe oraz temperaturę desorpcji).

W 2013 roku otrzymałem patent o numerze 213582 zatytułowany „*Wielofunkcyjny formowany nośnik czynnika aktywnego i sposób wytwarzania wielofunkcyjnego formowanego nośnika czynnika aktywnego*” [A3]. Chronione rozwiązanie dotyczy składu kompozytu sorpcyjnego oraz metody jego wytwarzania, który składa się z materiałów przewodzących ciepło i zapewniających porowatość struktury (grafit, włókna węglowe) oraz adsorbentu (wymieszanego z lub impregnowanego na powierzchni materiałów przewodzących). Trzy grupy substancji tworzących strukturę kompozytu sorpcyjnego charakteryzują się odmiennymi własnościami cieplnymi i mechanicznymi. Opracowanie kompozytu o wymaganych własnościach wymagało zakresu analiz jego składu (proporcje grafitu ekspandowanego i włókien węglowych) przy jednoczesnej kontroli parametrów procesu jego produkcji (przede wszystkim siły nacisku prasy hydraulicznej). Niezbędne było również przebadanie proporcji materiałów węglowych do adsorbentu. Pożądane własności kompozyt uzyskał przy proporcji 0,25-0,5, przy stosunku masowym włókien węglowych do grafitu ekspandowanego 0,25-1,0 oraz przy sile nacisku prasy formującej 500-900 kN. Większa siła prowadziła do zniszczenia struktury włókien węglowych, a tym samym utraty ich własności cieplnych i mechanicznych.

Ad.2 Termodynamika oraz numeryczna analiza dynamiki pracy systemów adsorpcyjnych.

W pracy *Modelowanie współczynnika efektywności ziębniczej w adsorpcyjnym systemie trigeneracyjnym* [A4] zaprezentowałem model termodynamiczny oraz wyniki kompleksowej analizy wydajności i efektywności dwuzłożowego systemu adsorpcyjnego wykorzystującego parę roboczą silikażel-woda, opartej na w/w modelu. Przeprowadzone symulacje, w których wynikowe wartości uzależnione były przede wszystkim od temperatur źródeł ciepła oraz parametrów fizykochemicznych zastosowanej pary roboczej wskazały na istotne ograniczenia. Dla pewnych zakresów wartości warunków brzegowych (zbyt niska temperatura źródła ciepła, zbyt wysoka temperatura wody chłodzącej, itp.) rzeczywista zdolność adsorpcyjna adsorbentu maleje do zera i urządzenie przestaje realizować swoje zadanie.

Wykorzystując te same równania bazowe, wprowadziłem do modelu współczynnik regeneracji cieplnej η , który umożliwił oszacowanie potencjału przyrostu wydajności i efektywności pracy po zaimplementowaniu rekuperacji. Posługując się autorskim skryptem obliczeniowym, obliczyłem teoretyczne maksymalne wartości parametrów pracy systemu, a następnie zbadałem jego czułość na proces odzysku ciepła wykazując, że w optymalnym przypadku można osiągnąć nawet kilkunastoprocentowy wzrost efektywności systemu. Tym samym przeprowadzona analiza potwierdziła ograniczenia wynikające z zastosowania rekuperacji ciepła, prowadząc do wniosku, że w

celu znaczącego zwiększenia wydajności systemu konieczne jest zastosowanie odzysku masy. Zachęciło mnie to do bliższego zbadania problemu rekuperacji ciepła i masy w urządzeniach adsorpcyjnych. W tym celu zająłem się zagadnieniem optymalizacji wydajności i efektywności pracy urządzeń adsorpcyjnych poprzez implementację zaawansowanych trybów pracy.

W podstawowym systemie adsorpcyjnym cykl pracy składa się z czterech następujących po sobie faz: izosteryczne ogrzewanie oraz desorpcja (podczas których adsorber jest ogrzewany źródłem niskotemperaturowym), a następnie izosteryczne chłodzenie oraz adsorpcja (podczas których adsorber jest chłodzony wodą z wieży chłodniczej). Tak skonstruowany cykl pracy umożliwia prowadzenie produkcji chłodu w trybie ciągłym, a ze względu na swoją prostotę przez wiele lat był wykorzystywany do realizacji obiegu chłodniczego. Glaznev i Aristov¹² wykazali, że na poziomie molekularnym proces desorpcji przebiega ok. 2-3 razy szybciej niż proces adsorpcji. Zwrócili uwagę, że można, a wręcz należy ten fakt wykorzystać w optymalizacji tzw. alokacji cyklu pracy, tj. doboru czasu trwania poszczególnych faz cyklu pracy w taki sposób, aby zmaksymalizować wydajność i efektywność systemu. Pozwoliło to wysunąć tezę, że dla danej pary substancji optymalizacja alokacji cyklu pracy układu sorpcyjnego ma fundamentalne znaczenie dla wydajności chłodniczej oraz efektywności systemu adsorpcyjnego. Demonstracją potencjału możliwości jakie daje optymalizacja alokacji czasu cyklu pracy była koncepcja cyklu pracy zaproponowana dla układów dwu-adsorberowych przez Miyazakiego i in.¹³, w której czas trwania fazy adsorpcji odpowiadał sumie czasów trwania procesu desorpcji i obu przejściowych faz izosterycznych. Rozwijając ten pomysł El-Sharkawy i in.¹⁴ przeprowadzili analizę dla układu dwu-adsorberowego wykazując, że w cyklu pracy optymalny stosunek długości fazy desorpcji do długości fazy adsorpcji wynosi $f = 0,85$. W momencie podjęcia tego problemu przeze mnie, nikt wcześniej nie przeprowadził tego typu analizy dla układów trój-adsorberowych. W artykule *Performance analysis and cycle time optimization of a single evaporator three-bed solid-sorption refrigeration system driven by low-temperature heat source* [A5] zaprezentowałem układ równań różniczkowych składających się na model matematyczny wraz z metodą przeprowadzenia optymalizacji długości faz adsorpcji i desorpcji dla układów trój-adsorberowych.

