

Autoreferat

Optymalizacja uszczelnień labiryntowych pod względem minimalizacji przecieku oraz modelowanie przepływu gazu w uszczelnieniach labiryntowych i szczelinowych

dr inż. Damian Joachimiak

Politechnika Poznańska

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Instytut Energetyki Ciepłej

ul. Piotrowo 3, 60-138 Poznań

1. Imię i nazwisko: Damian Joachimiak

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2013 – stopień naukowy doktor nauk technicznych, z dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn na Politechnice Poznańskiej, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu;

Temat rozprawy doktorskiej: **Badanie uszczelnień labiryntowych z upustem** (promotor prof. dr hab. inż. Piotr Krzyślak)

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

10.2015 - obecnie Wydział Inżynierii Transportu, Politechnika Poznańska, adiunkt;

10.2012 - 9.2015 Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska, asystent;

4. 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.).

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Optymalizacja uszczelnień labiryntowych pod względem minimalizacji przecieku oraz modelowanie przepływu gazu w uszczelnieniach labiryntowych i szczelinowych

4.2 Osiągnięcie naukowe - złożone z monografii, jednotematycznego cyklu publikacji naukowych, patentu oraz oryginalnych osiągnięć technicznych:

[1] Monografia:

D. Joachimiak, *Uszczelnienia bezdotykowe – badania, modelowanie i optymalizacja*

a) Artykuły naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports

Opis udziałów merytorycznych oraz procentowych poniższych prac znajduje się w Wykazie Osiągnięć Naukowych

[2] **D. Joachimiak, A. Frąckowiak**, Experimental and numerical analysis of the gas flow in the axisymmetric radial clearance, *Energies* 2020, 13, 5794; doi:10.3390/en13215794, 140 pkt, IF 2.702, procentowy udział w pracy 90%

[3] **D. Joachimiak**, “Universal method for determination of leakage in labyrinth seal”, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Volume 13, Number 3, May 2020 issue, 70 Pkt, IF 1.09, 70 pkt, procentowy udział w pracy 100%

[4] **D. Joachimiak, P. Krzyślak**, “The analysis of the gas flow in a labyrinth seal of variable pitch”, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 12, No. 3, pp. 921-930, 2019, 70 pkt, IF 1.09, procentowy udział w pracy 80%

- [5]. **D. Joachimiak**, P. Krzyślak, Investigations into gas flow in a short segment of a straight-through labyrinth seal of high wear level based on experimental research and CFD calculations, Polish Maritime Research, 2 (94), 2017, Vol. 24; pp. 83-88, 20 pkt (aktualna punktacja wg MNiSW 70 pkt), IF 0.763, procentowy udział w pracy 80%

b) Artykuły w czasopismach z listy B MNiSW oraz z konferencji naukowych ujęte w czasopismach indeksowanych w bazie Scopus i innych bazach

Publikacje indeksowane w Web of Science:

- [6] **D. Joachimiak**, P. Krzyślak, A model of gas flow with friction in a slotted seal, Archives of Thermodynamics, Vol. 37(2016), No. 3, pp. 95–108, DOI: 10.1515/aoter-2016-0022, 13 pkt (aktualna punktacja wg MNiSW 40 pkt), udział w pracy 70%,
- [7] **D. Joachimiak**, P. Krzyślak, Comparison of results of experimental research with numerical calculations of a model one-sided seal, Archives of Thermodynamics, Vol. 36(2015), No. 2, 61–74, 13 pkt (aktualna punktacja wg MNiSW 40 pkt), udział w pracy 70%

Publikacje z listy B:

- [8] **D. Joachimiak**, P. Krzyślak, Opis stanowiska i systemu pomiarowego do badań uszczelnień labiryntowych, Journal of Mechanical and Transport Engineering, Vol. 69, No. 3 2017, DOI 10.21008/j.2449-920X.2017.69.3.03
Punktacja MNiSW: 6 pkt
- [9] **D. Joachimiak**, P. Krzyślak; Analiza rozkładu prędkości w komorze uszczelnienia labiryntowego na podstawie badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika, 2014 z. 86 [290], nr 2 215-224
Punktacja MNiSW: 7 pkt
- [10] **D. Joachimiak**, M. Joachimiak, P. Krzyślak, The analysis of the calculation process related to labyrinth sealing with extraction, International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 2013, Vol. 18, nr 4.
Punktacja MNiSW: 15 pkt

c) Patenty oraz prace wdrożeniowe,

- [11] **D. Joachimiak**, P. Krzyślak, Sealing of fluid-flow machines and method for monitoring the degree of wear of the sealing and leakage value of the fluid-flow machines working medium, PL419500 (A1), 2018-05-21, **udział w pracy 70%**
- [12] **D. Joachimiak**, P. Krzyślak, Wdrożenie przemysłowe nowej konstrukcji uszczelnienia labiryntowego TYP CS (CompactSYS) U3CS6204 do łożysk tocznych stosowanych w kopalniach odkrywkowych oraz podziemnych, drożenie Mipol s.c., 2020, **udział w pracy 85%**
- [13] **D. Joachimiak**, P. Krzyślak, Wdrożenie ulepszonej konstrukcji uszczelnień labiryntowych o symbolu handlowym: CS 6305 oraz VR6305, Mipol s.c., 2021, **udział w pracy 90%**

Tabela 1. Wykaz osiągnięć naukowo – badawczych wchodzących w skład głównego osiągnięcia naukowego

Rodzaj dorobku		Łącznie	Liczba punktów MNiSW
1	Monografia	1	80
2	Publikacje naukowe w czasopismach indeksowanych w JCR (lista A MNiSW)	4	300 *350
3	Publikacje naukowe w czasopismach indeksowanych w bazie Scopus i Web of Science	2	26 *80
4	Publikacje naukowe w czasopismach indeksowanych (lista B MNiSW)	3	28 *33
5	Patenty	1	75
	Wdrożenia	2	
6	Publikacje łącznie	13	509 *617
7	Sumaryczny IF		5.645
8	Sumaryczny IF-5		6.571

* uwzględniono aktualną punktację wg MNiSW

Omówienie prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

Omówione zagadnienia tworzące osiągnięcie naukowe nie powielają się z badaniami przedstawionymi w pracy doktorskiej. Praca doktorska dotyczyła badań eksperymentalnych i modelowania inwazyjnej metody diagnozowania stopnia zużycia uszczelnienia.

