

Wrocław, 04.02.2020

## Autoreferat

dr inż. Demis Pandelidis  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Mechaniczno- Energetyczny  
Katedra Kriogeniki i Inżynierii Lotniczej

## **I. Imię i nazwisko**

Demis Łukasz Pandelidis

## **II. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej**

W 2006 roku ukończyłem IX Liceum Ogólnokształcące im. Juliusza Słowackiego we Wrocławiu i rozpocząłem studia stacjonarne na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, które ukończyłem w 2011 roku uzyskując dyplom magistra inżyniera w specjalności Klimatyzacja Ogrzewnictwo i Instalacje Sanitarne.

W 2011 roku rozpocząłem studia doktoranckie, pod opieką naukową prof. Sergeya Anisimova. Rozprawę doktorską pt. *"Modelowanie procesów wymiany ciepła i masy w wymienniku z M-obiegiem pracującym w urządzeniach klimatyzacyjnych"* obroniłem z wyróżnieniem w 2016 roku.

## **III. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych**

W roku 2016 podjąłem pracę na stanowisku asystenta na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, którą kontynuowałem do 16 października 2019 roku. Od 16 października 2019 roku rozpocząłem pracę na Wydziale Mechaniczno- Energetycznym Politechniki Wrocławskiej, który jest do dzisiaj podstawowym miejscem mojej pracy. W 2020 roku awansowałem na stanowisko adiunkta naukowego w ramach realizacji projektu naukowego Lider finansowanego przez Nagrodowe Centrum Badań i Rozwoju. Ponadto, w latach 2017-2018 byłem zatrudniony na stanowisku Research Associate na Texas A&M University w Kingsville (Teksas), w Stanach Zjednoczonych.

## **IV. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.).**

Cykl publikacji pt. *„Wykorzystanie zjawiska parowania wody oraz nierównowagi termodynamicznej powietrza atmosferycznego jako odnawialnego źródła energii w wybranych aplikacjach energochłonnych”*:

1. D. Pandelidis, A. Cichoń, A. Pacak, P. Drąg, M. Drąg, W. Worek, S. Cetin, *Performance study of the cross-flow Maisotsenko cycle in humid climate conditions*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 115 (2020) 104581
2. D. Pandelidis, A. Pacak, A. Cichoń, W. Worek, S. Cetin, *Experimental study of plate materials for evaporative air coolers*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 120 (2021), 105049
3. D. Pandelidis, E. Niemierka, A. Pacak, P. Jadwiszczak, A. Cichoń, P. Drąg, W. Worek, S. Cetin, *Performance study of a novel dew point evaporative cooler in the climate of central Europe using building simulation tools*, Building and Environment, 181 (2020) 107101

4. M. Jagirdar, D. Pandelidis, A. Pacak, W. Worek, S. Cetin, *Performance evaluation of an air conditioning system based on quasi isothermal dehumidification*, Energy Conversion and Management, 217 (2020) 113009
5. D. Pandelidis, A. Pacak, A. Cichoń, P. Dąg, W. Worek, S. Cetin, *Numerical and experimental analysis of precooled desiccant system*, Applied Thermal Engineering, 181 (2020) 115929
6. D. Pandelidis, *Numerical study and performance evaluation of the Maisotsenko cycle cooling tower*, Energy Conversion and Management, 210 (2020) 112735
7. D. Pandelidis, M. Dąg, P. Dąg, W. Worek, S. Cetin, *Comparative analysis between traditional and M-Cycle based cooling tower*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 159 (2020) 120124
8. D. Pandelidis, A. Cichoń, A. Pacak, P. Dąg, W. Worek, S. Cetin, *Water desalination through the dew-point evaporative system*, Energy Conversion and Management 229 (2021) 113757

#### Opis pracy:

Badania zrealizowane w ramach cyklu publikacji dotyczą wykorzystania zjawiska parowania wody oraz nierównowagi termodynamicznej powietrza atmosferycznego (tzw. energii psychrometrycznej) jako odnawialnego źródła energii w aplikacjach energochłonnych, w tym: wentylacji, klimatyzacji, chłodnictwie oraz oczyszczaniu/odsalaniu wody pitnej. Aplikacje zostały wybrane ze względu na wyróżniającą się energochłonność oraz brak dostępnych na rynku rozwiązań, które w znaczący sposób pozwalają na jej obniżenie. Obecnie dostępne jest wiele innowacyjnych rozwiązań pozwalających na ograniczenie zużycia energii przez systemy grzewcze (np. pompy ciepła oraz kolektory słoneczne) oraz elektryczne (np. panele fotowoltaiczne), jednak dotychczas nie wprowadzono rozwiązań pozwalających na uzyskanie istotnych oszczędności w układach wentylacji, klimatyzacji, chłodnictwa oraz oczyszczania/odsalania wody. Z tego powodu badania zrealizowane na potrzeby pracy habilitacyjnej skoncentrowały się na ww. obszarach. Głównym założeniem wszystkich artykułów było opracowanie technologii bazujących na chłodzeniu wyparnym punktu rosy (ang. dew-point evaporative cooling), nazywanym także od nazwiska odkrywcy obiegiem Maistosenki (skr. M-obiegiem). Proces ten, ze względu na swoją naturę, pozwala maksymalnie wykorzystać naturalną nierównowagę termodynamiczną powietrza do pozyskiwania energii przy bardzo niskich nakładach energetycznych niezbędnych do dostarczenia z zewnątrz. W związku z tym przyjęto założenie, że badany proces cechuje się niezbędnym potencjałem do obniżenia energochłonności wcześniej opisanych układów.

Poszczególne etapy badań prezentowane były w kolejnych publikacjach w czasopiśmie z tzw. Listy Filadelfijskiej. W każdej z publikacji byłem pomysłodawcą badań, autorem hipotezy badawczej, twórcą planu badań, autorem modeli matematycznych i prototypów oraz prowadziłem nadzór nad wszystkimi pracami realizowanymi przez zespół badawczy. Poniżej zestawiono streszczenia oraz najważniejsze wyniki uzyskane w poszczególnych artykułach:

#### Publikacja 1. *Performance study of the cross-flow Maisotsenko cycle in humid climate conditions*

Pierwszy etap badań dotyczył zwiększenia potencjału do odzysku chłodu w instalacjach wentylacyjnych. We wstępnym etapie prac, przeprowadzonych przed właściwymi badaniami,

dokonano analizy wykorzystania typowego zjawiska chłodzenia wyparnego do zwiększenia efektywności odzysku chłodu w wymiennikach rekuperacyjnych (krzyżowym oraz przeciwprądowym) za pomocą badań numerycznych oraz eksperymentalnych. Założenie ideowe polegało na wprowadzeniu układu dysz wodnych oraz zbiornika na wodę do klasycznych wymienników rekuperacyjnych: w okresie ciepłym kanał powietrza wywiewanego był zwilżany wodą w celu poprawy efektywności odzysku chłodu. Wykonano także prototyp przeciwprądowego wymiennika rekuperacyjnego zwilżanego cieczą we współpracy z firmą Aerae Cooling Technologies Limited w Hong Kongu, który następnie przebadano eksperymentalnie w warunkach bliskich rzeczywistym (Załącznik 4, II.6.2.1. Poz. 6). Wyniki prac zostały opublikowane w dwóch artykułach: D. Pandelidis et al., *Counter-flow indirect evaporative cooler for heat recovery in the temperate climate*, Energy 165 (2018) 877-894 oraz D. Pandelidis et al., *Performance comparison between counter- and cross-flow indirect evaporative coolers for heat recovery in air conditioning systems in the presence of condensation in the product air channels*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 130 (2019) 757-777 (Załącznik 4, II.2.2.1. Poz. 1,5). Wnioski uzyskane z prac wstępnych pozwoliły na stwierdzenie, że zastosowanie technologii wyparnej może istotnie poprawić jakość odzysku chłodu w wymiennikach rekuperacyjnych, jednakże posiada także zasadnicze wady. Najważniejszą wadą rozwiązania jest fakt, że efektywność procesu odniesiona jest do temperatury termometru mokrego powietrza wywiewanego (w przybliżeniu można przyjąć, że sprawność wyparnego wymiennika do odzysku ciepła ograniczona jest entalpią właściwą powietrza wywiewanego). W związku z tym efektywność odzysku chłodu na standardowym rekuperatorze wyparnym jest porównywalna do efektywności higroskopijnego wymiennika obrotowego, który cechuje się prostszą budową i niższą energochłonnością (system wyparny wymaga większej energii ze względu na układ pompowy niezbędny do nawilżania wymiennika). Z tego powodu opracowany wstępnie przez autora wyparny system odzysku chłodu przewyższa efektywnością standardowe rekuperatory, jednakże nie jest on rozwiązaniem konkurencyjnym dla regeneratorów higroskopijnych.

Ze względu na ww. ograniczenia zdecydowano się skierować pierwszą część badań na nowe rozwiązanie wyparnego odzysku energii na potrzeby wentylacji, które przewyższy efektywnością powszechnie stosowane technologie. W tym celu przeprowadzono analizę możliwości wykorzystania chłodzenia punktu rosy (M-obiegu) do odzysku chłodu. Do badań opracowano dedykowany model matematyczny bazujący na opracowanej przez autora „metodzie sekcji” (założenia metodyki dokładnie opisano w publikacji „D. Pandelidis, S. Anisimov, *Numerical analysis of the heat and mass transfer processes in selected M-Cycle heat exchangers for the dew point evaporative cooling*, Energy Conversion and Management 90 (2015) 62-83”- Załącznik 4, II.2.1.1. Poz. 7), uwzględniający możliwość wystąpienia kondensacji pary wodnej z powietrza ochładzanego na skutek pośredniego kontaktu z zimnym strumieniem wywiewanym z pomieszczenia przy przepływie krzyżowym. Została także przeprowadzona walidacja modelu do danych eksperymentalnych uzyskanych przez Gas Technology Institute w USA. Uzyskano satysfakcjonujący wynik walidacji (rozbieżność w uzyskanych temperaturach wyjściowych nieprzekraczająca 0.5°C oraz 3 punkty procentowe rozbieżności w wyjściowej wilgotności względnej). Wykorzystując zwalidowany model przeprowadzono dokładne symulacje numeryczne uwzględniające pracę wymiennika

wyparnego punktu rosy w układzie nawiewno-wywiewnym. Wykazano, że zastosowanie chłodzenia punktu rosy pozwala osiągać wysoką efektywność odzysku chłodu poprzez wstępne obniżenie temperatury powietrza wywiewanego w suchym kanale wymiennika przed skierowaniem go do kanału mokrego. Dzięki takiej aranżacji przepływu powietrza efektywność procesu odniesiona jest do punktu rosy powietrza wywiewanego (a zatem do entalpii właściwej znacznie niższej niż entalpia powietrza wywiewanego z pominięciem procesu wstępnego chłodzenia). Pozwala to na uzyskanie wyższej skuteczności odzysku chłodu niż analizowane wcześniej zraszane rekuperatory wyparne oraz higroskopijne obrotowe wymienniki do odzysku ciepła. Uzyskane wyniki pozwoliły na dokładną analizę procesów wymiany ciepła i masy w trakcie realizacji obiegu Maisotsenki przy kondensacji pary wodnej w kanale powietrza głównego. Przeanalizowano charakter procesów zachodzących w części wstępnej oraz głównej wymiennika, określono obszar powierzchni wymiany ciepła, na której zachodzi kondensacja w zależności od parametrów wejściowych. Ponadto, wprowadzono szereg wskaźników opisujących efektywność procesu, w tym uzyskany spadek temperatury, uzyskany spadek zawartości wilgoci, moc chłodniczą, sprawność odniesiona do temperatury termometru mokrego powietrza wywiewanego oraz sprawność odniesiona do temperatury punktu rosy powietrza zewnętrznego, współczynnik EER opisujący uzyskaną moc chłodniczą podzieloną przez niezbędny wkład energii do napędu wentylatora oraz wskaźnik potencjału odzysku wody RWC. Ostatni wskaźnik opisywał unikalną możliwość odzysku wody niezbędnej do realizacji procesu chłodzenia wyparnego dzięki zbieraniu kondensatu powstałego w kanale głównym. Stwierdzono, że w polskich warunkach klimatycznych możliwe jest odzyskanie od 9 do 54% wymaganej ilości wody potrzebnej do realizacji procesu chłodzenia. Analiza numeryczna pozwoliła także opracować uproszczone równania „czarnej skrzynki” pozwalające na szybkie obliczenia możliwej do uzyskania temperatury wyjściowej oraz zawartości wilgoci na podstawie znanych parametrów zewnętrznych oraz wewnętrznych (do uzyskania zależności posłużono się metodą matematycznego planowania eksperymentu).

Przeprowadzono także porównanie efektywności nowej aranżacji z „klasycznym” krzyżowym wymiennikiem z M-obiegiem z wykorzystaniem wcześniej opisanych wskaźników efektywności. Stwierdzono, że nowa aranżacja pozwala uzyskać ponad dwukrotnie większą moc chłodniczą niż standardowe rozwiązanie, ponadto uzyskuje znacznie wyższy współczynnik EER (zakres od 8 do 22 wobec ok. 5,0 tradycyjnego rozwiązania). Przeprowadzono także analizę porównawczą zastosowania obu jednostek w różnych rejonach świata. Stwierdzono, że z wyłączeniem klimatów wybitnie suchych (np. Denver w stanie Kolorado, USA) proponowana aranżacja pozwala uzyskać znacznie wyższą efektywność niż standardowy wymiennik.