Wykorzystując model matematyczny będący układem bilansowych równań różniczkowych wszystkich elementów systemu oraz autorski kod źródłowy (napisany w języku programowania Python) zaprogramowałem symulację działania dwuzłożowego oraz trójzłożowego systemu adsorpcyjnego. Przeprowadziłem wieloparametryczną optymalizację cyklu pracy systemu trójzłożowego, która wykazała, że optymalne warunki pracy osiąga się w tym przypadku dla $f = 0,6$ co przekłada się na 6% wzrost wydajności chłodniczej. Osiągnięcie maksimum jest możliwe przy znaczącym wydłużeniu czasu trwania fazy adsorpcji (nawet o 40 s). Informacja o konieczności wydłużenia czasu fazy adsorpcji ma istotne znaczenie w programowaniu automatyki systemów adsorpcyjnych, pracujących w układach trigeneracyjnych zasilanych z sieci ciepłowniczej, gdzie temperatury zasilania są rzędu 60-65°C. Oprócz tego wykazałem, że bez względu na zmiany długości czasów poszczególnych faz cyklu maksymalne wartości parametrów wyjściowych osiąga się zawsze przy zachowaniu pełnej symetrii współpracujących źródeł, a kilkunastosekundowe odchylenia nie wywierają istotnego wpływu na efektywność pracy systemu. Co więcej, powyższe relacje pozostają prawdziwe bez względu na temperaturę źródła ciepła oraz wody chłodzącej.

¹² Glaznev, I. S., & Aristov, Y. I. (2010). The effect of cycle boundary conditions and adsorbent grain size on the water sorption dynamics in adsorption chillers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(9–10), 1893–1898. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.12.069>

¹³ Miyazaki, T., Akisawa, A., Saha, B. B., El-Sharkawy, I. I., & Chakraborty, A. (2009). A new cycle time allocation for enhancing the performance of two-bed adsorption chillers. *International Journal of Refrigeration*, 32(5), 846–853. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.12.002>

¹⁴ El-Sharkawy, I. I., AbdelMeguid, H., & Saha, B. B. (2013). Towards an optimal performance of adsorption chillers: Reallocation of adsorption/desorption cycle times. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 63, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.076>

Optymalizując cykl pracy w sposób przedstawiony w pracy [A5] zajmowałem się wyłącznie działaniem podstawowego systemu sorpcyjnego, pomijając tzw. zaawansowane tryby pracy tj. odzysk ciepła i masy. Pojawiające się w literaturze opracowania, wskazywały jednoznacznie, że tylko z ich pomocą możliwe jest znaczące zwiększenie wydajności i efektywności działania systemów adsorpcyjnych¹⁵. Krytyczny przegląd, a przede wszystkim analiza dorobku badaczy oraz kontakt z najważniejszymi ośrodkami zajmującymi się układami wielozłożowymi (z Kyushu University w Japonii, National University of Singapore, z Singapuru oraz Shanghai Jiao Tong University z Chin) wykazał, że nikt przede mną nie podjął się problemu poprawy działania układów trójzłożowych poprzez implementację pasywnej rekuperacji ciepła oraz rekuperacji masy pomiędzy złożami, w szczególności w systemach trójzłożowych, które są przedmiotem mojego opracowania. W pracy *Optimizing performance of a three-bed adsorption chiller using new cycle time allocation and mass recovery* [A7] zaprezentowałem nowatorskie rozwiązanie alokacji czasu cyklu pracy systemu adsorpcyjnego, które umożliwia wprowadzenie odzysk masy przy jednoczesnym tzw. pasywnym odzysku ciepła.

W literaturze dostępne były propozycje implementacji odzysku masy w urządzeniach trójzłożowych autorstwa naukowców z Kyushu University^{16,17}. Były to jednak w rzeczywistości systemy dwustopniowe specyficznej konstrukcji, które zostały rozbudowane o trzeci adsorber pomocniczy, pełniący funkcję bufora.

Trójzłożowy układ adsorpcyjny, którego optymalizację omawiam w publikacji [A7] jest to system symetryczny, w którym każde złożo niezależnie w sposób bezpośredni przyczynia się do realizacji efektu chłodniczego (tj. podczas realizacji cyklu pracy, każde złożo przez pewien okres czasu jest połączone z parownikiem). Przy zastosowaniu symetrycznej alokacji cyklu pracy długość fazy adsorpcji i długość fazy desorpcji są sobie równe. Taki system został teoretycznie i eksperymentalnie szczegółowo przeanalizowany przez Saha i in.¹⁸ Jednak pomimo zwiększonej wydajności wynikającej z obecności trzeciego adsorbera, rozwiązanie nie było satysfakcjonujące, ponieważ rozwijające się równolegle systemy dwuzłożowe już wtedy oferowały możliwość zastosowania zaawansowanych trybów pracy takich (odzysk masy i ciepła), które dawały bardziej wymierne korzyści zarówno wydajnościowe jak i efektywnościowe¹⁹.

Zaproponowane przez mnie i opisane w pracy [A7] rozwiązanie wykorzystuje regenerację masy i pasywną rekuperację ciepła do poprawy parametrów pracy systemu. Do tego celu niezbędna jest jednak synchronizacja pracy poszczególnych złożów w taki sposób, aby przynajmniej dwa adsorbery w danym momencie znalazły się w dwóch odmiennych fazach izosterycznych (np. adsorber pierwszy w fazie izosterycznego ogrzewania, natomiast drugi w fazie izosterycznego chłodzenia). Można wtedy dokonać ich sprzężenia i przeprowadzić skuteczny proces rekuperacji. W przypadku trzech złożów, skomplikowany układ połączeń oraz algorytm pracy spowodował, że problem ten nie miał skutecznego rozwiązania.

Do przeprowadzenia optymalizacji alokacji cyklu pracy zaadoptowałem opracowany wcześniej i przedstawiony w pracy [A5] model matematyczny oparty na układzie równań różniczkowych opisujących zmienność parametrów cieplnych i przepływowych we wszystkich elementach systemu adsorpcyjnego. Opracowane przeze mnie rozwiązanie polega na przesunięciu osi symetrii cyklu pracy

¹⁵ Demir, H., Mobedi, M., & Ulku, S. (2008). A review on adsorption heat pump: Problems and solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2381–2403

¹⁶ Khan, M. Z. I., Saha, B. B., Alam, K. C. A., Akisawa, A., & Kashiwagi, T. (2007). Study on solar/waste heat driven multi-bed adsorption chiller with mass recovery. *Renewable Energy*, 32(3), 365–381

¹⁷ Uyun, A. S., Akisawa, A., Miyazaki, T., Ueda, Y., & Kashiwagi, T. (2009). Numerical analysis of an advanced three-bed mass recovery adsorption refrigeration cycle. *Applied Thermal Engineering*, 29 (14–15), 2876–2884

¹⁸ Saha, B. B., Koyama, S., Lee, J. B., Kuwahara, K., Alam, K. C. A., Hamamoto, Y., Kashiwagi, T. (2003). Performance evaluation of a low-temperature waste heat driven multi-bed adsorption chiller. *International Journal of Multiphase Flow*, 29(8), 1249–1263

¹⁹ Wang, R. Z. (2001). Performance improvement of adsorption cooling by heat and mass recovery operation. *International Journal of Refrigeration*, 24(7), 602–611

w taki sposób, aby fazy izosteryczne pracujących po sobie adsorberów następowały w tym samym przedziale czasu. Wykazałem, że zaproponowana przeze mnie modyfikacja istotnie poprawia wydajność chłodniczą systemu, w szczególności w najniższych stosowanych temperaturach zasilania ~65°C, gdzie w niektórych konfiguracjach temperatur wskaźnik poprawy sięgnął 30%.