Prowadzone przeze mnie prace badawcze dotyczyły modelowania i optymalizowania uszczelnień labiryntowych oraz modelowania przepływu gazu w uszczelnieniach szczelinowych o geometriach stosowanych w maszynach przepływowych. Zakres zagadnień obejmował: badania eksperymentalne, obliczenia numeryczne oraz tworzenie własnych modeli obliczeniowych mających zastosowanie w wyznaczaniu przecieku w tego typu uszczelnieniach.

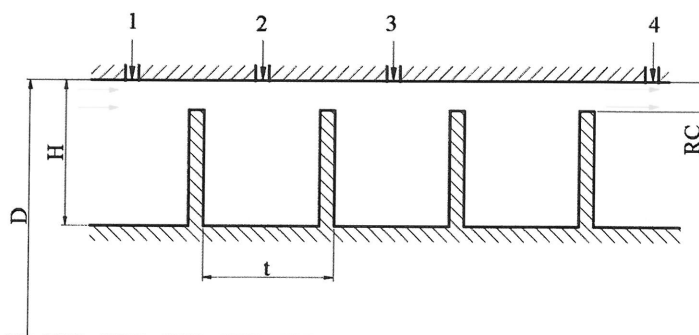
Uszczelnienia labiryntowe stosuje się między innymi w turbinach parowych, turbinach gazowych, sprężarkach wirnikowych oraz pompach. Zaletą uszczelnień labiryntowych jest to, że podczas pracy maszyny umożliwiają przesunięcia elementów uszczelnienia w kierunku promieniowym wału względem korpusu wywołane drganiami wirnika czy dylatacją termiczną elementów wału i korpusu. Uszczelnienia labiryntowe jednostronne dodatkowo umożliwiają występowanie przesunięć w kierunku osiowym wału względem korpusu.

Uszczelnienia bezdotykowe (labiryntowe i szczelinowe) mają bezpośredni wpływ na sprawność maszyn przepływowych oraz tłokowych. Geometrie stosowanych uszczelnień mogą być różne i zależą od rodzaju maszyny, wielkości luzu nominalnego (promieniowego i osiowego) oraz rodzaju i parametrów czynnika roboczego. Na geometrię mają wpływ wymiary zewnętrzne uszczelnienia oraz wartości przesunięć względnych elementów uszczelnienia podczas pracy.

Uszczelnienia labiryntowe mają znaczący wpływ na sprawność maszyn energetycznych dużej mocy. W przemyśle energetycznym w turbinach parowych podczas ich pracy (w okresie międzyremontowym) występuje problem z oceną stanu geometrii uszczelnień. Brak wiedzy o stopniu zużycia uszczelnień nie pozwala określić rzeczywistych przecieków, które mają bezpośredni wpływ na sprawność maszyn.

W początkowym etapie swojej pracy badawczej zaprojektowałem i nadzorowałem wykonanie wszystkich elementów stanowiska do badań uszczelnień bezdotykowych. Na stanowisku tym przeprowadziłem wiele serii badań eksperymentalnych. Dla warunków brzegowych uzyskanych z eksperymentu przeprowadzałem obliczenia CFD. Analizy te dotyczyły rozkładu prędkości gazu w komorach uszczelnienia [1, 5, 9], rozkładu ciśnienia na długości uszczelnienia dla różnego stopnia zużycia [7] oraz wpływu zmiany parametrów geometrycznych na przeciek [1]. Na podstawie uzyskanych wyników zauważyłem, że na skutek zużycia uszczelnienia zmienia się charakter przepływu gazu w segmencie. Wyraźnej zmianie ulega rozkład ciśnienia statycznego w komorach. Dla uszczelnień o dużym stopniu zużycia rozkład ten znacząco odbiega od rozkładu teoretycznego [7]. Na podstawie wymienionych wcześniej analiz opracowałem metodę bezinwazyjnej detekcji stopnia zużycia uszczelnienia, na którą uzyskałem patent [11].

Metoda ta polega na pomiarach ciśnienia w wybranych miejscach uszczelnienia. Informacja o aktualnym rozkładzie ciśnienia statycznego umożliwia odtworzenie nieznanego luzu promieniowego uszczelnień, który zwiększa się na skutek zużycia. Pomiar rozkładu ciśnienia może być realizowany za pomocą otworów impulsowych wykonanych w korpusie. Metoda zakłada pomiar ciśnienia statycznego przed segmentem, w pierwszych dwóch komorach oraz za segmentem uszczelnienia. Przykładowa geometria uszczelnienia z zaznaczonymi punktami pomiarowymi została przedstawiona na rysunku 1.

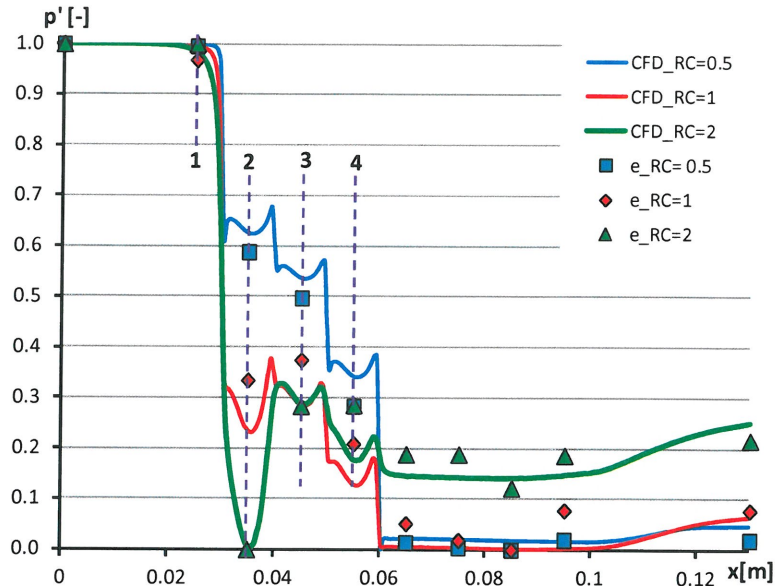


Rys. 1. Geometria uszczelnienia jednostronnego z punktami pomiaru ciśnienia

W uszczelnieniach labiryntowych ekspansja gazu zachodzi w każdym przewężeniu, co w efekcie powoduje stopniowy spadek ciśnienia w każdej kolejnej komorze. Na skutek zużycia zanika równomierna ekspansja gazu. Wówczas ekspansja zachodzi w obszarze pierwszego przewężenia. W opisie rozkładu ciśnienia posłużono się bezwymiarowym parametrem ciśnienia statycznego

$$p' = \frac{p_x - p_{min}}{p_{max} - p_{min}}$$

Ciśnienie statyczne uzyskane na długości uszczelnienia oznaczono jako p_x . Wartości p_{max} i p_{min} są wartościami skrajnymi ciśnienia w punktach pomiarowych 1-4 (rys. 1) uzyskanymi z eksperymentu i obliczeń CFD.