Na podstawie wyników badań opracowano wynalazek, który pozwala na maksymalnie efektywne wykorzystanie obiegu Maisotsenki do podwyższania skuteczności odzysku chłodu w wentylacji i klimatyzacji w polskich warunkach klimatycznych. Wynalazek zgłoszono do opatentowania (zgłoszenie patentowe numer P426748). Rozwiązanie wykorzystuje adaptacyjny układ przeciwprądowy, który, w zależności od warunków wewnętrznych i zewnętrznych, może pracować zarówno w trybie odzysku chłodu z powietrza wywiewanego jak i operować wyłącznie na strumieniu zewnętrznym. Może także pracować w trybie

mieszanym, wykorzystując częściową recykulację. Rozwiązanie zostało przeanalizowane w kolejnych publikacjach z cyklu.

## Publikacja 2. *Experimental study of plate materials for evaporative air coolers*

Następnym etapem badań było wykonanie prototypu wynalazku opracowanego w ramach badań opisanych w poprzedniej sekcji. W tym celu podjęto prace nad wyborem odpowiednich materiałów konstrukcyjnych do wymienników wyparnych pod kątem efektywności rozprowadzania cieczy z uwzględnieniem różnych metod jej doprowadzania do wymiennika (natrysk dyszowy z góry oraz rozprowadzanie kapilarne z dołu). Zidentyfikowano 8 różnych materiałów, w tym 4 pochodzenia naturalnego oraz 4 struktury syntetyczne. Przeprowadzono szereg testów standardowo wykorzystywanych do badania potencjału materiałów dla jednostek wyparnych, w tym:

- rozprowadzania kapilarnego w górę
- rozprowadzania grawitacyjnego w dół
- pojemności wodnej (zdolność wchłonięcia jak największej masy wody na tej samej powierzchni materiału)
- dyfuzyjności (zdolność rozprowadzenia powierzchniowego zadanej ilości cieczy na materiale)
- trwałości (analiza wizualna i manualna stanu technicznego materiałów po długotrwałych testach)

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych zidentyfikowano materiały o największym potencjale do zastosowania w jednostkach wyparnych. Stwierdzono, że syntetyczna włóknina bazaltowo-papieropodobna cechuje się najlepszymi właściwościami podciągania kapilarnego. Badany materiał pozwolił na podciągnięcie cieczy na wysokość 44 cm w trakcie dwugodzinnego testu- jest to wartość ponad dwukrotnie większa niż osiągnięta przez materiały testowane przez innych naukowców w dostępnych źródłach literaturowych pod kątem zastosowania w wymiennikach wyparnych (najwyższa uzyskana wysokość w dostępnych źródłach to 18 cm). Włóknina cechuje się ponadto dobrą pojemnością wodną, dyfuzyjnością oraz trwałością, jednak nie jest efektywna w rozprowadzaniu cieczy w kierunku od góry do dołu. Materiałem o najwyższym potencjale do zastosowania w natryskowych systemach rozprowadzania cieczy jest syntetyczna surfaktantowana włóknina polipropylenowa, która pozwala na równomierne i szybkie grawitacyjne rozprowadzenie cieczy (ponad 50 cm w przeciągu 10 minut), przy bardzo wysokiej trwałości oraz dobrej dyfuzyjności i pojemności wodnej.

Najważniejszym osiągnięciem przeprowadzonych na potrzeby artykułu badań jest znalezienie tworzyw sztucznych o własnościach hydrofilowych, które nadają się do budowy struktur wymienników wyparnych (oraz które osiągają lepszą skuteczność rozprowadzenia wody niż włókna naturalne). Dotychczasowe rozwiązania opierały się przede wszystkim na włókninach pochodzenia naturalnego, które cechują się niską trwałością oraz wysokim potencjałem rozkładu. Jednostki wyparne oparte na tworzywach sztucznych wykorzystywały materiały o charakterystyce hydrofobowej, co wymagało stałego dodawania surfaktantu do rozprowadzanej cieczy. Hydrofilowe włókniny syntetyczne pozwalają na efektywne

rozprowadzenie wody przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej trwałości ze względu na brak podatności na rozkład przy długotrwałym kontakcie z wilgocią. Dzięki tym właściwościom mają bardzo wysoki potencjał do zastosowania w aplikacjach komercyjnych.

Publikacja 3. *Performance study of a novel dew point evaporative cooler in the climate of central Europe using building simulation tools*

W ramach trzeciego etapu prac wykonano prototyp nowego wymiennika wyparnego do odzysku ciepła w systemach wentylacji i klimatyzacji oraz przeprowadzono jego testy eksperymentalne i numeryczne (we współpracy z University of Illinois oraz Argonne National Laboratory w USA). Środki na budowę i badania prototypu zostały pozyskane z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (grant Iuventus Plus) oraz Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej (program Bekkera). Jednostka została wyposażona w dedykowany system przepustnic, który pozwala osiągnąć najwyższą możliwą efektywność chłodzenia przy zmiennych parametrach powietrza zewnętrznego i wywiewanego. W sytuacji gdy zawartość wilgoci powietrza zewnętrznego jest niska urządzenie pracuje jak typowy regeneracyjny wymiennik wyparny. W sytuacji gdy powietrze zewnętrzne cechuje się wysoką wilgotnością, urządzenie pracuje w trybie odzysku chłodu z powietrza wywiewanego. Rozwiązanie może pracować także w trybie częściowego odzysku chłodu, w sytuacjach gdy pozwala to na uzyskanie niższych temperatur powietrza nawiewanego.

W celu określenia potencjału ograniczenia zużycia energii przez proponowane rozwiązanie przeprowadzono analizę porównawczą w warunkach klimatycznych Wrocławia z wykorzystaniem narzędzi do symulacji budynku (program EDSL Tas) we współpracy z zespołem z Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej. Na podstawie badań eksperymentalnych prototypu opracowano empiryczny model „czarnej skrzynki” bazujący na równaniach regresji, wyznaczonych za pomocą metody matematycznego planowania eksperymentu. Model został następnie zaimplementowany do programu TAS. Jako układ referencyjny przyjęto centralę nawiewno- wywiewnej wyposażoną w higroskopijny wymiennik obrotowy oraz chłodnicę wodną zasilaną z wysokosprawnego agregatu wody ziębniczej. Jako system alternatywny przyjęto centralę o identycznej wydajności powietrznej, obsługiwanej przez ten sam agregat chłodniczy, jednakże w miejscu wymiennika obrotowego zaimplementowana została opracowana jednostka. W ramach symulacji przeanalizowano budynek handlowy we Wrocławiu w sezonie chłodniczym (czerwiec-sierpień) dla danych pogodowych IMGW za rok 2015 .

Na podstawie wyników symulacji numerycznych ustalono, że proponowane rozwiązanie cechuje się znacznie wyższą efektywnością niż system z wymiennikiem obrotowym. Jednostka wyparna pokrywała ok. 95% zapotrzebowania na chłód, przy czym załączenie tradycyjnego układu chłodniczego było konieczne jedynie przez 20% czasu występowania zapotrzebowania na chłód (przez pozostałe 80% czasu wymiennik wyparny pokrywał całość zapotrzebowania). Wymiennik obrotowy jest w stanie pokryć ok. 25% całkowitego obciążenia, wymaga także stałej pracy systemu chłodniczego.

Proponowana jednostka wyparna pozwala ograniczyć zużycie energii elektrycznej na poziomie 65% w sezonie chłodniczym (przy uwzględnieniu wszystkich urządzeń

pomocniczych- wentylatorów, pomp etc.). Sezonowy współczynnik EER (ilość uzyskanej energii chłodniczej podzielona przez włożoną energię elektryczną) z uwzględnieniem urządzeń pomocniczych dla systemu tradycyjnego wyniósł 2,5, a dla systemu z wymiennikiem wyparnym 7,3.

Maksymalna moc chłodnicza wymagana do zapewnienia przez agregat (przy najbardziej niekorzystnej kombinacji obciążenia chłodniczego oraz parametrów wewnętrznych i zewnętrznych) w przypadku systemu z wymiennikiem obrotowym to 336 kW, w przypadku systemu z wymiennikiem wyparnym to 199 kW. W związku z tym, dla identycznych systemów proponowany wymiennik wyparny wymaga ok. 1,5 razy mniejszego agregatu ziębniczego niż rozwiązanie tradycyjne, co pozwala także ograniczyć koszty inwestycyjne w przypadku wykonywania nowego systemu.

Uzyskane wyniki potwierdziły znaczący potencjał systemu wyparnego punktu rosy do ograniczenia zużycia energii oraz poprawienia efektywności odzysku chłodu w tradycyjnych systemach wentylacyjnych. Proponowane rozwiązanie umożliwiło ograniczyć zużycie energii o 65%, jednocześnie wymagając mniejszego agregatu ziębniczego, co przynosi znaczące oszczędności zarówno po stronie eksploatacyjnej jak i inwestycyjnej.

#### *Publikacja 4. Performance evaluation of an air conditioning system based on quasi isothermal dehumidification*

Kolejnym etapem badań było opracowanie autonomicznego system klimatyzacyjnego, który wykorzystuje zjawisko nierównowagi termodynamicznej powietrza atmosferycznego. Rozwiązanie opisane w poprzednich podpunktach pozwoliło na znaczące podwyższenie możliwości odzysku chłodu w wentylacji, jednak nie było w stanie samodzielnie skompensować wszystkich zysków ciepła w pomieszczeniach w sezonie chłodniczym (konieczne było zastosowanie tradycyjnego agregatu chłodniczego, pełniącego funkcję źródła szczytowego w chwili wystąpienia maksymalnego obciążenia). W związku z tym rozpoczęto pracę nad samodzielnym źródłem chłodu wykorzystującym nierównowagę termodynamiczną powietrza atmosferycznego. Uwagę skierowano na systemy adsorpcyjne, które pozwalają na osuszenie powietrza za pomocą procesu sorpcji wilgoci do materiału na ściankach wymiennika ciepła. Dotychczas badane sorpcyjne układy chłodnicze oparte na chłodzeniu wyparnym cechowały się bardzo niską wydajnością chłodniczą, przez co nie znalazły zastosowania na rynku komercyjnym. W pracach naukowych dostępnych w literaturze układy te były analizowane w kontekście zastosowania jako układ do wstępnego ochładzania powietrza, który wciąż wymagał współpracy z tradycyjnym systemem chłodniczym. Niska efektywność układów wynikała z dwóch znaczących kwestii: 1) konieczności podgrzewania powietrza do wysokich temperatur w celu regeneracji sorbentu; 2) wysokiego przyrostu temperatury osuszanego powietrza wynikającego z wydzielania się ciepła sorpcji (w konsekwencji strumień, który opuszczał układ był suchy, lecz bardzo gorący i wymagał wysokich nakładów energetycznych do obniżenia swojej temperatury). Z tego powodu zdecydowano się na opracowanie nowego rozwiązania, które pozwoli na wyeliminowanie ww. wad typowych adsorpcyjnych systemów chłodniczych. Do realizacji badań nawiązano współpracę z Eindhoven University of Technology w Holandii.



W ramach wspólnych prac powstała koncepcja quasi-izotermicznego osuszacza sorpcyjnego współpracującego z wymiennikami wyparnymi punktu rosy. Idea koncepcji opiera się na efektywnym usuwaniu ciepła sorpcji dzięki zastosowaniu dedykowanej struktury wymiennika akumulacyjnego, wypełnionego sorbentem ułożonym na płytowo- rurowym wymienniku ciepła. W trakcie procesu osuszania powietrza, przez jednostkę przepływa woda uprzednio schłodzona na wieży chłodniczej, która usuwa ciepło emitowane w procesie adsorpcji. W trakcie regeneracji jednostki przez wymiennik przepływa gorąca woda, która podgrzewa materiał sorpcyjny, usuwając z niego wilgoć do przepływającego powietrza regenerującego. Zaproponowane rozwiązanie pozwala osuszać powietrze przy minimalnym przyroście temperatury, co pozwala na efektywną współpracę z wymiennikami wyparnymi. Na podstawie koncepcji sformułowano model systemu sorpcyjnego we współpracy z drem Mrinalem Jagidarem z EUT oraz modele współpracujących z nim wymienników wyparnych. Następnie przeprowadzono eksperymentalną walidację modeli matematycznych we współpracy z profesorem Sabrim Cetinem z Univeristy of Illinois oraz opracowano szereg wskaźników opisujących efektywność pracy analizowanego systemu (w tym COP termiczne, COP elektryczne oraz wskaźnik zużycia wody). Przeprowadzono analizę dla proponowanego systemu w dwóch podstawowych wariantach: z recyrkulacją powietrza wywiewanego oraz bez recyrkulacji. Każdy z wariantów ma dwa dodatkowe sub-warianty z przeciwprądowym i krzyżowym wariantem jednostki wyparnej.