Uniwersalny charakter rozwijanego przeze mnie modelu numerycznego, który wykorzystałem do przeprowadzenia analiz w pracach [A5] oraz [A7], umożliwił mi dopasowanie go do symulacji działania zintegrowanego systemu adsorpcyjnego, stanowiącego część stanowiska badawczego [A12]. Zintegrowany system adsorpcyjny to tak, w którym parownik i skraplacz są zamknięte razem w jednej obudowie (tworzą tak zwany moduł). Wstępne analizy wykazały, że zastosowanie znanych modeli matematycznych do opisu działania takiego modułu prowadzi do znaczących błędów. Propozycje rozwiązania tego problemu przedstawiłem w pracy *Experimental Analysis of an Adsorption Chiller driven with Local District Heating Network*. Zmodyfikowałem sposób obliczania ciśnienia podczas pracy modułu sorpcyjnego, powiązując jego wartość teoretyczną z parametrami konstrukcyjnymi oraz z pojemnością cieplną komponentów metalowych. Tak zmodyfikowany model zweryfikowałem z wynikami prac eksperymentalnych przeprowadzonych na stanowisku [A12] uzyskując istotną zgodność.

Ad. 3 Intensyfikacja niskociśnieniowego procesu wrzenia czynnika chłodniczego poprzez zastosowanie powierzchni rozwiniętych w parowniku adsorpcyjnego systemu chłodniczego.

Po zakończeniu prac związanych z procesami ciepła i masy zachodzącymi w złożu adsorbentu (omówionych w pracach [A1-A3]), zająłem się badaniem zjawisk zachodzących w innych komponentach systemu adsorpcyjnego. Za najbardziej interesujący problemem badawczy uznałem przebieg i intensyfikację procesów przemiany fazowej zachodzącej w parowniku. Ponieważ zaprojektowanie wysoce wydajnego i zwartego parownika odgrywa istotną rolę w zmniejszaniu masy i wielkości adsorpcyjnych agregatów chłodniczych. Szczególnie, że dużą pojemność cieplną komponentów uważa się za jeden z kluczowych czynników ograniczających wydajność urządzenia.

W swoich badaniach skupiłem się więc na zagadnieniu intensyfikacji wrzenia czynników chłodniczych w obniżonym ciśnieniu panującym w takich parownikach, co w założeniach powinno doprowadzić do zmniejszenia niezbędnej powierzchni wymiany ciepła, a tym samym gabarytów i masy urządzeń. Pod ciśnieniem 0,5-2 kPa panującym w rozpatrywanym układzie współczynniki wymiany ciepła są istotnie niższe niż pod ciśnieniem atmosferycznym, przez co konieczne jest stosowanie większych przegrzań. To wszystko wywiera wpływ na konstrukcję stosowanych w systemach adsorpcyjnych parowników.

Pomimo dostępności szeregu prac eksperymentalnych oraz teoretycznych, mechanizm procesu wrzenia wciąż opisany został jedynie w wąskim zakresie ciśnień i własności substancji²⁰²¹. Zakres stosowania korelacji opisujących wartości współczynnika wnikania ciepła nie obejmuje ciśnień używanych w chłodnictwie adsorpcyjnym^{22,23}. W konsekwencji parowniki zaprojektowane pierwotnie do pracy w ciśnieniu atmosferycznym i wyższym są zdecydowanie niedomiarowane, a ich szczegółowe cechy konstrukcyjne (np. wysokość cieczy, podziałka rur, itp.) mogą wręcz uniemożliwiać formowanie pęcherzy i skutecznie ograniczyć proces wymiany ciepła. Stworzyło to potrzebę opracowania wytycznych umożliwiających projektowanie zoptymalizowanych urządzeń.

²⁰ K.C. Leong, J.Y. Ho, K.K. Wong, A critical review of pool and flow boiling heat transfer of dielectric fluids on enhanced surfaces, In *Applied Thermal Engineering*, Volume 112, 2017, 999-1019

²¹ Chirag R. Kharangate, Issam Mudawar, Review of computational studies on boiling and condensation, In *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 108, Part A, 2017, 1164-1196

²² Giraud, F., Rulliere, R., Toublanc, C., Clausse, M., & Bonjour, J. (2015). Preliminary experimental investigation on water boiling phenomena in a liquid layer at subatmospheric pressure. In 24th International Congress of Refrigeration. Yokohama, Japan.

²³ Paz, M. C., Conde, M., Suárez, E., & Concheiro, M. (2015). On the effect of surface roughness and material on the subcooled flow boiling of water: Experimental study and global correlation. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 64, 114–124.

W artykule *Experimental verification of heat transfer coefficient for nucleate boiling at sub-atmospheric pressure and small heat fluxes* [A8] przedstawiłem kompleksowy krytyczny przegląd literaturowy w tematyce przebiegu procesów wrzenia w obniżonym ciśnieniu, a także zestawienie znanych empirycznych korelacji umożliwiających obliczenie współczynników wymiany ciepła podczas wrzenia wody.

Dostępne w źródłach literaturowych równania opisujące współczynnik wymiany ciepła podczas wrzenia czynników chłodniczych najczęściej odnoszą się do ciśnienia krytycznego (zwykle pośrednio, w formie stosunku ciśnienia nasycenia do ciśnienia krytycznego). Tymczasem przemiany fazowe wody w warunkach niskiego ciśnienia zachodzą w bezpośredniej bliskości punktu potrójnego, co istotnie wpływa na ich przebieg. W w/w artykule dokonałem więc również sprawdzenia dokładności z jaką w/w korelacje opisują zjawiska w obniżonym ciśnieniu, wskazując duże uchybienia równań bazujących na stosunku p/p_{crit} . Adekwatną analizę przeprowadziłem dla drugiego pod względem popularności naturalnego czynnika chłodniczego stosowanego w systemach adsorpcyjnych, tj. metanolu²⁴ (w parze z węglem aktywnym), a wyniki przedstawiłem w pracy *Calculation and experimental verification of heat transfer coefficient for low pressure methanol evaporator* [A6]. Woda i metanol stanowią dwa najpopularniejsze czynniki chłodnicze stosowane w systemach adsorpcyjnych (woda w parze z silikażelem oraz zeolitami, a metanol z węglem aktywnym)^{25,26}.