Rys. 2. Rozkład parametru ciśnienia statycznego w uszczelnieniu o wysokości szczeliny RC = 0.5, 1, 2 mm (punkty – dane uzyskane z eksperymentu, linia ciągła – dane z obliczeń CFD)

Im większe zużycie uszczelnienia, tym intensywniejszy jest spadek ciśnienia p' w obszarze pierwszego przewężenia (rys. 2). Analiza relacji ciśnienia statycznego w wybranych komorach uszczelnienia umożliwia kontrolę stanu zużycia uszczelnienia w czasie pracy maszyny. Zaproponowana przeze mnie metoda jest bezinwazyjna. Stosowanie tej metody podczas pracy maszyny przepływowej nie wprowadza zaburzenia w przepływie gazu. Oznacza to, że nie wpływa ona na pracę uszczelnienia (nie powoduje pogorszenia jego szczelności). Metoda umożliwia eksploatatorom maszyny przepływowej ocenę stopnia zużycia oraz wartości przecieku w uszczelnieniach. Dane te pozwalają na precyzyjniejsze oszacowanie aktualnej sprawności maszyny. Dzięki temu lepiej można zaplanować czas remontu. Wiedza ta może przekładać się na zyski ekonomiczne wynikające z efektywniejszej eksploatacji cieplnych maszyn przepływowych dużej mocy, pracujących w elektrowniach i elektrociepłowniach.

Moje zainteresowania naukowe dotyczyły również uszczelnień szczelinowych, które są stosowane między innymi w pompach, układach tłok cylinder np. w silnikach tłokowych, w maszynach waporowych oraz w wieńcach zaworów turbin parowych czy uszczelnieniach łożysk. Aby tworzyć modele przepływu gazu w uszczelnieniach bezdotykowych niezbędne było zrozumienie zjawisk przepływowych występujących w uszczelnieniach. Istotne jest określenie wpływu rozkładu prędkości gazu oraz rozkładu ciśnienia statycznego na długości uszczelnienia na wartość przecieku. Zrozumienie zjawisk przepływowych pozwoliło na zbudowanie modelu obliczeniowego, dedykowanego dla uszczelnień szczelinowych, który przedstawiono w pracy [6]. Model ten bazuje na równaniu zachowania masy, równaniu entalpii całkowitej oraz eksperymentalnie korygowanym współczynnikiem tarcia gazu o ścianki uszczelnienia, opartym na równaniu Blasius'a. Autorski model dla określonej geometrii, znanego ciśnienia i temperatury początkowej oraz ciśnienia za uszczelnieniem umożliwia wyznaczenie przecieku. Model ten wyróżnia się spośród modeli opisanych w literaturze możliwością wyznaczania zmienności parametrów termodynamicznych na długości uszczelnienia. Model ten zaprogramowałem w języku Fortran, co pozwala na wykonywanie szybkich obliczeń.

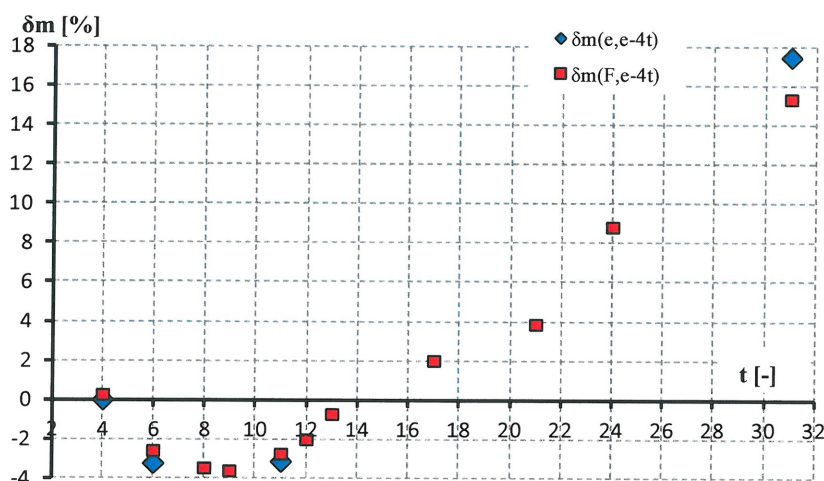
Zdobyte doświadczenie oraz wiedza w zakresie analizy i modelowania przepływu gazu w uszczelnieniach wykorzystałem w badaniach wdrożeniowych nad uszczelnieniem łożysk tocznych firmy Mipol [12,13]. Wykonanie badań eksperymentalnych oraz analiza wyników umożliwiły określenie od jakich cech geometrii uszczelnień labiryntowych zależy ich szczelność i trwałość. Na podstawie uzyskanych wyników zostały opracowane i wdrożone do produkcji nowe geometrie

uszczelnień labiryntowych, które cechują się lepszą szczelnością i trwałością od wcześniej produkowanych.

Zjawiska przepływowe występujące w uszczelnieniu szczelinowym są zbliżone do tych, które występują w uszczelnieniach labiryntowych jednostronnych w krótkich segmentach o dużym stopniu zużycia [5], co stanowiło kolejny etap prowadzonych przeze mnie badań.

Przepływający gaz w uszczelnieniu labiryntowym o dużym stopniu zużycia tworzy w komorach pomiędzy przewężeniami strumień gazu poruszający się z dużą prędkością, natomiast dyssypacja energii kinetycznej w komorach uszczelnienia zanika. Wskazują na to wyniki badań profilu prędkości w komorze uszczelnienia za pomocą sondy włóknowej stałotemperaturowej oraz dane z programu CFX, które zawarto w pracy [5].