Uzyskane wyniki pozwoliły na potwierdzenie słuszności koncepcji- jednostka osiągnęła przyjęte parametry powietrza nawiewanego, umożliwiające kompensację zysków ciepła w warunkach rzeczywistych (przyjęto wymaganą temperaturę powietrza nawiewanego równą 17 °C przy zawartości wilgoci równej 10g/kg). System był w stanie zapewnić także niższe parametry (temperatury na poziomie 15°C i zawartość wilgoci na poziomie 5 g/kg) używając niskotemperaturowego źródła ciepła (temperatura wody regenerującej równa 50°C). Współczynniki COP termicznego oraz elektrycznego osiągnięte przez system były porównywalne z typowymi systemami sorpcyjnymi: COP termiczne zawierało się w przedziale 0,3-0,7; COP elektryczne zawierało się w zakresie 13,0-80,5. Potwierdzona została także słuszność założeń koncepcji quasi-izotermicznego systemu sorpcyjnego: na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że technologia pozwala uniknąć przyrostu temperatury podczas procesu osuszania, a w niektórych przypadkach umożliwia nawet schłodzenie przepływającego powietrza. Uzyskane wyniki pozwoliły na stwierdzenie, że wariant systemu bazujący na wymienniku przeciwprądowym w układzie bez recyrkulacji powietrza są najbardziej korzystną aranżacją systemu w odniesieniu do wybranych wskaźników efektywności- najwyższe COP termiczne oraz elektryczne (w przypadku wyższych wilgotności), a także najmniejsze zużycie wody. Wymiennik przeciwprądowy pozwalał także na uzyskiwanie niższych temperatur niż wymagane, co w praktyce umożliwiłoby ograniczenie przepływu powietrza, a zatem zmniejszenie zużycia energii elektrycznej potrzebnej do napędu wentylatorów.

Opracowane rozwiązanie miało charakter przełomowy, ponieważ stanowiło jedną z pierwszych koncepcji całkowicie autonomicznego sorpcyjnego systemu klimatyzacyjnego, który jest w stanie kompensować zyski ciepła wewnątrz pomieszczeń oraz zapewnić

komfortowe warunki wewnątrz obiektu wykorzystując niskotemperaturowe źródło ciepła bez konieczności stosowania klasycznych układów sprężarkowych.

#### Publikacja 5. *Numerical and experimental analysis of precooled desiccant system*

System wykonany we współpracy z EUT pozwalał na efektywne usuwanie ciepła sorpcji oraz na samodzielne przejmowanie zysków ciepła w pomieszczeniu, jednak cechował się także pewnymi wadami. Do podstawowych wad należy zaliczyć relatywnie złożoną strukturę oraz niskie COP termiczne (definiowane jako stosunek uzyskanej mocy chłodniczej do ilości energii cieplnej koniecznej do regeneracji sorbentu). Pomimo faktu, że rozwiązanie opisane w publikacji 4 miało przełomowy charakter ze względu na możliwość zapewnienia komfortowych warunków w pomieszczeniu przy wykorzystaniu niskotemperaturowego źródła ciepła, jego COP termiczne było niższe niż 1.0. Jest to cecha charakterystyczna większości obecnie analizowanych systemów sorpcyjnych: wymagają one większego nakładu energii termicznej do regeneracji sorbentu, niż są w stanie wyprodukować chłodu. W związku z tym nawet w przypadku rozwiązań takich jak technologia opisana w poprzednim rozdziale powstaje problem przy rozszerzeniu ich zastosowania na rynku komercyjnym- przy korzystaniu z efektywnych źródeł niskotemperaturowych, takich jak pompa ciepła, generalna efektywność energetyczna systemów jest niska, ponieważ wymagany nakład energii elektrycznej jest większy niż w przypadku układów tradycyjnych. Realne COP układu, odniesione do zużycia energii elektrycznej można obliczyć ze wzoru:

$$COP_{rzecz} = \frac{Q_{chl}}{N_{PC}} = \frac{Q_{chl}}{Q_{grz} / COP_{PC}} = COP_T \cdot COP_{PC} \quad (1)$$

Gdzie:  $COP_{rzecz}$ : rzeczywiste COP układu odniesione do zużycia energii elektrycznej, -  $Q_{chl}$ - moc chłodnicza układu, W;  $Q_{grz}$ - moc grzewcza wymagana do regeneracji sorbentu, W;  $COP_{PC}$  jest współczynnikiem COP dla pompy ciepła ( $COP=Q_{grz}/N_{PC}$ ), a  $N_{PC}$  jest ilością energii elektrycznej niezbędnej do wytworzenia energii termicznej w pompie ciepła, W. Widoczne jest, że w sytuacji gdy COP termiczne układu jest mniejsze niż 1, jego iloczyn z COP pompy ciepła prowadzi do obniżenia rzeczywistego COP układu.

Z tego powodu, dzięki wnioskom wyciągniętym z poprzednich badań, podjęto pracę nad stworzeniem układu charakteryzującego się współczynnikiem  $COP_T$  większym od 1. Postanowiono także opracować układ o relatywnie prostej strukturze, który cechować się będzie wysokim potencjałem komercyjnym. Efektem prac była koncepcja Wysokoefektywnej Jednostki Wentylacyjno-Klimatyzacyjnej (WJWK) opierającej się na wstępnym chłodzeniu powietrza w wymienniku wyparnym punktu rosy. Generalne założenie technologii polega na osiągnięciu wysokich wartości termicznego COP poprzez stworzenie maksymalnie korzystnych warunków dla pracy rotora dzięki wstępnej i wtórnej jednostce wyparnej. Zadaniem wstępnego wymiennika wyparnego jest zwiększenie efektywności osuszania rotora sorpcyjnego, poprzez stworzenie maksymalnie korzystnych warunków na wejściu dzięki doprowadzeniu chłodnego powietrza. Wielokrotnie wykazano, że efektywność osuszania rotora sorpcyjnego spada wraz ze wzrostem temperatury osuszanego powietrza (min. w publikacjach autora, np. D. Pandelidis et al., *Numerical analysis of a desiccant system with cross-flow Maisotsenko cycle heat and mass exchanger*, Energy and Buildings 123 (2016), 136–150: Zał. 4.II.2.2.1. Poz. 10). Jest to spowodowane strukturą izoterm sorpcji większości

używanych sorbentów: potencjał osuszania powietrza zależy przede wszystkim od różnicy pomiędzy wilgotnością względną powietrza osuszanego i regenerującego. Przy stałej zawartości wilgoci, różnica ta maleje gdy powietrze osuszane ma wyższą temperaturę. Obecnie badane systemy sorpcyjne pracują na powietrzu zewnętrznym, które w lecie jest gorące, co wymaga podgrzewania strumienia regeneracyjnego do bardzo wysokich temperatur (80-100°C) w celu zmaksymalizowania różnicy wilgotności względnej. W proponowanej jednostce, dzięki wykorzystaniu wstępnego wymiennika z M-obiegiem, wysoka różnica wilgotności względnej osiągana jest poprzez wstępne ochłodzenie osuszanego powietrza przy stosunkowo niewielkim podgrzewie powietrza regenerującego. Pozwala to uzyskać wysoką efektywność osuszania bardzo niskim kosztem (jedynym elementem zużywającym energię przy wymienniku z M-obiegiem jest wentylator). Dodatkową zaletą doprowadzenia chłodnego powietrza do rotora jest fakt, że osuszone powietrze po przejściu przez rotor ma relatywnie niską temperaturę, dlatego znacznie mniej energii potrzeba, by ochłodzić je do żądanych parametrów nawiewu. Jak widać, rozwiązanie osiąga podobny efekt jak system opisany w poprzednim podpunkcie (temperatura na wyjściu z rotora jest niższa lub równa temperaturze zewnętrznej), jednak osiągnięte jest to niższym nakładem energetycznym oraz za pomocą znacznie prostszej struktury jednostki. Ponadto nie wymaga ona zastosowania urządzeń pomocniczych, takich jak wieża chłodnicza.

W ramach pracy stworzono koncepcję systemu, opracowano jego model matematyczny oraz przeprowadzono testy eksperymentalne na rotorze sorpcyjnym oraz prototypach wymienników wyparynych rozważanych jako elementy jednostki WJWK we współpracy z University of Illinois oraz Argonne National Laboratory w USA. Podobnie jak w poprzedniej analizie, rozważono konfiguracje dwóch wymienników punktu rosy: przeciwwązowego oraz krzyżowego. Powstały zatem 4 potencjalne konfiguracje systemów:

- System A: dwa wymienniki przeciwwązowe
- System B: wstępny wymiennik krzyżowy oraz wtórny przeciwwązowy
- System C: wstępny wymiennik przeciwwązowy oraz wtórny krzyżowy
- System D: dwa wymienniki krzyżowe

Na potrzeby analizy opracowano też dodatkowe wskaźniki w celu bardziej precyzyjnej analizy potencjału nowego rozwiązania: potencjał przejmowania zysków ciepła w pomieszczeniu „a”. Wskaźnik definiowany jest jako moc chłodnicza wygenerowana w pomieszczeniu dzielona przez nakład koniecznej do włożenia energii termicznej. Został on wprowadzony w celu uzupełnienia wskaźnika termicznego COP, który opisuje moc chłodniczą wygenerowaną poprzez ochładzanie powietrza zewnętrznego, podzieloną przez nakład energii termicznej. Wskaźnik ten jest powszechnie stosowany do opisów systemów sorpcyjnych jednak jest on mylący, ponieważ nie odnosi się do realnego zadania jakie ma do spełnienia system chłodniczy (obniżanie temperatury w pomieszczeniu), tylko do zdolności do obniżenia temperatury powietrza zewnętrznego. Przykładowo, system, który ochłodzi powietrze zewnętrzne z 32 do 30°C nie wygeneruje żadnej mocy chłodniczej w ochładzanym pomieszczeniu, jednak będzie się on charakteryzował współczynnikiem  $COP_T > 0$ .

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zaproponowana koncepcja osiągnęła pożądane parametry efektywności. Najbardziej skuteczną termicznie aranżacją (System A) charakteryzowała się COP termicznym wahającym się w zakresie 1,4-4,9 oraz wskaźnikiem

$a$  w zakresie 1,2-4,6, przy czym w polskich warunkach obliczeniowych (temperatura 32°C, zawartość wilgoci 12 g/kg) wartość  $a$  utrzymana była na poziomie 4.2. Oznacza to, że system pozwolił wygenerować ponad 4 krotnie więcej chłodu w pomieszczeniu niż konsumował energii cieplnej. Osiągane temperatury nawiewu wahały się w zakresie 14,0-17.5°C, a poziom osuszenia powietrza zewnętrznego zawierał się w zakresie 2,0 do 4,5 g/kg. Wartym odnotowania jest fakt, że opracowany system pozwalał na efektywną pracę przy temperaturach regeneracji na poziomie 40°C, posiada zatem bardzo wysoki potencjał do współpracy z niskotemperaturowymi źródłami ciepła, takimi jak pompy ciepła lub panele solarne. Przykładowo, przy zastosowaniu pompy ciepła o COP=4, rzeczywiste elektryczne COP układu (ilość wytworzonej mocy chłodniczej podzielona przez wymagany wkład energii elektrycznej) wynosiłoby 16,8; zatem ponad 3 razy więcej niż w przypadku klasycznych układów sprężarkowych.

W dalszej części artykułu dokonano analizy zużycia energii elektrycznej oraz wody przez poszczególne systemy, przeanalizowano ich pracę w polskich warunkach klimatycznych oraz dokonano uproszczonej analizy ekonomicznej poszczególnych rozwiązań. Przeanalizowano 3 podstawowe tryby pracy systemów: 1 praca z pełną wydajnością (wszystkie urządzenia jednostki pracują), 2 chłodzenie tylko na wymienniku wyparnym (w sytuacji gdy powietrze zewnętrzne jest suche i nie wymaga dodatkowego osuszania) oraz 3 praca w trybie wentylacyjnym (ochładzanie nie jest konieczne). Stwierdzono, że system wymaga pracy w trybie 1 (chłodzenie+ osuszanie) przez ok. 21% sezonu chłodniczego (193 godziny). Najczęściej występującym trybem pracy jest tryb 2 (ochładzanie na wymienniku wyparnym), które wymagane jest przez 57% sezonu (524 godziny). Praca w trybie wentylacji możliwa jest przez 22% sezonu chłodniczego (203 godziny).

Przeprowadzona uproszczona analiza ekonomiczna pozwoliła ustalić koszty produkcji proponowanych systemów: rozwiązania cechują się podobnym nakładem inwestycyjnym. W przeliczeniu na osiąganą wydajność chłodniczą, najbardziej opłacalnym rozwiązaniem jest system C (745\$/KW).

Na podstawie analizy wszystkich wskaźników stwierdzono, że rozwiązaniami o największym potencjale wdrożeniowym są systemy A i B. Oba rozwiązania cechują się wysoką wydajnością chłodniczą, wysokimi wartościami wskaźników: współczynnikiem termicznego COP,  $a$ , elektrycznego COP (opisywanego w artykule jako EER) oraz akceptowalną ceną i zużyciem wody. W związku z tym zostały rekomendowane jako baza do dalszych prac. Środki na dalsze badania WJWK zostały pozyskane w ramach grantu Lider X z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (Zał. 4.II.6.2.2. Poz. 1), obecnie wykonano prototyp laboratoryjny, który potwierdził efektywność chłodniczą rozwiązania. W ramach projektu powstanie kompletny prototyp jednostki, który zostanie przetestowany w warunkach bliskich rzeczywistym. Uzyskano list intencyjny od przedsiębiorstwa Klima-Therm, które chce się podjąć wdrożenia rozwiązania.