Badania zostały przeprowadzone na autorskim stanowisku eksperymentalnym [B2a]. Przeprowadziłem serię badań eksperymentalnych procesu wrzenia na powierzchni płaskiej wody w zakresie 1-10 kPa i metanolu w zakresie 0,8-18 kPa, przy zakresie gęstości strumienia ciepła 10-45 kW/m² oraz napełnieniu 32 mm.

Badanie umożliwiło zaobserwowanie cech charakterystycznych zjawiska oraz ilościowo określić stopień przesunięcia krzywej wrzenia w kierunku większych wartości przegrzania. Wyniki badań eksperymentalnych porównałem z obliczeniami przeprowadzonymi na podstawie dostępnych w literaturze korelacji dla współczynników wnikania ciepła procesów wrzenia wody i metanolu w ciśnieniu atmosferycznym. Większość znanych korelacji nie była wiarygodnie zgodna z parametrami wymiany ciepła w warunkach niskiego ciśnienia pomimo tego, że równania opierały się na własnościach termo-fizycznych czynników chłodniczych (np. ciśnieniu krytycznym, ciepłe przemiany fazowej, gęstości w fazie ciekłej i gazowej, napięciu powierzchniowym, itp). W przypadku wody dwie z przeanalizowanych korelacji z dość dużą dokładnością opisały wartości współczynnika wnikania ciepła: Mostińskiego (odchylenie standardowe 0.13–0.35) oraz Labuntsova (odchylenie standardowe 0.12–0.89). W przypadku metanolu, żadne znane z literatury równanie nie było zgodne z wynikami przeprowadzanych eksperymentów. Zaproponowałem więc własne stałe empiryczne do korelacji opracowanej na bazie analizy wymiarowej, które dały zgodność z eksperymentem na poziomie odchylenia standardowego 0.06.

Z tego względu rozpocząłem poszukiwania rozwiązań opartych o powierzchnie rozwinięte, w szczególności takie, których struktura tworzy tzw. sztuczne miejsca nukleacji zwiększające ilość pęcherzy i częstotliwość nukleacji. Celem naukowym była maksymalizacja współczynnika wnikania ciepła przy wrzeniu, zachowując jak najniższą temperaturę ścianki parowacza, co potencjalnie pozwoliłoby na zastosowanie powierzchni rozwiniętych w parownikach systemów adsorpcyjnych.

²⁴ Ahmed A. Askalany, M. Salem, I.M. Ismail, Ahmed Hamza H. Ali, M.G. Morsy, A review on adsorption cooling systems with adsorbent carbon, In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, Issue 1, 2012, 493-500

²⁵ Wang, L. W., Wang, R., & Oliveira, R. G. (2009). A review on adsorption working pairs for refrigeration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(3), 518–534

²⁶ Hassan, H. Z., Mohamad, a. a., Alyousef, Y., & Al-Ansary, H. a. (2015). A review on the equations of state for the working pairs used in adsorption cooling systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 600–609

Szczegółową analizę zjawisk zachodzących podczas wrzenia na powierzchniach rozwiniętych przedstawiłem w pracy *Experimental study of low pressure pool boiling of water from narrow tunnel surfaces* [A9]. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w Laboratorium Centrum Badań Termicznych i Energetycznych (Centre d’Énergétique et de Thermique de Lyon - CETHIL) przy Narodowym Instytucie Badań Stosowanych w Lyonie (Institut national des sciences appliquées de Lyon - INSA). Było to możliwe dzięki nawiązaniu przeze mnie w 2015 roku współpracy naukowej z Prof. Jocelyn Bonjournem, dyrektorem INSA-CETHIL. Powierzchnie rozwinięte będące przedmiotem analizy opracował i opatentował dr hab. inż. Robert Pastuszko z Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej, lecz zakres jego badań wrzenia wody ograniczał się do ciśnień bliskich atmosferycznemu. Specyficzna tunelowa konstrukcja tych powierzchni wraz z otworami pełniącymi rolę zarodków nukleacji wydawała się idealnym rozwiązaniem problemów ograniczających efektywność procesu wrzenia pod ciśnieniem 1 kPa.

W w/w pracy skupiłem się na obserwacji przebiegu procesu wrzenia. Struktury zostały zanurzone pod 5, 28,7 i 86 mm wody destylowanej. Zakres analizowanych ciśnień nasycenia w układzie wynosił 0,75-4 kPa (odpowiadający temperaturze w zakresie 2,8-28,9°C), przy zadanym strumieniu ciepła 0,25-3 W/cm². Szczegółnej analizie poddałem proces tworzenia i odrywania pęcherzy, średnicę odchylenia pęcherzy i częstotliwości zostały przeanalizowane dla trzech różnych struktur tunelowych typu NTS (Narrow Tunnel Structure). Obserwacje wizualne przeprowadzone za pomocą kamery o wysokiej częstotliwości rejestracji, uzupełnione zostały pomiarami temperatur i ciśnień, które następnie umożliwiły określenie strumienia ciepła, przegrzania oraz wartości współczynników przenikania ciepła.

Po przeanalizowaniu przebiegu procesu wrzenia na powierzchniach rozwiniętych, skupiłem się na wpływie konstrukcji tych powierzchni. Szczegółową analizę przedstawiłem w artykule *Enhanced tunneled surfaces for water pool boiling heat transfer under low pressure* [A11]. Badaniu poddane zostało sześć geometrycznie podobnych struktur tunelowych należących do dwóch kategorii: trzy powierzchnie NTS (Narrow Tunnel Structure) oraz trzy powierzchnie TS (Tunnel Structure). Każda próbka składała się z trzech żeber głównych o wysokości 5 mm. W strukturach typu NTS żebra główne zostały sfrezowane na wskroś, co utworzyło mini żebra. W strukturach TS dodatkowo wycięte zostały mikro-rowki na bocznych powierzchniach żeber głównych i w poziomych przestrzeniach międzyżebrowych. Dwie z badanych powierzchni NTS oraz dwie z badanych powierzchni TS zostały pokryte folią miedzianą o grubości 0,1 mm z perforacjami wykonanymi metodą trawienia chemicznego o średnicy perforacji 0,2 mm.

Analiza wykazała, że zastosowanie powierzchni rozwiniętych w warunkach wrzenia takich, które spotyka się w parownikach systemów adsorpcyjnych, prowadzi do znaczonego zmniejszenia przegrzania (nawet sześciokrotnie względem powierzchni płaskiej) i równie znaczącego wzrostu współczynnika wnikania ciepła po stronie parującego czynnika (od około 500 W/m²K do około 5000 W/m²K). Najlepszą poprawę udało się zanotować dla powierzchni rozwiniętej o największej masie cieplnej ożebrowania (grube żebra) przy najwyższych kanałach (odstępny pomiędzy żebrami) oraz pokrytej folią perforowaną (tunele i miejsca nukleacji). Rezultaty wykazały też, że średnica otworów perforacji również musi być dobrana do pracy w obniżonym ciśnieniu, ponieważ wraz ze spadkiem ciśnienia rośnie krytyczna średnica nukleacji. Nie wzięcie tego pod uwagę będzie miało istotne konsekwencje dla sposobu pracy parownika. Przedstawione w pracach [A9] oraz [A11] rezultaty, obserwacje oraz wnioski stanowią istotne wytyczne przy projektowaniu parowników niskociśnieniowych bazujących na powierzchniach rozwiniętych.