Po przeprowadzeniu badań opisanych w pracach [5, 6, 7] powstały pytania dotyczące zależności pomiędzy przepływem gazu w uszczelnieniu szczelinowym, a labiryntowym. Zainteresował mnie charakter zmian przecieku pomiędzy tymi geometriami. Problem ten jest bardzo istotny ponieważ dotyczy zagadnienia optymalizacji pod względem minimalizacji przecieku uszczelnień labiryntowych jednostronnych. Waga tego zagadnienia jest duża, ponieważ uszczelnienia labiryntowe oraz szczelinowe charakteryzują się tym, że nie posiadają całkowitej szczelności. Przez prawidłowo zaprojektowane uszczelnienie bezdotykowe zawsze występuje przepływ czynnika roboczego. Stąd ważne jest, aby zaprojektowane uszczelnienie posiadało możliwie najmniejszy przeciek. Zagadnienie to przedstawiłem w pracy [4], gdzie dla stałej długości segmentu zbadałem eksperymentalnie, numerycznie oraz za pomocą trzech modeli obliczeniowych zależność wartości przecieku pomiędzy geometrią uszczelnienia labiryntowego i szczelinowego. Poprzez zwiększanie liczby ząbków zwiększałem liczbę miejsc ekspansji, jednocześnie zmniejszając objętość komór i pogarszając warunki dyssypacji energii kinetycznej w komorach. Zbadałem przejście charakteru przepływu od uszczelnienia labiryntowego do osiągnięcia geometrii uszczelnienia szczelinowego. Rozpiętość względnej zmiany strumienia masy sięgała w analizowanych geometriach blisko 22% (rys. 3).



Rys. 3. Zależność przecieku od liczby zębów

Pomiędzy geometrią uszczelnienia labiryntowego, a szczelinowego uzyskałem minimalną wartość strumienia masy (rys. 3), która jest mniejsza o 4% w stosunku do geometrii początkowej uszczelnienia labiryntowego i o blisko 20% w stosunku do uszczelnienia szczelinowego. Oznacza to, że znalazłem optymalną geometrię z punktu widzenia dwóch różnych zjawisk ekspansji gazu oraz dyssypacji energii kinetycznej w komorach. Z przedstawionych danych wynika, że zjawiska te mają bezpośredni wpływ na wartość przecieku. Badania opisane w pracy [4] pokazują, że optymalną podziałkę uszczelnienia precyzyjnie można określić za pomocą skorygowanego modelu Scharrera. Wyniki

badan potwierdzają dobrą zgodność danych eksperymentalnych z wynikami uzyskanymi w programie Fluent oraz dobrą dokładność modelu Salzman i Fravigo.

Badanie eksperymentalne wykonałem dla trzech wysokości szczelin. Uzyskane wyniki wskazują na to, że wpływ liczby zębów na przeciek jest istotny. Natomiast spadek ciśnienia w uszczelnieniu nie ma wpływu na uzyskanie najmniejszego przecieku dla danej geometrii.

Z pracy [1] (rozdział 5 monografii) wynika również, że przy określonej długości segmentu i liczbie ząbków, ich grubość powinna być jak najmniejsza. Grubość zęba ma wpływ na charakter ekspansji w przewężeniu oraz na wielkość przecieku, ponieważ od tego wymiaru zależy objętość komór. Z przeprowadzonych badań wynika, że zjawiskiem występującym w każdym typie uszczelnienia bezdotykowego, które ma bezpośredni wpływ na wartość przecieku, jest przenoszenie energii kinetycznej pomiędzy przewężeniami.

Badania dotyczące zjawiska przenoszenia energii kinetycznej rozwinąłem również w pracy [3], gdzie zaproponowałem autorski model obliczeniowy dla różnego typu uszczelnień labiryntowych. Model ten oparty o zlinearyzowane równanie Saint-Venanta, zawiera empirycznie wyznaczony współczynnik przepływu c_{SV} , który jest funkcją liczby Reynoldsa i wysokości przewężenia. Współczynnik ten uwzględnia zjawisko kontrakcji przepływu, wynikające z charakteru przepływu i rozkładu ciśnienia statycznego w obszarze przewężenia. Intensywność zjawiska kontrakcji przepływu zależy od geometrii przewężenia i jest skutkiem występowania obszarów niskich ciśnień w przewężeniu, co powoduje tworzenie się silnych zawirowań gazu na grzbiecie zęba. Zastosowanie tego współczynnika umożliwiło uwzględnienie większości zjawisk przepływowych występujących w uszczelnieniach, oprócz zjawiska przenoszenia energii kinetycznej. Opracowany model obliczeniowy wykorzystałem do wyznaczenia współczynnika przenoszenia energii kinetycznej gazu dla uszczelnień jednostronnych i dwustronnych o różnej geometrii. Określiłem zmienność współczynnika przenoszenia energii kinetycznej w zależności od podziałki oraz spadku ciśnienia w uszczelnieniu. Wartość współczynnika przenoszenia energii kinetycznej porównałem z modelami Neumanna, Scharrera i Hodgkinsona. Przedstawiony model umożliwia wyznaczenie teoretycznego, minimalnego strumienia masy gazu w segmentach wieloząbkowych o szerokim zakresie wysokości przewężeń. Wartość tego strumienia wynika z założenia ekspansji gazu w przewężeniach oraz całkowitej dysypacji energii kinetycznej w komorach uszczelnienia. Odniesienie wartości rzeczywistej strumienia masy do uzyskanej za pomocą modelu obliczeniowego umożliwiło określenie stopnia szczelności segmentu i jednocześnie wyznaczenie współczynnika przenoszenia energii kinetycznej dla analizowanych geometrii.

Wykazałem, że współczynnik przenoszenia energii kinetycznej znacząco zmienia się na skutek zużycia dla uszczelnień o małych podziałkach. Z danych przedstawionych w pracy [3] wynika, że dla uszczelnień dwustronnych wartość współczynnika przenoszenia energii kinetycznej γ maleje przy wzroście wysokości szczeliny i spadku ciśnienia. Udowodniłem, że pod względem zmiany współczynnika przenoszenia energii kinetycznej uszczelnienie dwustronne zachowuje się zupełnie inaczej niż uszczelnienie jednostronne labiryntowe. Zaproponowany przeze mnie model stanowi nową metodę wyznaczania współczynnika przenoszenia energii kinetycznej, która zależy nie tylko od geometrii, ale również od spadku ciśnienia gazu w uszczelnieniu. Stąd wyznaczony strumień masy za pomocą modelu jest miarą teoretycznej szczelności uszczelnienia. Model umożliwia wyznaczenie rozkładu ciśnienia oraz innych parametrów na długości segmentu. Model ten zaprogramowałem w języku Fortran.