Publikacja 6. *Numerical study and performance evaluation of the Maisotsenko cycle cooling tower*

Kolejnym etapem prac zrealizowanym w ramach cyklu publikacji było wykorzystanie technologii chłodzenia punktu rosy na potrzeby chłodnictwa przemysłowego. Skupiono się

na technologii wież chłodniczych, które powszechnie wykorzystywane są jako źródła chłodu na potrzeby elektrowni, zakładów przemysłowych (min. przemysł chemiczny i farmaceutyczny), serwerowni oraz wielkoskalowych instalacji klimatyzacyjnych. Jednym z głównych powodów, dla których podjęto pracę nad tematem jest bardzo wysoki potencjał obniżenia kosztów eksploatacyjnych oraz energochłonności przemysłowych układów chłodniczych poprzez skuteczniejsze ochładzanie wody technologicznej. Według cytowanej w artykule analizy Roberta Burgera obniżenie temperatury chłodziwa o 5°C przełoży się na oszczędności rzędu 650 tys. dolarów w skali roku dla elektrowni o mocy 600 MW, ponad 5 milionów dolarów rocznie dla zakładów chemicznych i ponad 40 tys. dolarów dla sprężarkowego systemu chłodniczego o mocy 500 kW. Problem z tradycyjnymi wieżami chłodniczymi polega na praktycznej braku możliwości podwyższenia ich skuteczności w ochładzaniu cieczy, ze względu na teoretyczny limit, którym jest temperatura termometru mokrego przepływającego przez nie powietrza. Z tego powodu zdecydowano o przeanalizowaniu potencjału zastosowania chłodzenia punktu rosy (obiegu Maisotsenki) na potrzeby ochładzania wody. Temat ten był dotychczas podjęty przez bardzo niewielką grupę badaczy (w bazie SCOPUS ukazało się łącznie 7 publikacji na ten temat, z czego tylko jedna dotyczyła modelowania matematycznego), dlatego występowała duża luka w wiedzy na temat ochładzania cieczy za pomocą technologii wyparnego punktu rosy.

W związku z tym w pierwszym etapie badań skupiono się nad teoretyczną stroną zagadnienia: opracowano dedykowany model matematyczny pozwalający na opisanie procesów wymiany ciepła i masy w przeciwprądowej wieży chłodniczej z M-obiegiem wyróżniający się uwzględnieniem wykorzystania nierównomiernej długości kanałów suchego i mokrego, które pozwoliło na znaczne podwyższenie efektywności chłodzenia. Przeprowadzono walidację eksperymentalną modelu do danych uzyskanych od Gas Technology Institute (Des Plains, USA). Uzyskano satysfakcjonującą zgodność modelu z danymi eksperymentalnymi (rozbieżność uzyskanej temperatury wody nie przekraczała 0,5°C, rozbieżność w uzyskanej sprawności termometru mokrego nie przekraczała 5%).

Zwalidowany eksperymentalnie model został wykorzystany do przeprowadzenia analizy numerycznej badanej wieży chłodniczej. Najważniejszym ustaleniem jest potwierdzenie możliwości obniżenia temperatury ochładzanej wody poniżej temperatury termometru mokrego powietrza na wejściu do jednostki. Uzyskana sprawność odniesiona do temperatury termometru mokrego wahała się w zakresie 80-140%. Jest to możliwe dzięki wstępnemu ochłodzeniu powietrza w suchym kanale wieży chłodniczej: z powodu obniżenia temperatury przy niezmienionej zawartości wilgoci, strumień powietrza obniża jednocześnie swoją temperaturę termometru mokrego. Ze względu na fakt, że teoretycznym limitem dla procesu ochładzania jest temperatura termometru mokrego na wejściu do mokrego kanału, wstępne chłodzenie pozwala na „przesunięcie” limitu w kierunku niższych temperatur (bliskich parametrom punktu rosy).

Analiza pozwoliła na opisanie charakterystycznych cech procesu wymiany ciepła i masy w wieży z M-obiegiem. Stwierdzono, że w mokrym kanale wymiennika występują dwie aktywne strefy wymiany ciepła i masy, podobnie jak w przypadku jednostek wyparnych stosowanych do ochładzania powietrza. Jednakże w wieży chłodniczej zaobserwowano również fakt występowania dwóch aktywnych stref wymiany ciepła w kanale suchym:

w pierwszej strefie temperatura powietrza wzrasta w kierunku jego ruchu, następnie osiąga punkt maksymalny (określony jako  $\Omega_1$ ), po przejściu przez punkt  $\Omega_1$  temperatura powietrza zaczyna spadać i utrzymuje ten trend do końca kanału suchego. Efekt ten wynika z faktu, że początek kanału suchego zlokalizowany jest przy końcowym odcinku kanału mokrego. W tym punkcie do wieży doprowadzana jest woda o najwyższej temperaturze, a strumień powietrza mokrego charakteryzuje się wysokim stopniem nasycenia parą wodną. W związku z tym jej potencjał do asymilacji ciepła jawnego i utajonego od przepływającej cieczy jest relatywnie niski. Strumień płynący przez kanał suchy cechuje się wyraźnie niższą temperaturą niż woda technologiczna. Powstaje zatem sytuacja, w której woda ma wysoki potencjał wymiany ciepła (wysoka temperatura), powietrze w kanale mokrym cechuje się niskim potencjałem do wymiany ciepła i masy (wysoka temperatura i wilgotność), a powietrze w kanale suchym ma wysoki potencjał do asymilacji ciepła jawnego. W związku z tym strumień ciepła jawnego od przepływającej wody jest częściowo skierowany do strumienia w kanale suchym, powodując przyrost jego temperatury. Efekt ten ma negatywny wpływ na wydajność chłodniczą wieży, ze względu na fakt, że kanał suchy wykorzystywany jest nieefektywnie (ze powodu wstępnego podgrzewu powietrze powraca do swojej wejściowej temperatury po przepłynięciu przez 40% długości kanału). Z tego powodu zaproponowano nową geometrię wieży chłodniczej ze skróconym kanałem suchym. Analiza numeryczna pozwoliła wykazać, że takie rozwiązanie pozwala wyeliminować negatywny efekt podgrzewu powietrza w suchej części jednostki i w konsekwencji umożliwić uzyskanie niższych temperatur ochładzanej cieczy.

W dalszej części artykułu przeanalizowano wpływ warunków wejściowych (parametry powietrza i wody) oraz operacyjnych (liczba NTU wymiennika ciepła oraz stosunek pojemności cieplnej strumienia powietrza i wody) na efektywność ochładzania. Stwierdzono, że skuteczność ochładzania rośnie wraz z temperaturą zewnętrzną, maleje natomiast przy wzroście zawartości wilgoci powietrza oraz temperatury początkowej ochładzanej wody. Określono także zależność sprawności odniesionej do temperatury termometru mokrego w zależności od liczby NTU- stwierdzono, że sprawności przekraczające 100% są możliwe do osiągnięcia przy:  $NTU > 3$  (temperatura powietrza 35-40°C);  $NTU > 4,5$  (temperatura powietrza 30°C) oraz  $NTU > 6$  (temperatura powietrza 25°C). Ponadto, zaobserwowano znaczący wpływ stosunku pojemności cieplnych powietrza i wody na efektywność ochładzania. W przypadku gdy pojemność cieplna wody jest wyraźnie wyższa niż strumienia powietrza (0,3 i mniej), efektywność wymiennika drastycznie spada. Zalecane jest stosowanie stosunku pojemności cieplnych na poziomie 0,5 i większym.

#### Publikacja 7. *Comparative analysis between traditional and M-Cycle based cooling tower*

W ramach dalszych prac nad nowym rozwiązaniem wieży chłodniczej wykonano analizę porównawczą rozwiązania bazującego na chłodzeniu punktu rosy (M-obiegu) oraz rozwiązania tradycyjnego. Prace badawcze zostały zrealizowane wspólnie z University of Illinois oraz Argonne National Laboratory w USA w ramach projektu *Superefficient cooling tower*. Środki pozyskano z Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej (program Bekkera: Zał. 4.II.6.2.2. Poz. 3). Podstawowym problemem, który musiał zostać zbadany w celu określenia

potencjału wdrożeniowego nowej technologii jest kwestia wydajności chłodniczej odniesiona do gabarytów urządzenia. Wynika to z faktu, że w wieży z M-obiegiem występuje dodatkowy kanał suchy, niezbędny do wstępnego ochładzania powietrza przed kontaktem z wodą. W związku z tym, jednostka z M-obiegiem charakteryzująca się tym samym poziomym NTU w kanale mokrym jak rozwiązanie tradycyjne będzie dwukrotnie większa. Przy zastosowaniu tych samych gabarytów zewnętrznych jednostka z M-obiegiem będzie cechowała dwukrotnie niższym NTU w kanale mokrym w porównaniu do jednostki tradycyjnej. Z tego powodu przeprowadzono analizę porównawczą w dwóch wariantach w celu uzyskania wiarygodnych wyników:

-Wariant 1: obie wieże cechują się tym samym NTU (gabaryty wieży z M-obiegiem są dwukrotnie większe)

-Wariant 2: tradycyjna wieża chłodnicza ma dwukrotnie większe NTU niż wieża z M-obiegiem (obie jednostki mają te same wymiary zewnętrzne)

Analizę przeprowadzono dla wybranych warunków wejściowych (temperatura i zawartość wilgoci powietrza oraz temperatura ochładzanej cieczy) oraz operacyjnych (liczba NTU oraz stosunek pojemności cieplnych powietrza i wody).

Uzyskane wyniki wykazały, że technologia wież chłodniczych oparta na obiegu Maistosenki pozwala uzyskiwać niższe temperatury niż jednostka tradycyjna zarówno w przypadku identycznej powierzchni wymiany masy (ta sama liczba NTU) jak i przy identycznych gabarytach zewnętrznych (NTU w kanale mokrym dwukrotnie mniejsze w przypadku urządzenia z M-obiegiem). Przy tej samej powierzchni wymiany masy nowa technologia uzyskiwała temperatury ochładzanej cieczy w zakresie 17,6 do 19,1°C przy temperaturze zewnętrznej zmieniającej się od 25 do 40°C. Dla tych samych warunków tradycyjna wieża pozwalała na ochłodzenie wody do poziomu 18,3°C-22,5°C. Różnice uzyskanych parametrów wody dochodzą do 4°C. Różnice w sprawności odniesionej do temperatury termometru mokrego dochodzą do 70 punktów procentowych. W tym przypadku różnice w uzyskanej temperaturze ochładzanej cieczy dochodzą do 2,5°C, a uzyskanej sprawności do 30 punktów procentowych.

Odnotowano fakt, że efektywność wieży wykorzystującej chłodzenie punktu rosy jest znacznie mniej podatna na temperaturę wlotową powietrza zewnętrznego. Zmiana temperatury na wejściu od 25 do 40°C spowodowała wzrost uzyskanej temperatury wody o ok. 1°C. W przypadku jednostki tradycyjnej jest to ok. 5°C.

Wyznaczono graniczne wartości NTU oraz stosunku pojemności cieplnej powietrza i wody, przy których jednostka z M-obiegiem jest w stanie uzyskać niższe temperatury ochładzanej cieczy niż tradycyjne rozwiązanie o identycznych gabarytach: dla większości warunków klimatycznych graniczna wartość NTU wynosi 5,0 a stosunek pojemności cieplnych 0,35.

Analiza pozwoliła na wykazanie potencjału komercyjnego rozwiązania jako nowego źródła chłodu na potrzeby przemysłowych systemów chłodniczych. Rozwiązanie pozwala na uzyskanie wyraźnie niższych temperatur od jednostki tradycyjnej, co ma realne przełożenie na koszty eksploatacyjne oraz zużycie energii przez obiekty przemysłowe. Ponadto wykazano jej mniejszą podatność na warunki zewnętrzne, co ma duże znaczenie w okresie ciepłym, gdzie w ciągu dnia obserwowane są wysokie zmiany temperatur zewnętrznych. W artykule nakreślono także dalsze kierunki badań, które powinny

doprowadzić do opracowania komercyjnego prototypu rozwiązania (prototyp zostanie opracowany w ramach projektu *Superefficient cooling tower*- Zał. 4.II.6.2.2. Poz. 3).

#### Publikacja 8. *Water desalination through the dew-point evaporative system*

Wysoka efektywność energetyczna wież chłodniczych przeznaczonych do pracy na potrzeby przemysłowe pozwoliła na sformułowanie kolejnej koncepcji technologicznej. W artykule numer 6 zwrócono uwagę na potencjał odzysku wody odparowanej w wieży chłodniczej poprzez modyfikację aranżacji przepływu powietrza (rysunek 7(h)). Dokładna analiza możliwości odzysku wody umożliwiła opracowanie koncepcji technologii oczyszczania wody bazującej na nierównowadze termodynamicznej powietrza atmosferycznego.