Ad. 4 Badania eksperymentalne systemu sorpcyjnego zasilanego z sieci ciepłowniczej

W roku 2010 nawiązałem współpracę z firmą FORTUM Heat and Power. Pierwszym wymiernym efektem tych działań było przygotowanie i podpisanie listu intencyjnego pomiędzy Wydziałem

Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej oraz firmą FORTUM dotyczącego współpracy dydaktycznej oraz naukowej. Zaproponowana i sporządzona przeze mnie oferta naukowo- badawcza dotycząca systemu sorpcyjnego zasilanego bezpośrednio z sieci ciepłowniczej stała się podstawą do podpisania umowy o współpracy badawczej w ramach grantu badawczego „Research on solid sorption for tri-generation systems” [J2] (zostałem kierownikiem tego grantu a planowane zakończenie przewidywane jest na czerwiec 2018). Podstawowy cel naukowy projektu stanowiły modelowanie i badania innowacyjnych technologii adsorpcyjnych do wytwarzania chłodu w systemach tri-generacji, tzn. systemów opartych o zjawisko adsorpcji fizycznej bazujących na parze roboczej silikażel-woda, pracujących przy zasilaniu ze źródła o temperaturze rzędu 60-65°C (sieć ciepłownicza).

Czynnikiem, który istotnie ogranicza możliwości zastosowania systemów trójzłożowych są ich rozmiary i masa cieplna. Instalacje takie są opłacalne przy dużych wydajnościach chłodniczych >100 kW, a nawet > 1MW. Celem kierowanego przeze mnie projektu badawczego, były rozwiązania o mniejszych wydajnościach ~20kW. Bezpośrednim wskaźnikiem postępu prac prowadzonych w ramach projektu były roczne raporty naukowe (prace niepublikowane), w których zaprezentowane były analizy teoretyczne, wytyczne do projektowania, modele aplikacyjne oraz konkretne rozwiązania konstrukcyjne trójzłożowego, a następnie hybrydowego dwuzłożowego systemu adsorpcyjnego [F1, F3-F6]. Zakres problemów, które zostały poddane kompleksowej analizie to m.in. kryteria doboru par roboczych [F6], modelowanie dynamiki procesów adsorpcji [F5], przegląd istniejących rozwiązań patentowych [F6], analiza wielkości złoza i potencjału zmniejszenia gabarytów urządzeń, optymalizacja cyklu pracy systemu dwuzłożowego i trójzłożowego [F3, F4, A5, A7], opracowanie koncepcji wysokowydajnego systemu trójzłożowego [F4], odzwierciedlenie dynamiki pracy urządzenia hybrydowego wyposażonego w moduł adsorpcyjny ze zintegrowanym wymiennikiem ciepła, zasilanego z sieci ciepłowniczej [F1].

Aplikacyjnym rezultatem współpracy z firmą FORTUM, a także ze znanym niemieckim producentem adsorpcyjnych systemów chłodniczych firmy Fahrenheit A.G. (dawniej Sortech A.G.), jest opracowana i oddana do użytku pilotażowa chłodnicza instalacja adsorpcyjna o wydajności chłodniczej układu sorpcyjnego ~16 kW [A12]. Instalacja ta stanowi część innowacyjnego trigeneracyjnego węzła cieplnego łączącego w sobie adsorpcję i adsorpcję z opcją wykorzystania jako źródła ciepła sieci ciepłowniczej i/lub kolektorów słonecznych. Opracowując wytyczne działania oraz podstawowe założenia instalacji adsorpcyjnej, współuczestniczyłem również w opracowaniu projektu całego węzła, a także w pracach konstrukcyjnych, odbiorze, rozruchu i testach. Obecnie na urządzeniu prowadzę prace badawcze, które realizowane są zgodnie z przygotowanym przeze mnie planem eksperymentu. Prowadzony jest ciągły monitoring stanu, a dane na temat wszystkich elementów instalacji są rejestrowane w specjalnie do tego celu przystosowanym układzie pomiarowym, który integruje układ pomiarowy chillera adsorpcyjnego, urządzenia pomiarowe na węźle cieplnym oraz ustandaryzowany systemem monitoringu wykorzystywany przez Fortum na skalę przemysłową. Stanowisko zostało opracowane w taki sposób, aby mogło w przyszłości pełnić funkcję demonstracyjną i dydaktyczną.

Najnowsze rezultaty prowadzonych na instalacji badań eksperymentalnych oraz porównanie z wynikami symulacji numerycznych przedstawione zostały w pracy „*Experimental Analysis of an Adsorption Chiller driven with Local District Heating Network*” [A10]. Dane pozyskane z instalacji [A12] zostały tam zestawione z efektami działania modelu numerycznego. Wysoka dokładność odwzorowania rzeczywistości przez obliczenia modelowe (widoczna m.in. na wykresach Duhringa) możliwa była dzięki modyfikacji sposobu obliczania ciśnienia we wnętrzu pojedynczego modułu adsorpcyjnego. Wcześniejsze opracowania modelowe, prezentowane w literaturze, brały pod uwagę przewagę parownika, tj. autorzy zakładali, że ciśnienie w układzie jest narzucane przez zjawisko o

większej dynamice (tutaj parowanie nad adsorpcją)^{27,28}. W moim modelu modułu zintegrowanego zaproponowałem podejście proporcjonalne, zestawiałem trzy różne sposoby obliczania tej proporcjonalności oraz porównałem rezultaty z wynikami z rzeczywistej instalacji [A12]. W pracy [A10] wykazałem tym samym, że w systemach zintegrowanych, w których adsorber znajduje się w jednej obudowie z wymiennikiem ciepła (parownikiem/skraplaczem), ciśnienie w układzie jest wypadkową zjawisk zachodzących w obu sub-komponentach. Prace modelowe dotyczące układów zintegrowanych muszą tym samym uwzględniać wpływ adsorbentu na ciśnienie, a stopień tego wpływu jest uzależniony od konstrukcji modułu adsorpcyjnego.

5) Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

Obok działalności naukowej związanej z prezentowanym w niniejszym wniosku osiągnięciem naukowym mogę wyróżnić kilka podejmowanych przeze mnie kierunków badawczych. Są to problemy związanych z tematyką systemów energetycznych realizujących obiegi lewobieżne, a szczególnie procesy przepływowe i wymiany ciepła zachodzące w urządzeniach i elementach tych systemów.

Moje zainteresowania naukowe oscylują wokół następujących obszarów badawczych:

- a) modelowanie matematyczne i numeryczne zjawisk cieplnych i przepływowych, w oparciu o układy równań różniczkowych oraz rozwiązania numeryczne w oparciu o nowoczesne narzędzia programistyczne.
- b) termodynamika i wymiana ciepła w systemach chłodniczych, grzewczych i klimatyzacyjnych, w tym: przepływy metastabilne mieszanin azeotropowych, optymalizacja obiegów nadkrytycznych CO₂, N₂O, modelowanie i optymalizacja procesów wrzenia czynników chłodniczych, w szczególności w warunkach podciśnienia, zagadnienia związane z odzyskiem ciepła odpadowego procesów oraz projektowaniem wymienników;
- c) pasywne systemy ogrzewania infrastruktury (budownictwo, drogi, trakcje kolejowe, itp.) oparte o termosyfonowe wymienniki ciepła;
- d) zastosowanie nanocięczy w systemach chłodniczych i grzewczych

a) Modelowanie matematyczne i numeryczne zjawisk cieplnych i przepływowych

Problematyką modelowania matematycznego i numerycznego zjawisk cieplnych i przepływowych zajmowałem się w szeregu różnych zagadnień naukowych. W lutym 2011, w czasopiśmie naukowym *Cryogenics* opublikowałem artykuł *Feasibility of inline cooling in long distance HTS power line* [C2] dot. analizy procesów przekazywania ciepła w wysokotemperaturowych kablach nadprzewodzących oraz prognozowania długości linii kriogenicznej na podstawie budowy kabla oraz zastosowanego systemu chłodniczego. Analizie poddałem tu wymianę ciepła pomiędzy dwoma strumieniami ciekłego azotu chłodzącego kabel nadprzewodzący. Publikacja ta jest jednym z rezultatów ogółu prac badawczych przeprowadzonych podczas stażu doktorskiego w ramach Marie Curie RTN projekt NESPA (Nano-Engineering Superconductors for Power Applications). W samym projekcie zajmowałem się projektowaniem oraz analizą własności mechanicznych oraz cieplnym (modelowanie numeryczne) elementów skraplarki kriogenicznej opartej o mechanizm silnika Stirlinga.

We współpracy z Prof. Zbigniewem Królickim oraz dr inż. Bogusławem Biało analizowałem numerycznie procesy przemian fazowych zachodzące podczas przepływu dwutlenku węgla przez rurkę

²⁷ Pesaran, A., Lee, H., Hwang, Y., Radermacher, R., & Chun, H. H. (2016). Review article: Numerical simulation of adsorption heat pumps. *Energy*, 100, 310–320

²⁸ Yong, L., & Sumathy, K. (2002). Review of mathematical investigation on the closed adsorption heat pump and cooling systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(4), 305–338

kapilarną, czego rezultatem jest model matematyczny zjawiska omówiony w opracowaniu *Numerical investigation of a capillary tube in a carbon dioxide refrigeration system* [L9].

Wspólnie z Prof. Maciejem Chorowskim oraz dr. inż. Jarosławem Fydrychem zajmowałem się modelowaniem awaryjnego wypływu helu z cewek nadprzewodzących budowanego we Francji termojądrowego generatora ITER. Rezultatem prac jest wielomodułowy model numeryczny, który uwzględnił zjawiska cieplne i przepływowe nie tylko w cewkach magnesów nadprzewodzących, ale także we wszystkich elementach konstrukcyjnych instalacji bezpieczeństwa. Kod źródłowy symulacji napisałem w języku Python, a następnie przeprowadziłem szereg symulacji stanów awaryjnych oraz towarzyszącego im awaryjnego zrzutu ciekłego helu. Rezultaty wraz z wnioskami zostały umieszczone w pracy niepublikowanej [F11] oraz zaprezentowane na International Cryogenic Engineering Conference 23 - International Cryogenic Materials Conference 2010 19-23.07.2010 we Wrocławiu w pracy *Numerical modeling of the helium flows from the ITER TF coil windings and cases to the cold quench tank after the fast energy discharge* [L11]. Doświadczenia zdobyte podczas prac nad modelowaniem wypływu helu w ITER, wykorzystałem przy analizie modelowania awaryjnego wypływu helu z instalacji kriogenicznej stosowanej w akceleratorze CERN (wspólnie z prof. Maciejem Chorowskim oraz dr inż. Agnieszką Piotrowską). Bazując na równaniach różniczkowych oraz termodynamicznych równaniach stanu dla helu opracowałem program umożliwiający symulację dynamiki wypływu z rurociągu. Wyniki symulacji stanowią część raportu naukowego *The analysis of gas helium release from helium ring line (HRL)* [F9].

Podobieństwo geometryczne pozwoliło mi wykorzystać zdobyte wcześniej doświadczenia i zająć się problematyką wymiany ciepła w wymiennikach typu rura w rurze, stosowanych w gruntowych pompach ciepła.

W latach 2012-2014 we współpracy z firmą NANOTEL, Wrocław uczestniczyłem w pracach nad optymalizacją konstrukcji sond gruntowych stosowanych w sprężarkowych pompach ciepła oraz analizie możliwości poprawy efektywności wymiennika gruntowego. Prace badawcze zostały przeprowadzone w ramach grantów współfinansowanych z Europejskiego Funduszu Społecznego [J4, J5]. Współpracowałem przy analizach opisanych w *Analiza modyfikacji konstrukcyjnych wybranych sond gruntowych do sprężarkowych pomp ciepła* [E12] oraz *Propozycja poprawy efektywności wymiennika gruntowego do sprężarkowej pompy ciepła* [E11]. Doświadczenia zdobyte podczas w/w projektów wykorzystałem później w pracach koncepcyjnych i modelowych w tematyce optymalizacji działania gruntowych wymienników stosowanych w pompach ciepła, co znalazło swoje odbicie w pracy *Sonda gruntowa typu U o zmiennej średnicy do sprężarkowych pomp ciepła* [L5], gdzie współuczestniczyłem w opracowaniu konceptu oraz modelu wymiennika o zmiennej geometrii rur. Temat został dodatkowo rozbudowany o wpływ bocznego efektu cieplnego, a rezultaty zaprezentowano w formie referatu konferencyjnego na 12th IEA Heat Pump Conference, 15-18 maja 2017, Rotterdam, Holandia *Optimizing performance of U-pipe ground borehole heat exchangers by varying the pipe diameter* [L1]. Problem bocznego efektu cieplnego, a przede wszystkim model numeryczny i analiza wpływu tego efektu na przebieg wymiany ciepła w pionowym wymienniku gruntowym, został szczegółowo omówiony w pracy *Evaluation of the impact of the thermal shunt effect on the U-pipe ground borehole heat exchanger performance* [C1], w wysoko punktowanym czasopiśmie naukowym *Geothermics* oraz przedstawiony na 24th International Congress of Refrigeration w referacie *Optimization of thermal performance in heat pump's borehole heat exchanger* [L3]. Prace zawierają nie tylko szczegółową analizę stanu wiedzy i model matematyczny, ale także dyskusję wpływu bocznego efektu cieplnego na głębokość odwiertów, co ma fundamentalne znaczenie w kontekście aplikacyjnym gruntowych wymienników ciepła.