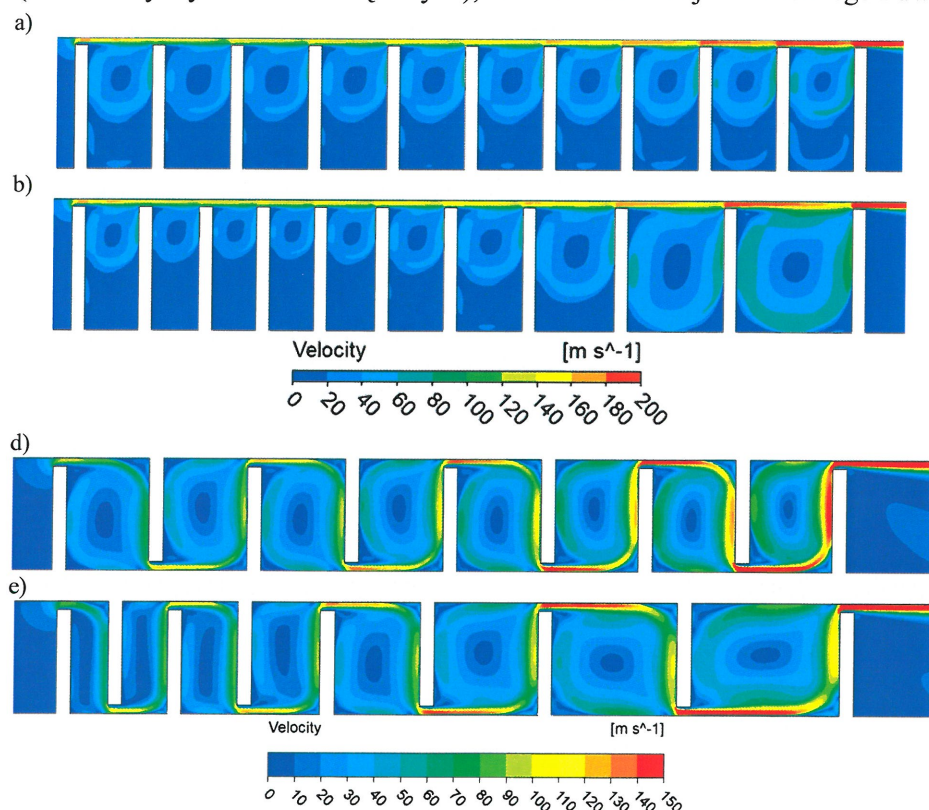
Kolejna część moich badań dotyczyła wyjaśnienia skokowej zmiany współczynnika przepływu c_{SV} dla geometrii osiowosymetrycznego przewężenia (fragmentu uszczelnienia), który ma bezpośredni wpływ na wartość przecieku. Badania te opisałem w pracy [2]. Analizowałem charakter zmian współczynnika przepływu c_{SV} , który wyznaczyłem w funkcji spadku ciśnienia β . Zmiana współczynnika c_{SV}

występuje pomiędzy wysokością szczeliny 0.542, a 0.752 mm. Udowodniłem, że na skutek stosunkowo niedużej zmiany wysokości przewężenia, w szczelinie pojawia się przepływ wsteczny powodujący zmniejszenie pola przepływu przez przewężenie. Wyjaśniłem również przyczynę występowania tego zjawiska. Dane z pracy [2] można wykorzystać podczas projektowania mili-wymienników ciepła celem minimalizowania oporów przepływu czynnika roboczego przez wymiennik.

Na podstawie badań przedstawionych w pracach [3, 4, 5] stwierdziłem, że głównym zjawiskiem intensyfikującym przeciek w uszczelnieniach labiryntowych jest przenoszenie energii kinetycznej gazu pomiędzy przewężeniami. Z kolei na zmniejszenie przecieku ma wpływ maksymalnie dyssypacyjny przepływ gazu w uszczelnieniu, czyli taki, który zawiera możliwie dużą liczbę miejsc ekspansji oraz maksymalnie dyssypacyjny przepływ w komorach.

Dyssypację energii kinetycznej w komorach uszczelnienia powodują punkty stagnacji, w których następują raptowne zmiany kierunków przepływu gazu oraz maksymalnie duża prędkość wirowa. Pierwszym krokiem jest sformułowanie pytania: jak należy zaprojektować uszczelnienie o określonych wymiarach zewnętrznych, aby uzyskać maksymalny stopień dyssypacji energii kinetycznej w każdej komorze, co w efekcie da zmniejszony przeciek. W rozdziale 8 monografii przeanalizowałem to zagadnienie w dwóch wariantach metody optymalizacji (A oraz B).

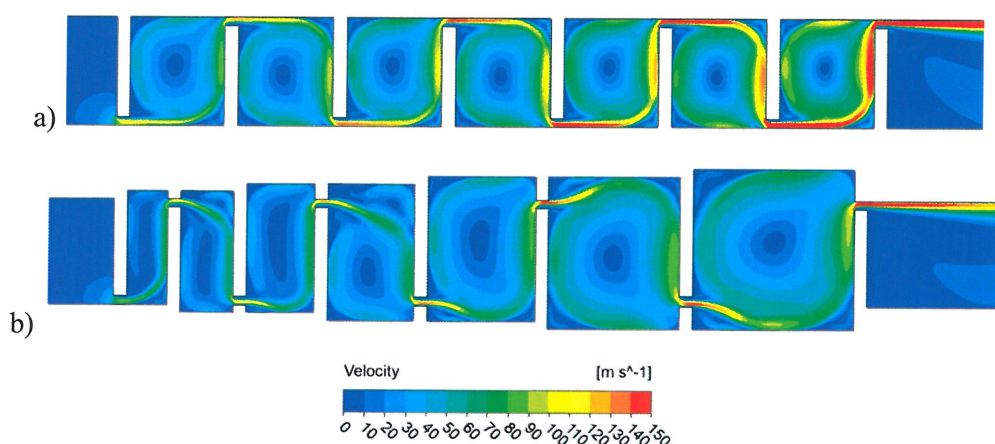
W wariacie A założyłem brak ingerencji w wymiary zewnętrzne uszczelnienia. Może być on stosowany w przypadku optymalizacji uszczelnienia już zaprojektowanej lub remontowanej maszyny przepływowej, kiedy nie ma możliwości dokonania zmian konstrukcyjnych. Polega on na dostosowaniu długości komór uszczelnienia tak, aby uzyskać możliwie równomierny stopień dyssypacji energii kinetycznej. Na rysunku 4 przedstawiono zastosowanie metody optymalizacji dla wariantu A (bez zmiany wymiarów zewnętrznych), dla uszczelnienia jednostronnego i dwustronnego.