Przedsiębiorstwa wodociągowe od dłuższego czasu poszukują nowych, bardziej efektywnych metod oczyszczania wody, który będzie w stanie pracować na surowcu o obniżonej jakości. Wynika to z ograniczenia dostępu do zasobów wodnych na skutek nasilającego się zjawiska suszy hydrologicznej. Ograniczenie zasobów wodnych oznacza konieczność zagospodarowania wody ze źródeł dotychczas niewykorzystywanych, które często charakteryzują się wysokim stopniem zanieczyszczenia (np. metalami ciężkimi, związkami organicznymi i mineralnymi). Tradycyjne techniki oczyszczania są w takich przypadkach niewystarczające do zapewnienia wymaganej jakości wody, natomiast alternatywne technologie (np. procesy membranowe) wiążą się z wysokimi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi. Obecnie najtańszym eksploatacyjnie rozwiązaniem są systemy membranowe wykorzystujące proces odwróconej osmozy (przetłaczanie wody przez membranę filtrującą pod wysokim ciśnieniem) oraz elektrodializy (wymuszanie ruchu jonów przez membranę za pomocą potencjału elektrycznego). Energochłonność obu wyżej wymienionych metod waha się w przedziale 3,5-5,0 kWh/m<sup>3</sup> oczyszczonej wody. Wartość ta jest bardzo wysoka w porównaniu z kosztem pozyskiwania surowca z niezanieczyszczonych ujęć, która wynosi od 0.2 do 1.2 kWh/m<sup>3</sup> oczyszczonej wody. Ponadto, zastosowanie metod membranowych jest problematyczne eksploatacyjnie przy współpracy z wysoko zanieczyszczonym surowcem: ze względu na bardzo duże stężenie zanieczyszczeń membrany półprzepuszczalne są znacznie częściej zatykane przez filtrowane cząstki, wymagają zatem większej częstotliwości serwisowania, co znacząco podwyższa koszty eksploatacji. Alternatywą dla membran jest proces destylacji poprzez odparowanie i kondensację, jednakże ta metoda cechuje się bardzo wysokim zużyciem energii (na poziomie 12 kWh/m<sup>3</sup> oczyszczonej wody). Tak wysoka energochłonność jest nie do zaakceptowania przez przedsiębiorstwa wodociągowe.

Proponowana technologia realizuje proces destylacji jednak bez konieczności doprowadzania wody do stanu wrzenia- wykorzystuje wyłącznie energię psychrometryczną do odparowania i kondensacji wilgoci. Proces ten realizowany jest w wymienniku ciepła, w którym połowa kanałów jest sucha, natomiast druga połowa jest zwilżona słoną/ zanieczyszczoną wodą. Woda zwilżająca ścianki odparowuje do przepływającego powietrza na takiej samej zasadzie jak w przypadku procesu wysychania ubrań czy ludzkiej skóry (im wyższa temperatura wody tym bardziej efektywne odparowanie). Parowanie wody powoduje pobranie energii ze strumienia powietrza przepływającego kanałem suchym, dzięki czemu strumień ten



ochładza się nie zmieniając swojej zawartości wilgoci. Na końcu kanału suchego następuje rozdzielanie powietrza: połowa nienawilżonego i ochłodzonego strumienia opuszcza wymiennik, a połowa zawracana jest do kanału mokrego, gdzie absorbuje ciepło oraz wilgoć. Dzięki takiemu układowi przepływów, uzyskiwana jest różnica potencjałów pozwalająca na efektywne oczyszczenie wody:

-strumień opuszczający kanał mokry jest gorący oraz nawilżony wodą odparowującą ze ścianki kanału (odparowana woda nie zawiera już soli)

-strumień opuszczający kanał suchy jest chłodny i nienawilżony

Gdy chłodne powietrze skontaktuje się z gorącym i nawilżonym następuje kondensacja cieczy, co pozwala na odzyskanie odsolonej, czystej wody, którą następnie można zawrócić do sieci. Kontakt umożliwiający kondensację odbywa się w drugim wymienniku ciepła. Całość procesu realizowana jest w kompaktowym urządzeniu składającym się dwóch wymienników (wymiennik I stopnia do odparowania wody oraz wymiennik II stopnia do kondensacji destylatu). Możliwe jest uzupełnienie układu o kolejne przyłączone szeregowo wymienniki umożliwiające kondensację (gdzie strumienie z poprzedniego wymiennika kierowane są do odwrotnej struktury kanałów- „suchy” strumień do mokrego kanału; „mokry” strumień do suchego kanału).

Na potrzeby badań opracowano pierwszy model matematyczny opisujący procesy zachodzące w trakcie oczyszczania wody metodą punktu rosy w układzie 2 i 3 stopniowym. Model został zwalidowany do danych eksperymentalnych uzyskanych przez Gas Technology Institute (Des Plaines, USA). Uzyskano satysfakcjonującą zgodność wyników modelu i eksperymentu. W artykule, dla 2- i 3-stopniowego systemu odsalania wyparnego (DPD ang. Dew-Point Desalinator), o zadanych wymiarach, wykonano analizy numeryczne dla różnych parametrów operacyjnych: zmiennego stosunku strumieni powietrza pomocniczego i głównego ( $G2/G1$ ) oraz zmiennego strumienia powietrza głównego ( $V1$ ). Dla różnych parametrów operacyjnych obliczono dwa podstawowe wskaźniki opisujące działanie systemu: wskaźnik SEC (ang. Specific Energy Consumption), opisujący zapotrzebowanie energii elektrycznej w odniesieniu do  $1\text{m}^3$  wody odsolonej, oraz wskaźnik DWP (ang. Daily Water Production), opisujący wydajność produkcji wody odsolonej w odniesieniu do  $1\text{m}^3/\text{s}$  powietrza wykorzystanego w procesie odsalania. Na podstawie przeprowadzonych analiz określono, że najkorzystniejsze parametry operacyjne systemu DPD, przy których osiągnięto najwyższe wartości wskaźników SEC i DWP, wynoszą:  $G2/G1 = 0.45$  oraz  $V1 = 4500\text{ m}^3/\text{h}$ .

Analizy numeryczne przeprowadzono także dla różnych parametrów powietrza zewnętrznego podawanego do systemu DPD (zmienna temperatura i zawartość wilgoci powietrza). Dla zmiennych parametrów powietrza określono dwa wskaźniki opisujące sposób wykorzystania energii cieplnej do celów odsalania w systemie DPD: wskaźnik GOR (ang. Gained Input Ratio), opisujący efektywność procesu kondensacji wody w odniesieniu do ciepła dostarczonego do systemu, oraz wskaźnik PR (ang. Performance Ratio), opisujący jaka część wody odparowanej odzyskiwana jest w procesie kondensacji. Należy podkreślić, że w przypadku „energii cieplnej” oraz „energii kondensacji” mowa jest o energii pobieranej i oddawanej przez strumień powietrza samoistnie w trakcie przepływu przez wymienniki o zadanej strukturze. Proponowany system nie wymaga dostarczenia dodatkowej energii cieplnej, jednakże można ją wykorzystać do podwyższenia jego wydajności.

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że dla szerokiego zakresu parametrów powietrza, średnie wartości wskaźnika  $GOR=0,64$ , a  $PR=0,88$  dla 2-stopniowego systemu DPD, a dla 3-stopniowego systemu DPD, wskaźniki te wynoszą odpowiednio 1,05 i 0,76. Wartości wskaźnika PR bliskie 1 oznaczają, że system jest w stanie oczyścić wysoki procent dostarczonej wody (dochodzący do 90%). W przypadku membranowych metod oczyszczania poziom ten wynosi ok. 0,5.

Po przeprowadzeniu analizy zastosowania systemu DPD dla różnych stref klimatycznych stwierdzono, że rozwiązanie może być stosowane w większości klimatów, umożliwiając odsalanie/oczyszczanie wody przy zapotrzebowaniu energii elektrycznej nie przekraczającym  $1,5\text{kWh/m}^3$  (wskaźnik SEC) i zapewniając produkcję wody odsolonej w zakresie od 0,2 do  $1,6\text{ m}^3/\text{h}/(\text{m}^3/\text{s})$  (wskaźnik DWP). Widoczne jest, że proponowane rozwiązanie jest w stanie oczyszczać surowiec przy zużyciu energii dwukrotnie niższym niż najlepsze obecnie stosowane metody (separacja membranowa osiąga wskaźnik SEC na poziomie  $3,0\text{ kWh/m}^3$  przy czystym surowcu), ponadto pozwala na pracę ze stabilną wydajnością w większości klimatów występujących na ziemi. Proponowana technologia jest zatem rozwiązaniem wysoce konkurencyjnym, które może stanowić skuteczną odpowiedź na zaistniałą lukę rynkową na systemy oczyszczające/ odsalające.

#### **Zestawienie najważniejszych ustaleń z cyklu publikacji:**

1. Opracowano oraz zweryfikowano eksperymentalnie koncepcję zwiększenia efektywności odzysku chłodu w systemach wentylacyjnych poprzez wykorzystanie nierównowagi termodynamicznej powietrza atmosferycznego.
  - a. Opracowano model matematyczny oraz wykonano analizę procesów wymiany ciepła i masy zachodzących w wymiennikach z obiegiem Maisotsenki w warunkach odzysku chłodu z powietrza wywiewanego z uwzględnieniem kondensacji pary wodnej z ochładzanego powietrza.
  - b. Opracowano oraz wykonano prototyp rozwiązania optymalnego dla polskich warunków klimatycznych (adaptacyjny wymiennik regeneracyjno-przeciwprądowy), który został zgłoszony do opatentowania.
  - c. Przeprowadzono cykl symulacji budynku z wykorzystaniem modeli empirycznych uzyskanych w ramach eksperymentu, które potwierdziły możliwość znaczącego obniżenia energochłonności systemów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych dzięki wykorzystaniu nowej technologii.
2. Opracowano dwie koncepcje autonomicznego systemu klimatyzacji wykorzystującego nierównowagę termodynamiczną powietrza atmosferycznego oraz osuszanie sorpcyjne przeznaczonego do pracy w polskich warunkach klimatycznych.
  - a. Pierwsza technologia została opracowana wspólnie z drem Jagidarem z EUT, oparta była na quasi-izotermicznym systemie osuszającym. Rozwiązanie jest jedną z pierwszych technologii adsorpcyjnych, pozwalających na kompensację zysków ciepła w pomieszczeniu, zapewniając komfortowe parametry wewnętrzne oraz pracując na źródle niskotemperaturowym ( $50^\circ\text{C}$ ).
  - b. Druga technologia to Wysokoefektywna Jednostka Wentylacyjno- Klimatyzacyjna. Jest to pierwszy autonomiczny adsorpcyjny system klimatyzacyjny, który jest w stanie

osiągnąć współczynnik COP termicznego na poziomie 4,5. Przy współpracy z niskotemperaturowymi pompami ciepła układ jest w stanie cechować się rzeczywistym COP na poziomie 20 (zatem nawet 5 krotnie większym od tradycyjnych systemów klimatyzacyjnych). Pozyskano środki na wykonanie komercyjnego prototypu rozwiązania.

3. Opracowano koncepcję nowej technologii wież chłodniczych wykorzystujących nierównowagę termodynamiczną powietrza atmosferycznego poprzez obieg Maisotsenki, cechujących się wyższą efektywnością niż tradycyjne technologie wież chłodniczych.
  - a. Opracowano model matematyczny opisujący przeciwprądową wieżę chłodniczą z M-obiegiem cechującą się nierówną długością kanału suchego oraz mokrego.
  - b. Przeanalizowano procesy wymiany ciepła i masy zachodzące w trakcie ochładzania wody za pomocą M-obiegu, wykazano ich charakterystyczne cechy.
  - c. Analiza pozwoliła na potwierdzenie, że technologia pozwala na ochładzanie cieczy poniżej temperatury termometru mokrego powietrza na wlocie do jednostki.
  - d. Wykazano przewagi nowej technologii nad rozwiązaniami tradycyjnymi- jednostka jest w stanie osiągać niższe temperatury chłodzonej wody przy tych samych gabarytach zewnętrznych co tradycyjna wieża chłodnicza.
  - e. Nakreślono kierunki dalszych badań niezbędne do przeprowadzenia przed wykonaniem komercyjnego prototypu. Prototyp jednostki zostanie wykonany w ramach projektu naukowego realizowanego wspólnie z University of Illinois (USA).
4. Przeanalizowano metodę odsalania/oczyszczania wody opartą na nierównowadze termodynamicznej powietrza atmosferycznego. Metoda wykorzystuje układ dwóch lub trzech szeregowo połączonych wymienników wyparnych w układzie naprzemiennie ułożonych kanałów suchych i mokrych i cechuje się bardzo niską energochłonnością.
  - a. Opracowano oryginalny model matematyczny opisujący proces oczyszczania cieczy w szeregowo ułożonych wymiennikach punktu rosy, przeprowadzono jego walidację do istniejących danych eksperymentalnych.
  - b. Wykazano, że proponowana technologia pozwala na ograniczenie zużycia energii na poziomie 50% w odniesieniu do najskuteczniejszych obecnie stosowanych metod (separacja membranowa). Wskaźnik zużycia energii SEC jest mniejszy lub równy 1,5 kWh/m<sup>3</sup> oczyszczonej wody.
  - c. Wykazano, że proponowana technologia pozwala na odzyskanie prawie 90% oczyszczonego surowca poprzez proces odparowania i kondensacji, co stanowi kolejną istotną wartość rynkową.
  - d. Potwierdzono, że proponowana jednostka uzyskuje wysoką efektywność oczyszczania cieczy w większości warunków klimatycznych (z wyłączeniem klimatów subarktycznych), zatem posiada szeroki potencjał wdrożeniowy w większości regionów świata, w tym najbardziej dotkniętych deficytem wody słodkiej.

## **V. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej w szczególności zagranicznej.**

Niżej omówiłem moje zainteresowania i osiągnięcia naukowe z odwołaniami do podanego w załączniku nr 4 wykazu dorobku naukowego.