Zestawienie ostatnich rezultatów w obszarze modelowania procesów cieplno-przepływowych zawarłem w raporcie naukowym *Analiza i modelowanie procesów cieplno-przepływowych podczas wrzenia wybranych czynników chłodniczych* [F2].

b) Termodynamika i wymiana ciepła w systemach chłodniczych, grzewczych i klimatyzacyjnych

Jedną z kluczowych osi moich zainteresowań stanowią systemy chłodnicze, grzewcze i klimatyzacyjne. Z tego obszaru wyewoluował problem badawczy, który stanowi osiągnięcie badawcze w niniejszym wniosku. Równolegle jednak zajmowałem się wieloma innymi aspektami termodynamiki i wymiany ciepła w tego typu instalacjach. Jestem współautorem dwóch monografii o tej tematyce: *Termodynamiczne procesy i przemiany w obiegach chłodniczych i kriogenicznych* [E4] oraz *Termodynamiczne podstawy obiegów chłodniczych i kriogenicznych* [E6].

W latach 2009-2014 uczestniczyłem w pracach połączonych zespołów badawczych Centrum Badawczo-Rozwojowego KGHM Cuprum (pod kierunkiem dr. inż. Sławomira Gajosińskiego) Zakładu Chłodnictwa i Systemów Klimatyzacyjnych, Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów przy Politechnice Wrocławskiej (pod kierunkiem Prof. Zbigniewa Królickiego). Wraz z pracownikami naukowymi obu zespołów uczestniczyłem w opracowaniu koncepcji klimatyzacji stanowiskowej oraz mikro-klimatyzacji osobistej do zastosowania w kopalni rud miedzi [J6-J9]. Ze względu na szeroki zakres prac badawczych, projekt zaowocował szeregiem opracowań, w tym koncepcją modyfikacji konstrukcji kabiny SMG: *System autonomicznej klimatyzacji stanowiskowej SMG. Cz. 1, Analiza skuteczności systemów klimatyzacji. Możliwości wykorzystania ciepła spalin* [E15] oraz *System autonomicznej klimatyzacji stanowiskowej SMG. Cz. 2, Adsorpcyjny system klimatyzacyjny zasilany ciepłem odpadowym spalin* [E16]. Wstępne wyniki analiz teoretycznych przedstawionego problemu zostały zaprezentowane podczas Szkoły Aerologii Górniczej [L12-L14], w tym *Propozycja wykorzystania ciepła spalin z silników maszyn samojednych do napędu systemów klimatyzacji stanowiskowej* [L12] oraz *Wybrane aspekty optymalizacji procesu klimatyzacji kopalń* [L14]. W referatach przedstawiono kluczowe problemy z którymi należy się zmierzyć w obszarze klimatyzacji kopalń, oraz propozycje nietypowych rozwiązań, w tym np. możliwość zastosowania zjawiska adsorpcji, efektu Ranqua-Hirscha oraz materiałów zmiennofazowych. Analizy poszczególnych rozwiązań zostały również zebrane i przedstawione w pracy *Klimatyzacja stanowiskowa i mikroklimatyzacja osobista – rozwiązania dla trudnych warunków środowiskowych w kopalniach rud miedzi* [F8]. Odrębnie zająłem się materiałami zmiennofazowymi, ze względu na ich przydatność i znaczący potencjał zastosowania w publikacji *Przydatność mikroklimatyzacji osobistej opartej na materiałach zmiennofazowych w aspekcie wymagań technicznych i ergonomicznych* [E13]. Rozważyłem też koncepcję wykorzystania procesów adsorpcji i desorpcji do tego samego celu: *Wykorzystanie procesów adsorpcji i desorpcji w systemach mikroklimatyzacji osobistej* [E10].

W pracy *Rzeczywista pompa ciepła: termodynamiczne aspekty doboru obiegu porównawczego* [E18] przedstawione zostały aspekty termodynamicznych obiegów porównawczych dla pomp ciepła. Rozszerzona wersja została zaprezentowana w 2011 roku na 23rd International Congress of Refrigeration w Pradze, gdzie przedstawiałem referat dotyczący *Termodynamic aspects of cycle selection for refrigeration and heat pump systems* [L8], który został dodatkowo dostrzeżony, przetłumaczony na język hiszpański i opublikowany przez naukowe czasopismo termodynamiczne *Frio-Calor Aire Acondicionado*.

Wspólnie z dr inż. Bogusławem Biało oraz Prof. Zbigniewem Królickim zajmowałem się badaniem i analizą własności cieplnych mieszanin ziębników naturalnych oraz możliwościami ich zastosowania w wysokotemperaturowych sprężarkowych pompach ciepła. Rezultaty analizy zostały opublikowane w opracowaniu *Możliwości wykorzystania ziębników naturalnych i ich mieszanin w wysokotemperaturowych sprężarkowych pompach ciepła* [E9]. Wyniki zostały zaprezentowane na konferencji 12th IEA Heat Pump Conference, 15-18 maja 2017, Rotterdam, Holandia w referacie *Increase of heating medium temperature by using HTR mixtures in vapor compression heat pump* [L2]. Zaangażowałem się również w prace badawcze w tematyce obiegów transkrytycznych opartych na dwutlenku węgla, co znalazło swoje odzwierciedlenie w pracach *Optimization of transcritical CO2*

thermodynamic cycle for cooling and heating applications [E19] oraz *COP modeling in transcritical N2O cycle realized by heat pump* [E17].

c) pasywne systemy magazynowania i wymiany ciepła na potrzeby infrastruktury (np. budownictwo, drogi, trakcje kolejowe, itp.)