Rys. 4. Rozkład prędkości gazu w a) geometrii wejściowej, b) geometrii zoptymalizowanej uszczelnienia jednostronnego c) geometrii wejściowej, d) zoptymalizowanej uszczelnienia dwustronnego

Wariant A umożliwia względne zmniejszenie przecieku w stosunku do geometrii początkowej dla uszczelnień jednostronnych od 3.8 do 9% w zależności od średniej wysokości luzu promieniowego. Dla uszczelnień dwustronnych zmniejszenie przecieku wynosi około 3.4% bez zmiany liczby ząbków. Zaznaczam, że skuteczność metody potwierdzono na podstawie badań eksperymentalnych jak i symulacji CFD. Z przedstawionych danych w rozdziale 8 monografii wynika, że na efekt metody optymalizacji ma wpływ geometria wejściowa uszczelnienia: liczba ząbków, wysokość luzu promieniowego uszczelnienia oraz długość uszczelnienia.

W wariacie B metody optymalizacji przewiduje się zmianę wysokości komór uszczelnienia, co umożliwia uzyskiwanie znacznie większego zmniejszenia przecieku w porównaniu do wariantu A na poziomie 15.5% w stosunku do geometrii o tej samej liczbie ząbków. Rozkłady prędkości w przykładowej geometrii wejściowej i zoptymalizowanej przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Rozkład prędkości w geometrii a) wejściowej b) zoptymalizowanej według wariantu B

Metoda optymalizacji uszczelnień stanowi nowe w skali światowej podejście do zagadnień mających na celu minimalizowanie przecieku w uszczelnieniach bezdotkowych. Cechą przedstawionej metody optymalizacji jest to, że możliwe jest jej rozwinięcie o zmianę innych parametrów geometrycznych oraz zastosowanie dla różnego typu uszczelnień labiryntowych.

Zastosowanie metody optymalizacji daje zmniejszenie przecieku niezależnie od wartości spadku ciśnienia w uszczelnieniu. Stąd możliwe jest jej zastosowanie w różnych maszynach i urządzeniach, a przede wszystkim w uszczelnieniach maszyn przepływowych oraz w maszynach tłokowych. Praca dotycząca zagadnienia optymalizacji jest w trakcie recenzji, natomiast geometria uszczelnienia według metody optymalizacji zgłoszona w Urzędzie Patentowym.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

- Jestem promotorem pomocniczym pracy doktorskiej realizowanej na Politechnice Gdańskiej (Wydział Oceanografii i Okrętownictwa). Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Kaszowskiego dotyczy Metod modelowania uszczelnień labiryntowych z upustem.
- Współpracuję naukowo w zakresie badań uszczelnień labiryntowych z prof. dr hab. inż. Piotrem Krzyślakiem pracownikiem Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. W roku 2020 zgłoszono wspólną publikację na konferencję Modern Power System and Units (MPSU) 2020, która została przyjęta. Publikacja ta dotyczy analizy wpływu grubości ząbków na wartość przecieku w uszczelnieniach labiryntowych. Konferencja ta odbędzie się w 2021 roku (MPSU2021).

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

- Kierowałem zespołem przygotowującym nowy kierunek studiów I stopnia Energetyka Przemysłowa i Odnawialna na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej,
- Byłem członkiem Koła Naukowego Mechaników na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu biorąc udział w wystąpieniach.
- Byłem członkiem komisji oceniającej referaty na Studenckiej Sesji Naukowej organizowanej na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu.
- Uzyskałem stypendium w ramach projektu "Era Inżyniera. Rozbudowa potencjału Rozwojowego Politechniki Poznańskiej", w ramach którego przystosowałem stanowisko badawcze do badań uszczelnień bezdotykowych do realizacji zajęć dydaktycznych.
- Brałem udział w przygotowaniach Nocy Naukowców,
- W latach 2012 - 2019 byłem Opiekunem Domu Studenckiego nr 2 na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu
- Wykaz prowadzonych przeze mnie zajęć od momentu zatrudnienia na Politechnice Poznańskiej:

Lp.	Rodzaj zajęć dydaktycznych	Typ studiów: kierunek-specjalność/ 1-2 stopień/Stacjonarne-Niestacjonarne	Liczba godzin
1	Turbiny gazowe i parowe – wykład	EC/2/S	15
2	Turbiny gazowe i parowe – projekt	EC/2/S	15
3	Pompy - wykład	EC/2/S	15
4	Turbiny – wykład	EC/1/S	15
5	Turbiny – ćwiczenia	EC/1/S	15
6	Maszyny przepływowe - wykład	SSp/MiBM/2/S	15
7	Maszyny przepływowe - ćwiczenia	SSp/MiBM/2/S	15
8	Silniki napędowe do sprężarek i pomp	ITR/1/S	15
9	Modelowanie Procesów Ciepłych– wykład	EN/1/S CEP	30
10	Modelowanie Procesów Ciepłych – projekt	EN/1/S CEP	15
11	Sprężarki i pompy – część wykładu	EC/1/S	15
12	Sprężarki i pompy – projekt	EC/1/S	15
13	Podstawy Energetyki Ciepłej – wykład	EN/1/S	30
14	Podstawy Energetyki Ciepłej – ćwiczenia	EN/1/S	15
15	Podstawy Energetyki Ciepłej – laboratorium	EN/1/S	15
16	Podstawy Energetyki Ciepłej – wykład	EN/1/N	15
17	Podstawy Energetyki Ciepłej – ćwiczenia	EN/1/N	15
18	Podstawy Energetyki Ciepłej – laboratorium	EN/1/N	15
19	Miernictwo w Energetyce – projekt	EN/1/S CEP	15
20	Miernictwo w Energetyce – laboratorium	EN/1/S CEP	15
21	Seminarium dyplomowe – projekt	EN/1/S CEP	15
22	Mechanika płynów – ćwiczenia, laboratorium	MiBM/1/S EN/1/S	15
23	Termodynamika Techniczna – ćwiczenia, laboratorium	MiBM/1/S	15

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

- Jestem promotorem pomocniczym rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Ciupka nt: "Analiza możliwości poprawy procesu spalania paliw stałych w kotłach małej mocy przy wykorzystaniu pary wodnej" realizowanej na Politechnice Poznańskiej
- Dwukrotnie zdobyłem nagrodę Rektora za Osiągnięcia naukowe w latach 2015/2016 oraz 2014/2015
- Odbyłem trzymiesięczny staż przemysłowy w firmie Filen. Zagadnienia analizowane podczas stażu obejmowały: obliczenia i analizy uszczelnień w układzie tłok-cylinder, obliczenia i analizy uszczelnień dla cieczy, analizy przepływu ciepła przez elementy silnika tłokowego, analizy przepływu ciepła w ściankach zgazowarki.
- Odbyłem trzymiesięczny staż przemysłowy w Dziale Badań i Konstrukcji SECO/WARWICK. Podczas stażu realizowano tematy dotyczące przepływu ciepła w elementach ulepszanych w piecach do obróbki cieplnej i cieplno – chemicznej.