## Okres przed uzyskaniem stopnia doktora (2011–2016)

W okresie przed uzyskaniem stopnia doktora moje zainteresowania naukowe obejmowały następujące tematy:

1. Modelowanie matematyczne wymienników wyparnych.
2. Modelowanie matematyczne obiegu Maisotsenki.
3. Optymalizacja strukturalna wymienników ciepła.
4. Ochrona antyzamrożeniowa wymienników do odzysku ciepła.
5. Podwyższanie efektywności energetycznej budynków.

AD. 1. W trakcie prac nad doktoratem zajmowałem się przede wszystkim teoretyczną analizą pośredniego chłodzenia wyparnego w celu opracowania precyzyjnego modelu matematycznego opisującego perforowany, krzyżowy wymiennik z obiegiem Maisotsenki (co było tematem mojej rozprawy doktorskiej). W ramach prac wstępnych skupiono się nad stworzeniem modeli matematycznych „klasycznych” wymienników wyparnych operujących wyłącznie na powietrzu zewnętrznym, tj. jednostki współprądowej, przeciwprądowej, krzyżowej oraz regeneracyjnej (Załącz. 4. II.2.1.1. Poz. 4,5,10). Badania przeprowadzono w celu ustalenia podstawowych zależności cechujących procesy wymiany ciepła i masy w pośrednich wymiennikach wyparnych oraz w celu opracowania prawidłowych założeń dla modelu matematycznego wymiennika z M-obiegiem. Symulacje prowadzono na podstawie modeli matematycznych, zwalidowanych do danych eksperymentalnych dostępnych w literaturze. Ustalono, że w przypadku wymienników: przeciwprądowego, krzyżowego i regeneracyjnego wewnątrz kanału mokrego wytwarzają się dwie strefy aktywnej wymiany ciepła i masy, które nie występują w przypadku jednostki współprądowej. Przeprowadzono także analizę zachowania zasady Lewisa w analizowanych wymiennikach. Stwierdzono, że w przypadku jednostek charakteryzujących się dwoma aktywnymi strefami wymiany ciepła i masy zachodzi naruszenie zasady Lewisa ( $Le \neq 1,0$ ). W związku z tym założono, że model matematyczny wymiennika z M-obiegiem musi uwzględniać fakt występowania dwóch aktywnych stref wymiany ciepła i masy w kanale pomocniczym oraz możliwość naruszenia zasady Lewisa. Wymagane jest zatem określenie współczynnika wymiany masy  $\beta$  niezależnie od współczynnika wnikania ciepła  $\alpha$  i ustalenia wielkości liczby Lewisa, która będzie odgrywać rolę poprawki w przypadku gdy zasada Lewisa zostanie naruszona. Poprawka została wprowadzona za pomocą procedury iteracyjnej.

AD. 2. Tematem mojej rozprawy doktorskiej było modelowanie procesów wymiany ciepła i masy w krzyżowym, perforowanym wymienniku z M-obiegiem stosowanym w instalacjach klimatyzacyjnych. Model matematyczny wymiennika został opracowany zgodnie z modelem jednowymiarowego przenoszenia ( $\epsilon$ -NTU), w którym procesy transferu obrazowane są równaniami różniczkowymi bilansu masy i ciepła, zestawianych dla poszczególnych strumieni powietrza. Ponadto model został uzupełniony o niestandardowy algorytm umożliwiający zobrazowanie procesu mieszania się strumieni powietrza w kanale mokrym z powodu zastosowanej perforacji. Na potrzeby pracy doktorskiej opracowano dwa algorytmy: jeden opisujący warunki idealne- bardzo gęstą i równomierną perforację w części wstępnej- mieszanie w każdym kroku całkowania (pozycja (Załącz. 4.

II.2.1.1. Poz. 12) zaproponowany przez promotora rozprawy oraz algorytm realistyczny, nazwany Uniwersalną Metodą Sekcji- mieszanie poza procesem całkowania równań różniczkowych będący moim autorskim pomysłem (Załącznik 4. II.2.1.1. Poz. 7). Zasadniczą przewagą drugiej metody była możliwość oddania rzeczywistego kształtu wymiennika oraz możliwość przeanalizowania wpływu układu perforacji kanału na sprawność urządzenia. Walidację modelu przeprowadzono na stanowisku pomiarowym udostępnionym przez producenta krzyżowych wymienników z M-obiegiem- korporację Coolerado Inc., gdzie odbyłem staż w 2013 roku (Załącznik 4. II.7.1. Poz. 5). Stanowisko zlokalizowane było w zakładach produkcyjnych przedsiębiorstwa w Denver (stan Kolorado) w USA. Walidacja potwierdziła, że opracowany model pozwala na skuteczne odwzorowanie pracy wymiennika. Maksymalne rozbieżności w uzyskanych temperaturach nawiewu wynosiły ok. 0.5°C (niedokładność na poziomie 4%), średnie rozbieżności nie przekraczały 0.2°C (Załącznik 4. II.2.1.1. Poz. 14). Na podstawie zwalidowanego modelu przeprowadzono szereg analiz dotyczących struktury wymiennika oraz porównano jego efektywność z innymi rozwiązaniami (Załącznik 4. II.2.1.1. Poz. 1-14). Opracowałem także własną propozycję aranżacji krzyżowej jednostki z M-obiegiem, którą następnie opatentowano (Załącznik 4. III.3.1. Poz. 1).

AD. 3. W ramach badań nowych technologiami wyparnych podjąłem prace nad optymalizacją strukturalną wymienników ciepła, w celu stworzenia narzędzia pozwalającego na opracowanie najbardziej efektywnych rozwiązań dla polskich warunków klimatycznych. Zdecydowałem się na wykorzystanie wielokryterialnej optymalizacji z wykorzystaniem funkcji celu Harringtona  $D$ , która równa jest iloczynowi wybranych wskaźników efektywności (sprowadzonych do postaci bezwymiarowej) podniesionych do potęgi współczynników wagowych. Wskaźniki efektywności przekształca się do postaci bezwymiarowej na podstawie przekształcenia liniowego z wykorzystaniem przyporządkowania do krzywej Gomperta. Bardzo istotnym zagadnieniem procesu optymalizacji była kwestia doboru współczynników wagowych dla bezwymiarowych wskaźników efektywności. W wielu opracowaniach dobór współczynników wagowych odbywa się na podstawie opinii ekspertów opracowanych metodą stochastycznej kwalimetrii. Jednakże to metoda nie zawsze jest skuteczna, szczególnie w przypadku gdy wielu ekspertów podaje sprzeczne opinie. Z tego powodu na potrzeby niniejszego opracowania posłużono się inną metodą, opierającą się na doborze współczynników wagowych, z obszaru, w którym ich ewentualna zmiana ma o minimalny wpływ na wartość funkcji Harringtona. Wykorzystując opisaną wyżej metodę przeprowadziłem pełną optymalizację krzyżowego wymiennika z obiegiem Maisotsenki dla polskich warunków klimatycznych oraz określiłem strefy jego racjonalnego zastosowania. Wyniki badań zostały przedstawione w publikacji *Numerical study and optimization of the cross-flow Maisotsenko cycle indirect evaporative air cooler* (Załącznik 4. II.2.1.1. Poz. 1).

AD. 4. Prace nad zastosowaniem wymienników wyparnych w polskich warunkach klimatycznych wymagają także analizy ich pracy w okresie zimowym. Z tego względu rozpoczęto badania nad kwestią możliwości formowania się szronu w wymiennikach do odzysku ciepła podczas występowania niskich temperatur zewnętrznych. Wspólnie z prof. Sergeyem Anisimovem oraz drem Andrzejem Jedlikowskim z Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej przeprowadziłem analizę formowania się szronu w krzyżowym i przeciwprądowym wymienniku do odzysku ciepła (Załącznik 4. II.2.1.1. Poz. 3,6 oraz II.2.1.2. Poz. 1,2). Przeprowadzone badania pozwoliły na

określenie temperatur progowych, które pozwalają na bezpieczną pracę wymiennika w zależności od parametrów powietrza wywiewanego z pomieszczenia (temperatury i wilgotności) oraz sprawności temperaturowej wymiennika. Przedstawiono także analizę możliwości ochrony rekuperatorów za pomocą by-passu oraz nagrzewnic wstępnych. Stwierdzono, że w wielu przypadkach by-pass nie stanowi skutecznego zabezpieczenia przed formowaniem się szronu (w niektórych przypadkach zawrócenie nawet 95% powietrza do obejścia nie było w stanie zapobiec zamarzaniu wymiennika). Przeprowadzono także analizę pracy krzyżowego wymiennika wyparnego w okresie całorocznym, z uwzględnieniem pracy w okresie ciepłym oraz zimowym (Zał. 4. II.2.1.1. Poz. 3). Opisano charakterystyczne procesy wymiany ciepła i masy zachodzące w wymienniku w różnych warunkach pracy oraz wykazano potencjalne oszczędności energetyczne wynikające z jego zastosowania. Wyniki pracy pozwoliły skierować badania prowadzone po uzyskaniu stopnia doktora na tematykę podwyższania efektywności odzysku chłodu w wentylacji i klimatyzacji. Ze względu na wysoką wartość uzyskanych wyników rozpowszechniono ją także w pismach popularnonaukowych oraz w polskojęzycznej literaturze fachowej (Zał. 4. II.2.1.2. Poz. 1,2). Wyniki zostały zaprezentowane min. podczas największego w Polsce wydarzenia branży wentylacji i klimatyzacji- konferencji oraz targów Forum Wentylacja- Salon Klimatyzacja (Zał. 4. II.4.1.2. Poz. 1,2).

AD. 5. Oprócz ww. prac zajmowałem się także rozwiązaniami podwyższającymi efektywność energetyczną budynków, w tym projektowaniem oraz nadzorem autorskim nad wykonaniem instalacji sanitarnych. W okresie studiów doktoranckich wykonałem kilkanaście projektów instalacji, charakterystyk i certyfikatów energetycznych oraz planów termomodernizacyjnych dla obiektów w Polsce oraz na terenie Unii Europejskiej. Poniżej przedstawiono przykładowe prace. Jednym z ważniejszych osiągnięć jest opracowanie audytu energetycznego oraz planu pełnej termomodernizacji dla hotelu GEM we Wrocławiu (Zał. 4. II.3.1. Poz. 1). Opracowane rozwiązania pozwoliły na zmniejszenie energochłonności obiektów o ponad 50%, ponadto wyliczenia finansowe i energetyczne obliczone na etapie audytu pokryły się z wynikami praktycznymi uzyskanymi na obiekcie niemalże w 100%. Innym przykładem efektywnej termomodernizacji był audyt energetyczny oraz projekt termomodernizacji dla obiektu Kono-teatr Zbyszek w Dzierżoniowie (Zał. 4. II.3.1. Poz. 5). Zaproponowano innowacyjny system wentylacji wyporowej prowadzonej kanałami podziemnymi oraz układ pomp ciepła powietrze-woda, pozwalających na obniżenie energochłonności obiektu o ok. 60%. Opracowałem także wiele rozwiązań dla obiektów nowopowstających, przykładem może być Galeria Grabiszyńska we Wrocławiu (Zał. 4. II.3.1. Poz. 2). Dla tego obiektu został opracowany dedykowany układ grzewczo- chłodzący wykorzystujący agregaty freonowe chłodzone i ogrzewane cieczą. Jako źródło ciepła wykorzystany został obieg powrotny nagrzewnic w centralach wentylacyjnych (zasilanych z węzła cieplnego). Do chłodzenia czynnika technologicznego wykorzystywana została pośrednia zraszana wieża chłodnicza z możliwością częściowego zraszania wymiennika ciepła. Rozwiązanie pozwoliło utrzymać w okresie całorocznym COP agregatów na poziomie większym od 5,0 jednocześnie zapewniając precyzyjną regulację temperatury w budynku. Innym rodzajem zagadnień podejmowanych w okresie studiów doktoranckich jest adaptacja istniejących obiektów pod nowe przeznaczenie- przykładem może być adaptacja istniejącego budynku przy ul. Borowskiej we Wrocławiu na potrzeby kliniki ginekologicznej Medfemina (Zał. 4. II.3.1. Poz. 7). Ze względu na istniejącą zabudowę oraz specjalistyczne przeznaczenie, osiągnięcie niskiej energochłonności obiektu wymagało zastosowania

rozwiązań niestandardowych. Zasadniczym problemem projektowym była niewielka powierzchnia maszynowni obsługującej pomieszczenia bloku operacyjnego oraz sali cięć cesarskich. Niewielkie rozmiary maszynowni oraz duża ilość kanałów wentylacyjnych (oraz innych instalacji np. ciepła technologicznego) uniemożliwiały zastosowanie standardowych central klimatyzacyjnych, dlatego wykorzystane zostały szafy higieniczne klimatyzacji precyzyjnej typu MCK-SKH. Pionowa konstrukcja szaf umożliwia ich zabudowę w wąskim pomieszczeniu. Wyposażenie jednostek umożliwiało pełną obróbkę ciepłno-wilgotnościową powietrza wewnątrz jednego urządzenia. W celu umożliwienia korzystniejszego rozprowadzenia przewodów, centrale zostały posadowione w niewielkich zagłębieniach w posadzce. Zastosowano dedykowany, rekuperacyjny układ odzysku ciepła oraz odzysk chłodu na pompie ciepła, w celu zminimalizowania energochłonności systemu. Zastosowano także dedykowany układ kształtek, kulis tłumiących oraz zabezpieczeń p.poż. w celu zminimalizowania energochłonności przy zapewnieniu precyzyjnych warunków termicznych na potrzeby sal operacyjnych. Ze względu na dużą ilość niestandardowych rozwiązań zastosowanych w ramach jednego obiektu medycznego opis projektu oraz jego realizacji został opublikowany w prasie branżowej (Załącznik 4. II.2.1.3. Poz. 1).