Niezależnie od prowadzonych przeze mnie prac badawczych, w roku 2014 zainteresowałem się tematyką pasywnych systemów grzewczych, konkretnie **adsorpcyjnymi zbięrkami zasilanymi energią słoneczną, adsorpcyjnymi systemami akumulacji ciepła oraz termosyfonowymi wymiennikami ciepła.**

Pasywne zbięrkami zasilane energią słoneczną oraz adsorpcyjne systemu akumulacji ciepła mają zastosowanie wszędzie tam, gdzie jest znacząco utrudniony dostęp do infrastruktury energetycznej. Problem ten stanowi interesujące rozwinięcie tematyki prezentowanego w tym wniosku osiągnięcia badawczego, ze względu jednak na odmienny charakter tego typu instalacji, poprzestałem na opracowaniach teoretycznych. Przegląd stanu wiedzy oraz rezultaty symulacji dla instalacji solarnych zostały zaprezentowane w pracach: *Możliwości zastosowania solarnych układów adsorpcyjnych jako elementu instalacji klimatyzacyjnej domu energooszczędnego* [L10] oraz *Pasywna zbięrkami sorpcyjna do przechowywania materiałów medycznych zasilana energią słoneczną* [L4].

Na badanie możliwości akumulacji ciepła w złożu adsorpcyjnym za pomocą zjawisk adsorpcji i desorpcji udało mi się uzyskać w roku 2011 grant MNIŚW na badania statutowe [J3]. Wyniki analiz teoretycznych i eksperymentalnych zaprezentowałem w raporcie badawczym [F7], a także późniejszych pracach *Analiza termodynamiczna możliwości wykorzystania zjawisk adsorpcji i desorpcji w systemie akumulacji energii cieplnej* [L6] oraz *Długoterminowe magazynowanie energii cieplnej w oparciu o zjawiska adsorpcji i desorpcji* [E5].

Termosyfonowe wymienniki ciepła znalazły się w obszarze moich naukowych zainteresowań przede wszystkim ze względu na potencjał ich zastosowania do poprawy warunków wymiany ciepła w systemach adsorpcyjnych. Rezultatem przeprowadzonych przeze mnie analiz jest opracowanie modelu matematycznego, który umożliwił przeanalizowanie możliwości zastosowania tego typu wymiennika w parze z używanymi i dopiero wprowadzanymi czynnikami chłodniczymi. Kompleksowa analiza wraz z wynikami symulacji została zaprezentowana w pracach *Termosyfonowe rury ciepła systemów klimatyzacyjnych: analiza możliwości zastosowania czynników R1234yf oraz R1234ze(E)* [E8]. Wcześniej opracowanie zostało rozszerzone o kontekst zastosowania w instalacjach sanitarnych i uzupełnione o inne czynniki należące do grupy HFO, a wyniki przedstawiono w *Analiza możliwości zastosowania czynników HFO w termosyfonowych wymiennikach ciepła stosowanych do odzyskiwania ciepła odpadowego z instalacji sanitarnych* [E3].

W roku 2015 zbudowałem (później zmodyfikowałem i zmodernizowałem) stanowisko badawcze – termosyfonowy wymiennik ciepła [B1a], na którym analizie poddano szereg czynników chłodniczych. Rezultaty uzyskane dla mieszaniny azeotropowej R507 zostały omówione i zaprezentowane w pracy *Experimental analysis of gravitational heat pipe using R507 as a working fluid* [E2] oraz w kontekście aplikacyjnym *Mieszaniny zeotropowe zbięrników w systemie biernego ogrzewania infrastruktury drogowej* [L7] oraz w pracy *Rury cieplne w systemie biernego ogrzewania infrastruktury drogowej* [E7].

d) zastosowanie nanocieczki w systemach chłodniczych i grzewczych

Jednym z nowych tematów, którymi zainteresowałem się w ostatnich latach jest intensyfikacja wymiany ciepła za pomocą dodatków nanocząstek. Efektem jest powstanie tzw. nanocieczki, której specyficzne własności fizyczne i termodynamiczne wpływają pozytywnie na współczynniki wymiany ciepła. W roku 2015 mgr inż. Agnieszka Właźlak celująco obroniła pracę dyplomową dot. wykorzystania

pasywnych systemów grzewczych (termosyfonowe wymienniki ciepła). Jedną z rozważanych przez nas możliwości intensyfikacji wymiany ciepła, było właśnie zastosowanie nanociecicy - cieczy grzewczych, których własności zostały wzbogacone przez dodanie nanocząstek. W tym samym roku mgr inż. Agnieszka Właźlak rozpoczęła studia doktoranckie w tematyce nanociecicy. Promotorem głównym został Prof. Zbigniew Królicki, natomiast ja zostałem promotorem pomocniczym.

Podstawowym obiektem naszego zainteresowania naukowego zostały nanocząstki grafenu. Dzięki nawiązanej przeze mnie współpracy z ITME, otrzymaliśmy możliwość skorzystania z wiedzy oraz próbek materiałów wyprodukowanych przez zespół naukowy Prof. Ludmiły Lipińskiej (twórczyni innowacyjnej metody produkcji nanocząstek grafenu). Równocześnie nawiązałem współpracę z Dr Mathiassem Bushmannem z Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH w Dreźnie oraz włączyłem się w prace międzynarodowej sieci badawczej NANOUPAKE (finansowanej w ramach europejskiego programu COST). Efektem tej pracy jest sześciomiesięczny staż naukowy mgr inż. Agnieszki Właźlak w ILK-Dresden. Wstępne wyniki przeprowadzonej analizy wpływu nanociecicy opartych na tlenku grafenu, SiO₂, oraz nietypowych struktur węglowych tzw. nano-horns, na pracę termosyfonowego wymiennika ciepła zostały zaprezentowane na European Symposium on Nanofluids 2017 (ESNf2017) [E1].

Najważniejszym wnioskiem z prac było ustalenie wagi wpływu zmian zachodzących na powierzchni wymiennika ciepła wskutek wrzenia nanociecicy. Ten interesujący problem badawczy stał się podstawą naszych dalszych prac, które będziemy prowadzić w ramach uzyskanego przez mgr inż. Agnieszkę Właźlak grantu Narodowego Centrum Nauki w ramach konkursu PRELUDIUM 12, gdzie pełnię rolę opiekuna naukowego [J1].

Podsumowanie:

Na całokształt mojego dorobku naukowego składa się **66 prac publikowanych** (w tym 50 opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora). Jestem również autorem/współautorem **10 prac niepublikowanych** stanowiących sprawozdania z przeprowadzonych badań (w tym 9 opracowanych po uzyskaniu stopnia doktora) oraz **1 patentu** przyznany po uzyskaniu stopnia doktora.

Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania:

- Dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia doktora inżyniera: **16.710**
- Dorobek w obszarze osiągnięcia badawczego: **13.488**

Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS):

- Cytowania po uzyskaniu stopnia doktora inżyniera: **23**
- Cytowania w obszarze osiągnięcia badawczego: **15**

Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS): **3**