Oprócz prac opisanych w cyklu publikacji zamieszczonych w punkcie 4 autoreferatu, habilitant realizował następujące tematy badawcze:

- 7.1. Identyfikacja warunków brzegowych na geometrii walcowej w procesach obróbki cieplno-chemicznej**
- 7.2. Analiza wpływu gazów inertnych na warunki kondensacji w skraplaczach energetycznych**
- 7.3. Model niestacjonarnego przepływu ciepła w korpusie silnika z wolnym tłokiem**
- 7.4. Obliczenia wariantowe CFD uszczelnienia szczelinowego tłok-cylinder**
- 7.5. Obliczenia wariantowe uszczelnienia szczelinowego tłok-cylinder**
- 7.6. Obliczenia wariantowe uszczelnienia rowkowego tłok-cylinder**
- 7.7. Opracowanie badań eksperymentalnych uszczelnień labiryntowych dla firmy Mipol s.c.**

ad. 7.1.

Opracowywałem wspólnie z pierwszym autorem badań metodologię wykonania badań eksperymentalnych w analizie identyfikacji warunków brzegowych na powierzchni walca w procesach obróbki cieplno-chemicznej.

W badaniach wykorzystano geometrię walcową umieszczoną osiowo w komorze pieca do obróbki cieplno - chemicznej. Walec posiadał zaizolowane końce, w jego wnętrzu umieszczono termoelementy. W pierwszym etapie badań analizowano niestacjonarny rozkład temperatury na długości walca. Brałem udział w badaniach wstępnych, których celem było wyznaczenie płaszczyzny o minimalnym przepływie ciepła w kierunku osiowym. Tą część prac opisano w publikacji [Załącznik nr 4, punkt. 4.:3].

Uczestniczyłem również w drugiej części badań, w których w wybranej płaszczyźnie walca umieszczono termoelementy w taki sposób, aby nie zaburzać przepływu ciepła w kierunku promieniowym. Na etapie doboru położenia punktów pomiaru temperatury kierowano się dwoma aspektami. Pierwszy polegał na tym, że pomiar temperatury musi być realizowany możliwie blisko powierzchni walca, aby uzyskać dużą dokładność rozwiązania zagadnienia odwrotnego. Drugi to punkty pomiarowe powinny być oddalone od siebie na tyle, aby różnice temperatury w

poszczególnych punktach pomiarowych były mierzone przez system pomiarowy stanowiska badawczego (pieca). Tą część badań opisano w pracy [Załącznik nr 4, punkt. 4.:4].

Brałem udział w badaniach zasadniczych, w których na podstawie znanych wartości temperatury w określonych punktach wybranej płaszczyzny walca oraz temperatury gazu poprzez rozwiązanie zagadnienia odwrotnego wyznaczano zmienne w czasie procesu nagrzewania warunki brzegowe. Efekty tych badań opublikowano w prestiżowym czasopiśmie [Załącznik nr 4, punkt. 4.:1]. W opisanych powyżej badaniach aktywnie uczestniczyłam w badaniach eksperymentalnych oraz analizie uzyskanych wyników (nie rozwiązywałam zagadnienia odwrotnego).

ad. 7.2.

Brałem udział w tworzeniu modeli (programów) obliczeniowych służących do analizy kondensacji pary z udziałem powietrza w pęczku rurowym skraplacza energetycznego. W ramach badań opracowywałem współautorskie modele obliczeniowe bazujące na teorii Nusselta programowane w języku Fortran. W modelach tych wykorzystałem zaprogramowane przez siebie tablice pary wodnej w języku Fortran. Za pomocą modelu opisanego w pracach [Załącznik nr 4, punkt. 4.:2, Załącznik nr 4, punkt. 2.:4] poprzez zastosowanie prawa Daltona, metody Wilkiego oraz określeniu zależności lepkości kinematycznej mieszaniny pary wodnej i powietrza możliwe było określanie parametrów skraplania pary wodnej. Model ten umożliwiał wyznaczanie spadku ciśnienia statycznego, temperatury, prędkości mieszaniny pary i powietrza w modelowym pęczku rurowym. Obliczenia te są nowe, ponieważ model opracowano tak, aby w parze wodnej można było założyć obecność powietrza. Powietrze jest gazem inertywnym (nie skraplającym się) pogarszającym warunki kondensacji pary. Model obliczeniowy [Załącznik nr 4, punkt. 4.:2] pozwala na analizę parametrów termodynamicznych pary i powietrza oraz warunków kondensacji pary i udziału masowego powietrza. W wyniku obliczeń wyznaczono zmiany ciśnienia cząstkowego pary i powietrza, temperatury mieszaniny, prędkość oraz ciepło skraplania pary wodnej w kolejnych rzędach rur skraplacza. Obliczono również parametry mające wpływ na intensywność procesu kondensacji jak liczba Reynoldsa, liczba Nusselta oraz współczynnik przejmowania ciepła.

ad. 7.3.

W ramach zleceń [05/56/RPJK/4997], oraz [05/56/RPJK/4997] opracowałem model niestacjonarnego przepływu ciepła w ścianie cylindrycznej silnika. Model ten dedykowany jest dla nowego typu silnika z izolowaną komorą spalania i posłużył do zaprojektowania i optymalizacji geometrii nowego typu silnika agregatowego. Konstrukcja tego silnika składa się z wielu innowacyjnych rozwiązań (zastrzeżonych patentami i zgłoszeniami patentowymi) którymi są:

- silnik, który nie posiada konwencjonalnego układu korbowego,
- parametry pracy silnika, które umożliwią spalanie niskokalorycznych paliw gazowych.