### **Okres po uzyskaniu stopnia doktora (2016–2020)**

Po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem wszystkie rozpoczęte już wcześniej tematy badawcze (1- 5), a także podjąłem nowe problemy dotyczące tematów (6–12), tj.:

6. Innowacyjne absorpcyjne systemy klimatyzacyjne.
7. Innowacyjne technologie adsorpcyjne
8. Nowe technologie wież chłodniczych.
9. Nowe technologie wymienników wyparnych.
10. Wykorzystanie technologii wyparnych od odsalania/oczyszczania wody.
11. Podwyższanie efektywności systemów ogrzewania i wentylacji.
12. Zintegrowane systemy budynku niskoenergetycznego.

AD. 6. W latach 2016-2018 pracowałem nad absorpcyjnymi agregatami chłodniczymi w ramach projektu Novel Microemulsion Absorption Systems For Supplemental Power Plant Cooling” finansowanym przez agencję ARPA-E w USA (Załącznik 4. II.6.2.1. Poz. 7). Projekt realizowany był przez konsorcjum pod kierownictwem prof. Bao Yanga z University of Maryland, byłem członkiem zespołu Texas A&M University, który odpowiadał za optymalizację procesu wymiany ciepła i masy na potrzeby projektu. W ramach opracowałem pierwszy na świecie model matematyczny opisujący agregat wykorzystujący mikroemulsję jako czynnik chłodniczy. Rozwiązanie to pozwalało na wyeliminowanie skraplacza z układu chłodniczego (czynnik chłodniczy wydzieliał się z sorbentu w postaci ciekłej podczas procesu desorpcji). Z racji, że tego typu sorbent nigdy wcześniej nie był stosowany, nie było żadnego opisu matematycznego pozwalającego na jego modelowanie. Dodatkowym utrudnieniem był fakt, że do konstrukcji absorbera wykorzystano układ wirującego dysku, a przy konstrukcji desorbera zastosowano układ pola elektrostatycznego usprawniającego proces desorpcji- powodowało to dodatkowe komplikacje zagadnienia. Po intensywnej pracy teoretycznej i eksperymentalnej udało się opracować model, który następnie został poddany

weryfikacji. Model został zweryfikowany na prototypie urządzenia uzyskując bardzo wysoką zgodność z danymi pomiarowymi. W dalszych pracach model został użyty do optymalizacji jednostki.

AD. 7. Oprócz prac opisanych w punkcie III, analizowałem wiele innych wyparnych systemów klimatyzacyjnych, w tym: analizę możliwości aranżacji krzyżowego wymiennika z obiegiem Maisotsenki w systemach adsorpcyjnych (Załącznik 4. II.2.2.1. Poz. 7), porównanie systemów adsorpcyjnych z hybrydowymi układami klimatyzacyjnymi (Załącznik 4. II.2.2.1. Poz. 8), przeprowadzono także analizę pracy systemu sorpcyjnego w polskich warunkach klimatycznych (Załącznik 4. II.4.2.1.2. Poz. 4). W ramach grantu Iuventus Plus (Załącznik 4. II.6.2.1. Poz. 5) opracowałem stanowisko pomiarowe pozwalające na testy różnych aranżacji systemów wyparnych współpracujących z rotorem sorpcyjnym (ze wsparciem środków wydziałowych). Stanowisko zostało rozbudowane w ramach grantu Lider X (Załącznik 4. II.6.2.2. Poz. 1) w sposób pozwalający na testy dwustopniowego systemu sorpcyjnego opisanego w Publikacji 6 w punkcie III. W 2019 roku opracowałem model matematyczny rotora sorpcyjnego wykorzystującego sorbent CAU-10 MOF (Załącznik 4. III.5.1. Poz. 4) na potrzeby amerykańskiej korporacji Mutners we współpracy z prof. Williamem Workiem z Argonne National Laboratory. Korporacja Mutners jest największym światowym producentem sorpcyjnych osuszaczy powietrza. Sorbent cechował się unikalną izotermą sorpcji typu V, która pozwalała utrzymać wysoki potencjał wymiany masy przy wysokim stopniu nasycenia materiału sorpcyjnego. Do opracowania modelu wykorzystano przybliżenie izotermy za pomocą wielomianu 4 rzędu z uwzględnieniem wykładniczej zmiany przy nasyceniu sorbentu z 15 do 25%. Przeprowadzono walidację modelu do danych eksperymentalnych i uzyskano wysoką zgodność z eksperymentem (rozbieżność w uzyskanym stopniu osuszania na poziomie 0.2 g/kg). Model został wykorzystany do optymalizacji do optymalizacji rotora na potrzeby usuwania z powietrza lotnych związków organicznych.

Oprócz wykorzystania technik adsorpcyjnych na potrzeby klimatyzacji prowadziłem także prace nad ich zastosowaniem do składowania gazu ziemnego. W trakcie pracy na Texas A&M University współpracowałem z korporacją Energ-Tek w celu opracowania systemu usuwania ciepła adsorpcji ze zbiornika gazu ziemnego wykorzystującego skorupy orzechów kokosowych jako sorbent (Załącznik 4. II.6.2.1. Poz. 4). Celem pracy było skrócenie czasu ładowania zbiornika, co umożliwiłoby jego szerszą aplikację w miejsce standardowych, wysokociśnieniowych zbiorników gazu. W ramach prac pod kierownictwem prof. Williama Worka opracowałem model matematyczny zbiornika oraz projekt systemu usuwającego ciepło sorpcji, który wykorzystywał układ rurek wewnątrz zbiornika, przez które przepływał magazynowany gaz, który usuwał ciepło sorpcji podnosząc swoją temperaturę. Następnie strumień gazu ziemnego prowadzony był przez wymiennik ciepła na zewnątrz zbiornika, gdzie obniżał swoją temperaturę przez kontakt z powietrzem zewnętrznym, po czym był kierowany do wnętrza zbiornika i tam adsorbowany.

W 2019 roku przez 3 miesiące byłem członkiem zespołu badawczego projektu *Budowa pilotażowej stacji dokującej, jako elementu systemu dystrybucji LNG w oparciu o kriogeniczne kontenery zbiornikowe* (Załącznik 4. II.6.2.1. Poz. 1). W ramach swoich obowiązków zajmowałem się testami eksperymentalnymi laboratoryjnego prototypu kriogenicznego zbiornika gazu ziemnego chłodzonego ciekłym azotem. Ze względu na inne zobowiązania zawodowe (rozpoczęcie projektu Lider X, którego jestem kierownikiem) zostałem zmuszony do zrezygnowania z dalszych prac w ramach projektu.



AD. 8. Oprócz prac opisanych w punkcie III opracowałem pełną koncepcję technologiczną wieży chłodniczej punktu rosy. Prototyp rozwiązania zostanie wykonany w trakcie projektu *Superefficient cooling tower* realizowanym wspólnie z University of Illinois oraz Argonne National Laboratory w USA (Załącznik 4. II.6.2.1. Poz. 3). Swoje badania nad technologiami wież chłodniczych prezentowałem wielokrotnie podczas konferencji międzynarodowych, w tym jako keynote speaker (Załącznik 4. II.4.2.1.1. Poz. 1-4) oraz standardowy referent (Załącznik 4. II.4.2.1.2. Poz. 1). Opracowałem także technologię dwustopniowej wieży chłodniczej bezpośredniej (Załącznik 4. III.1.1. Poz. 2). Podstawową koncepcję technologii opracowałem wspólnie z prof. Sergeyem Anisimovem z Politechniki Wrocławskiej w trakcie studiów doktoranckich, technologia została zgłoszona do opatentowania w 2014 roku. Rozwiązanie udoskonaliłem i rozwinąłem po obronieniu doktoratu. Technologia uzyskała polski patent numer 226991 w 2016 roku (Załącznik 4. III.3.1. Poz. 2). Podstawowe rozwiązanie wykorzystuje wielostopniowy układ powietrzny (połączenie przepływu współprądowego i przeciwprądowego) umożliwiające osiąganie temperatur o około 10% niższych niż w przypadku typowych wież chłodniczych. W 2016 roku dzięki wykorzystaniu modelowania matematycznego zmodyfikowałem aranżację przepływu na schemat krzyżowo- przeciwprądowy oraz opracowałem technologię karbowanego wypełnienia wymiennika ciepła (Załącznik 4. III.1.2. Poz. 12), które poprawia dystrybucję cieczy i powietrza. Nowe rozwiązanie pozwala uzyskać temperatury niższe o 20% w stosunku do tradycyjnych wież bezpośrednich.

AD. 9. Oprócz prac przedstawionych w punkcie III prowadziłem prace badawcze nad innymi zaawansowanymi technologiami wyparnymi. Przeprowadziłem analizę złożonych, wielostopniowych cykli wyparnych dla różnych warunków operacyjnych (Załącznik 4. II.2.2.1. Poz. 6), wykonałem analizę potencjału oszczędności energetycznych wynikających z zastosowania wymienników wyparnych w polskich warunkach klimatycznych w wentylacji mieszającej i wyporowej (Załącznik 4. II.2.2.1. Poz. 2) oraz analizę potencjału zastosowania jednostek z M-obiegiem do odzysku chłodu w przypadku braku występowania kondensacji wilgoci w kanałach jednostki (Załącznik 4. II.2.2.1. Poz. 3). Ponadto, wykonałem wstępne badania dotyczące zastosowania rekuperatorów wyparnych do odzysku chłodu w systemach wentylacyjnych na przykładzie prostych jednostek krzyżowych oraz przeciwprądowych (Załącznik 4. II.2.2.1. Poz. 1,5).

W latach 2016-2018 prowadziłem projekt na potrzeby korporacji *Aurae Cooling Technologies Limited* w Hong Kongu. Celem projektu było opracowanie pilotażowego systemu do odzysku chłodu w klimacie wybitnie wilgotnym Azji Południowo-Wschodniej (Załącznik 4. III.1.2. Poz. 2). W trakcie projektu opracowano oraz wykonano pilotażową instalację pracującą równolegle z klasycznym systemem klimatyzacyjnym (systemy chłodziły dwa identyczne pomieszczenia). Uzyskano oszczędności energetyczne dochodzące do 70%, udało się także potwierdzić możliwość odzysku wody na potrzeby parowania z kondensatu powstałego w kanałach powietrza zewnętrznego- poziom odzysku cieczy dochodził do 90%. Rozwiązania technologiczne opracowane na potrzeby firmy zostały zgłoszone do opatentowania- pozycje (Załącznik 4. III.3.2. Poz. 2,3).

Nad nowymi technologiami wyparnymi pracowałem także w ramach projektu *Quasi-zeroenergetic air conditioning system utilizing the phenomenon of Maisotsenko cycle* realizowanego wspólnie z University of Illinois (Załącznik 4. II.6.2.1. Poz. 2) oraz grantu *Iuventus Plus* finansowanym przez MNiSW (Załącznik 4. II.6.2.1. Poz. 5). W trakcie realizacji projektu na University of Illinois *Quasi-zeroenergetic air conditioning system utilizing the phenomenon of Maisotsenko cycle* opracowałem technologię

niezależnego systemu chłodniczego wykorzystującego chłodzenie wyparne oraz membranowy system usuwania wilgoci na potrzeby korporacji Baryon Inc (Zał. 4. III.1.2. Poz. 9). Rozwiązanie stanowi autonomiczny układ klimatyzacyjny pozwalający na niskoenergetyczne chłodzenie powietrza w warunkach klimatycznych południa Stanów Zjednoczonych. Rozpoczęto pracę nad wykonaniem prototypu rozwiązania, złożono także wniosek o grant BENEFIT 2020 z amerykańskiego Departamentu Energii, w skład zespołu, oprócz Baryon Inc. i University of Illinois wchodzi Oak Ridge National Laboratory, Argonne National Laboratory oraz koncern Xergy Inc. będący jednym z liderów amerykańskiego rynku w produkcji membran półprzepuszczalnych. Rozstrzygnięcie konkursu nastąpi w czerwcu 2021 roku.

AD. 10. Oprócz prac przedstawionych w punkcie III potencjał wykorzystania chłodzenia punktu rosy do odsalania i oczyszczania wody był prezentowany przeze mnie kilkakrotnie na konferencjach międzynarodowych (Zał. 4. II.4.2.1.1. Poz. 1-4). W 2020 roku technologią zainteresowało się Wrocławskie Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji (MPWiK), które od dłuższego czasu poszukuje rozwiązania pozwalającego na efektywne oczyszczanie wody o wysokim stopniu zanieczyszczenia (np. z rzeki Odry). W czerwcu 2020 roku został złożony wniosek do programu Projekty Aplikacyjne NCBR wspólnie z MPWiK Wrocław oraz Uniwersytetem Przyrodniczym we Wrocławiu. Celem prac jest opracowanie praktycznego rozwiązania i wdrożenie go na potrzeby MPWiK. W przypadku uzyskania dofinansowania obejmę funkcję kierownika B+R projektu. Technologią odsalania wody zainteresował się także koncern KGHM Polska Miedź S.A. Wykonałem ekspertyzę na potrzeby przedsiębiorstwa o możliwości wykorzystania technologii na potrzeby odsalania wody kopalnianej o wysokim stopniu zasolenia (ok. 200 kg/m<sup>3</sup>). Analiza potwierdziła możliwość zastosowania odsalania metodą punktu rosy do stworzenia niskoenergetycznego systemu oczyszczającego wodę w kopalniach (Zał. 4. III.5.1. Poz. 3). Planowane jest wspólne aplikowanie o finansowanie projektu w ramach programów europejskich.

AD. 11. W swojej pracy badawczej duży nacisk kładę na opracowywanie praktycznych rozwiązań mających zastosowanie dla krajowych i zagranicznych przedsiębiorstw. Jednym z głównych kierunków moich prac jest podwyższanie efektywności systemów grzewczych i wentylacyjnych. Na potrzeby przemysłu i budownictwa Od 2018 roku jestem stałym konsultantem technologicznym firmy SciTeeX sp. z o.o. z Warszawy, która jest jednym z liderów sprzedaży zaawansowanych maszyn przemysłowych na arenie międzynarodowej (w tym kabin lakierniczych, komór śrutowniczych, oczyszczarek wirnikowych oraz pieców wygrzewczych). Opracowałem szereg rozwiązań podwyższających jakość produktów oferowanych przez przedsiębiorstwo, w tym: glikolowe układy zabezpieczenia przed zamrażaniem wymienników do odzysku ciepła dla przemysłowych kabin lakierniczych, kierownicowy system dystrybucji powietrza dla plenum w kabinach lakierniczych (Zał. 4. III.4.1. Poz. 3), przeprowadziłem optymalizację nagrzewnic powietrze- spaliny na potrzeby pieców wygrzewczych oraz opracowałem modele matematyczne kluczowych elementów układu obróbki cieplno- wilgotnościowej dla kabin lakierniczych. W 2020 roku rozpoczęliśmy wspólny projekt w celu stworzenia uniwersalnego modelu matematycznego dystrybucji powietrza w urządzeniach SciTeeX. Od października 2020 roku realizuję także wspólny projekt z jednym z liderów wśród przedsiębiorstw instalacyjnych na Dolnym Śląsku- firmą Sys-Term sp. z o.o. (dwukrotny laureat nagrody Gazeli Biznesu). Celem projektu (Zał. 4. II.6.2.2. Poz. 2) jest zwiększenie potencjału

rynkowego przedsiębiorstwa poprzez wprowadzenie zaawansowanych metod projektowo-symulacyjnych, które znacząco podwyższą jakości instalacji wykonywanych przez przedsiębiorstwo. Proponowane rozwiązania zostaną wykorzystane do zwiększenia energooszczędności systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji wykonywanych przez firmę oraz na wprowadzenie do nich rozwiązań bazujących na energii odnawialnej w sposób uzasadniony ekonomicznie. Wprowadzenie nowych, energooszczędnych rozwiązań do oferty firmy pozwoli znacznie rozszerzyć jej potencjał rynkowy.

W 2018 roku przeprowadziłem analizę możliwości stworzenia niskoenergetycznego systemu chłodzenia serwerowni na potrzeby kopalni kryptowalut dla Singapurskiej spółki ICM Capital (Zał. 4. III.5.1. Poz. 5). W ramach analizy zaproponowałem innowacyjne rozwiązanie polegające na zanurzeniowym chłodzeniu serwerów z wykorzystaniem oleju mineralnego jako czynnika chłodniczego. Do odbioru ciepła zaproponowano spiralne wymienniki gruntowe zlokalizowane pod budynkiem serwerowni. Rozwiązanie pozwoliło na chłodzenie serwerowni minimalnym kosztem (oszczędności w stosunku do klasycznych metod chłodzenia na poziomie 80%) przy relatywnie niskich nakładach inwestycyjnych (spiralne wymienniki gruntowe pozwalają na znaczące zmniejszenie głębokości wymaganego wykopu).

AD. 12. W ramach prac badawczych zajmuję się także zintegrowanymi systemami niskoenergetycznych oraz inteligentnych budynków. Prace obejmują optymalizację oraz dobór rozwiązań na potrzeby instalacji ogrzewania, wentylacji, klimatyzacji, ciepłej wody użytkowej (CWU) oraz instalacji elektrycznej wraz z systemami sterowania w celu stworzenia układów o minimalnym zużyciu energii. W 2020 roku przeprowadziłem ekspertyzę, wspólnie z zespołem Katedry Wiertnictwa i Geoinżynierii Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie na potrzeby KGHM Polska Miedź S.A. sprawdzającą możliwości wykorzystania otworów mroźniowych zlokalizowanych przy szybie GG-1, jako generatora ciepła i chłodu, wykorzystywanego do celów związanych z bieżącym funkcjonowaniem obiektów przyszybowych (Zał. 4. III.5.1. Poz. 1). Szyb GG-1 zlokalizowany jest w środkowej części obszaru górniczego „Głogów Głęboki - Przemysłowy” w granicach obrębu wsi Kwielice, w gminie Grębocice. Szyb GG-1 został zagłębiony w górotworze poddanemu procesowi zamrożenia. Pozostałością po tym procesie są otwory mroźniowe, równomiernie rozmieszczone na kręgu. Celem prac było wykorzystanie otworów mroźniowych jako źródła ciepła i chłodu dla obiektów przyszybowych. Wydajność grzewcza i chłodnicza źródła została określona na podstawie symulacji gruntu z wykorzystaniem oprogramowania BoHEX. Stwierdzono, że wydajność źródła jest wystarczająca do całkowitego pokrycia zapotrzebowania na ciepło (CO+ CWU+ wentylacja) oraz chłód budynku warsztatów przyszybowych. Zaplanowano współpracę układu dolnego źródła w otworach mroźniowych z pompami ciepła solanka- woda zlokalizowanymi na terenie obiektu. Opracowano także pełną koncepcję technologiczną wprowadzenia sond do otworów mroźniowych. Analizy symulacyjne wykazały, że wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię pierwotną był bliski 50 kWh/m<sup>2</sup>/rok, czyli standardu budynku niskoenergetycznego. Była to wartość prawie dwukrotnie niższa niż minimalne wymagania dla nowo budowanego budynku (od 2020 roku 90 kWh/m<sup>2</sup>/rok).

W latach 2018-2019 zrealizowałem projekt z wrocławską firmą EVS Ewa Bartczak (Zał. 4. II.6.2.1. Poz. 3). Celem projektu było uczynienie przedsiębiorstwa jednym z lokalnych liderów rynkowych, który oferuje indywidualne rozwiązania energooszczędne z wykorzystaniem dedykowanego modelu

biznesowego dla modernizowanych obiektów ze szczególnym uwzględnieniem rozwiązań automatyki dla inteligentnego budynku. Nowy model biznesowy wykorzystuje powszechnie stosowaną min. w Azji i USA koncepcji ESCO (Energy Savings Company). Koncepcja ta bazuje na poniesieniu większości kosztów inwestycyjnych przez przedsiębiorstwo wykonawcze, którego zysk osiągany jest poprzez podział środków uzyskanych z oszczędności energetycznych w uzgodnionym okresie czasowym. W ramach projektu opracowywałem dla przedsiębiorstwa algorytmy dla indywidualnych systemów automatyki, w tym adaptacyjny algorytm sterowania systemem odzysku ciepła (Zał. 4. III.4.1. Poz. 2), który został wdrożony na obiekcie rzeczywistym. Prowadziłem także symulacje budynków na potrzeby implementacji modelu ESCO. Symulacje i praca algorytmów zostały zweryfikowane na rzeczywistych obiektach (min. instalacja chłodzenia serwerowni na potrzeby KGHM Polska Miedź, gabinetów lekarskich we Wrocławiu oraz hali logistycznej Trans-Dan). Efektem projektu było wprowadzenie nowego modelu biznesowego na potrzeby firmy.

Od 2020 roku rozpocząłem współpracę z tureckim producentem paneli fotowoltaicznych Solimpeks Co. oraz z Necmettin Erbakan Üniversitesi w Konya w Turcji. Wspólnie stworzyliśmy koncepcję egzoenergetycznej solarnej jednostki chłodniczej (Zał. 4. III.1.2. Poz. 7). Egzoenergetyczność jednostki oznacza, że wytwarzając energię chłodniczą na potrzeby klimatyzacji urządzenie generuje więcej energii elektrycznej niż zużywane jest na potrzeby wytworzenia chłodu- nadwyżka wyprodukowanej energii elektrycznej przeznaczona jest na zasilenie innych urządzeń w budynku, bądź oddana do sieci energetycznej. Ponadto, urządzenie generuje ciepło na potrzeby podgrzewania ciepłej wody użytkowej. System utrzymuje charakterystykę egzoenergetyczną zarówno w klimacie umiarkowanym (Polska) jak i śródziemnomorskim (Turcja). Rozwiązanie opiera się na metodzie wykorzystującej sorpcyjno-wyparnej urządzenie chłodnicze współpracujące z panelami fotowoltaicznymi chłodzonymi ciecżą. System docelowo dedykowany jest dla jednorodzinnych obiektów mieszkalnych, jednakże w przyszłości może także być stosowany w obiektach wielorodzinnych oraz użyteczności publicznej. Złożone zostały dwa wnioski o dofinansowanie budowy prototypu (program polsko-turecki NCBR oraz grant EuroStars).

## **VI. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.**

W latach 2017-2019 byłem promotorem pomocniczym dwóch doktorantek: mgr inż. Anny Pacak oraz mgr inż. Aleksandry Cichoń na Politechnice Wrocławskiej. Doktorantki są obecnie członkami zespołu naukowego w kierowanym przeze mnie grantie Lider z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

W 2019 roku byłem członkiem komitetu naukowego konferencji "*International Conference on Advances in Energy Systems and Environmental Engineering (ASEE19)*", Wrocław, Polska.

Od grudnia 2020 jestem członkiem rady naukowo- redakcyjnej pisma Applied Sciences (IF=2,474) odpowiedzialnym min. za opracowanie tematyki numerów pisma dedykowanych zagadnieniom energii odnawialnej.

Wielokrotnie uczestniczyłem w popularnonaukowych konferencjach i targach promując swoją tematykę badawczą (min. Forum Wentylacja- Salon Klimatyzacja, Konferencje Wpływ Młodych Naukowców Na Osiągnięcia Polskiej Nauki, Targi Defense Innovation Challenge w USA, Targi Macau International Trade and Investment Fair). Promowałem także tematykę swoich prac badawczych poprzez publikacje w czasopismach popularnonaukowych i branżowych (min. Chłodnictwo & Klimatyzacja, Inżynier Budownictwa, Rynek Instalacyjny).

## VII. Pozostałe informacje (podsumowanie dorobku publikacyjnego):

Opublikowałem łącznie 142 prace: 96 artykułów (w tym 36 z IF), 11 rozdziałów w książkach, 33 referaty konferencyjne (w tym 6 indeksowanych w Web of Science). Ponadto jestem współautorem dwóch patentów oraz autorem 3 zgłoszeń patentowych (w tym dwóch międzynarodowych). W załączniku nr 4 pt. „Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny” podałem opis bibliograficzny najważniejszych moich prac – łącznie 142.

W okresie przed uzyskaniem stopnia doktora (2011–2016) opublikowałem łącznie 92 prace:

- 14 artykułów w czasopismach naukowych z IF,
- 11 rozdziałów w monografiach, w tym 3 samodzielne,
- 35 artykułów w punktowanych czasopismach naukowych bez IF
- 18 artykułów w czasopismach branżowych.
- 7 referatów na konferencjach międzynarodowych
- 7 referatów na konferencjach krajowych

Po uzyskaniu stopnia doktora (2016–2020) opublikowałem łącznie 48 prac :

- 22 artykuły w czasopismach naukowych z IF,
- 7 artykułów w czasopismach branżowych,
- 17 referatów na konferencjach międzynarodowych
- 2 referaty na konferencjach krajowych.

Całkowity dorobek punktowy, po odliczeniu udziału współautorów prac, wynosi łącznie **1392.9** punktów. W tym **1220,4** punktów za artykuły w czasopismach z IF. Dorobek punktowy w okresie po uzyskaniu stopnia doktora 992,4 punkty (z czego 978,8 punkty w czasopismach z IF). Całkowity współczynnik Impact Factor wynosi **155,014**, w tym **107.3** po uzyskaniu stopnia doktora.

Ogólne wskaźniki bibliometryczne (liczba prac, liczba cytowań, indeks Hirscha) mojego dorobku naukowego, w zależności od bazy, wynoszą:

- Web of Science: liczba prac: **42**, liczba cytowań: **541** (bez autocytowań), indeks Hirscha: **15**.
- Scopus: liczba prac: **45**, liczba cytowań: **622** (bez autocytowań), indeks Hirscha: **17**.
- Google Scholar: liczba prac: **129**, liczba cytowań: **1248**, indeks Hirscha: **21**.

Liczba slotów określonych na podstawie Rozporządzenia Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego: **13.2**; w tym **9,7385** za artykuły w czasopismach naukowych oraz **3,4167** za referaty konferencyjne.