Ze względu na kontrolowany ruch tłoka przewiduje się znacznie większą sprawność silnika w porównaniu do konstrukcji silników agregatowych pracujących obecnie.

Model opracowałem w środowisku FreeFem++ o otwartym kodzie bazującym na metodzie elementu skończonego. W modelu rozwiązywałem równania różniczkowe opisujące przepływ ciepła w postaci wariacyjnej z niestacjonarnymi warunkami brzegowymi. Uwzględniłem zmienność współczynników przewodzenia ciepła materiałów z których wykonane są elementy korpusu silnika w funkcji temperatury. Model umożliwia symulację niestacjonarnych pól temperatury występujących podczas nagrzewania korpusu silnika oraz jego ustabilizowanej pracy dla różnych geometrii korpusu z możliwością uwzględnienia izolacji komory spalania. W modelu uwzględniłem ruch tłoka, zmienność temperatury gazu w cylindrze oraz zmienność zastępczego współczynnika przejmowania ciepła od gazów do ścianki wewnętrznej korpusu w cyklu pracy silnika.

ad. 7.4.

Biorąc udział w grantie nr POIR.01.01.01-00-0327/15 wykonałem obliczenia wariantowe CFD uszczelnienia szczelinowego tłok-cylinder. Obliczenia dotyczyły nowej konstrukcji silnika z tzw. wolnym tłokiem, który charakteryzuje się tym, że nie posiada konwencjonalnego układu korbowego. Konstrukcja silnika zakładała minimalizację sił wywieranych przez tłok na ścianki tulei. Założenie to umożliwia zastosowanie bardzo małych luzów pomiędzy tłokiem, a cylindrem. W obliczeniach założyłem wartości luzu promieniowego w zakresie od 0.05 do 0.1 mm. Dla tego zakresu luzów spodziewano się występowanie dużych naprężeń stycznych na ściankach uszczelnienia wywieranych przez gaz. Geometria uwzględniona w obliczeniach charakteryzuje się bardzo małą wysokością szczeliny o wielkości w skali Kołmogorowa.

W analizie wykonałem obliczenia stacjonarne typu RANS, posłużyłem się schematem 'upwind' dającym stabilne rozwiązania. Zastosowałem model turbulencji $k-\omega$.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskałem liniową zależność przecieku od zmiany ciśnienia całkowitego przed uszczelnieniem oraz liniową zależność przecieku od wysokości szczeliny uszczelnienia. Uzyskane wyniki stanowiły podstawę do określenia geometrii koncepcyjnego silnika.

ad. 7.5.

W ramach prac zleconych przez firmę Filen [Załącznik nr 4, punkt. II.15.:4] wykonałem obliczenia wariantowe uszczelnienia szczelinowego układu tłok-cylinder za pomocą modelu jednowymiarowego. W tego typu uszczelnieniach przeciek ograniczają naprężenia styczne pomiędzy przepływającym gazem, a ściankami uszczelnienia. Dla takiej geometrii uszczelnienia wykorzystałem metodę Salzmanna i Fraviego. Metoda ta charakteryzuje się możliwością wyznaczenia przecieku dla przepływów podkrytycznych, okołokrytycznych i nadkrytycznych. Obliczenia wykonałem dla uszczelnienia o długości od 20 do 40 mm i wysokości szczeliny promieniowej w zakresie od 0.02 do 0.05 mm. Przeanalizowałem wpływ ciśnienia oraz temperatury początkowej na przeciek.

ad. 7.6.

W ramach zlecenia [Załącznik nr 4, punkt. II.15.:5] dla firmy Filen wykonałem obliczenia dla wielu wariantów geometrii uszczelnienia labiryntowego tłok-cylinder. Do obliczeń wykorzystałem metodę Scharrera, którą przetestowałem i opisałem w pracy [4]. Metoda ta charakteryzuje się dobrą dokładnością w wyznaczaniu optymalnej podziałki (liczby ząbków) uszczelnienia pod względem przecieku przy założonych wymiarach zewnętrznych. Obliczenia wykonałem dla uszczelnienia, które może być zastosowane w silniku tłokowym. Jest to uszczelnienie o małych wymiarach komór i małej grubości ząbków. W tego typu uszczelnieniach jest intensywne zjawisko przenoszenie energii kinetycznej. Wykonane obliczenia wariantowe umożliwiły wyznaczenie geometrii o minimalnym przecieku.

ad. 7.7.

Dla firmy Mipol prowadziłem badania wdrożeniowe nad nowym typem uszczelnień ochronnych stosowanych w obudowach łożysk tocznych zamontowanych w elementach podajników taśmowych pracujących w powietrzu o dużym zapyleniu. Badane uszczelnienia zapobiegają przepływowi powietrza do łożysk tocznych, w celu nie dopuszczenia do zabrudzenia, a w efekcie zatarcia.

W ramach tych prac wykonałem badania eksperymentalne przepływu powietrza dla małych spadków ciśnienia dla siedmiu geometrii uszczelnień firmy Mipol.

Badania eksperymentalne wykonałem na stanowisku badawczym z zamontowanymi adapterami umożliwiającymi podłączenie badanych uszczelnień.

W ramach badań porównano strumień masy powietrza przepływający przez uszczelnienia dla niskich spadków ciśnienia. Efektem analiz było wypracowanie sposobu zmiany geometrii uszczelnień w celu uzyskania lepszej szczelności.

W tym zagadnieniu również recenzowałem prace [Załącznik nr 4, punkt. 13.:c].

Przed uzyskaniem stopnia doktora:

- Miesięczny staż przemysłowy w Elektrociepłowni Karolin w ramach projektu 'Wielkopolski inżynier w Europejskiej przestrzeni badawczej'
- Stypendium Wojewódzkiego Urzędu Pracy dla najlepszych doktorantów w ramach projektu „Wsparcie stypendialne dla doktorantów na kierunkach uznanych za strategiczne z punktu widzenia rozwoju Wielkopolski” – Poddziałanie 8.2.2 PO KL
- Tuż po studiach magisterskich pracowałem w firmie Energopiec na stanowisku asystenta projektanta.

Tabela 2 Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze nie wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Rodzaj dorobku		Łącznie	Liczba punktów MNiSW
1	Monografia		
2	Publikacje naukowe w czasopismach indeksowanych w JCR (lista A MNiSW)	1	140
3	Publikacje naukowe w czasopismach indeksowanych w bazie Scopus i inne	1	13 *40
4	Publikacje naukowe w czasopismach indeksowanych (lista B MNiSW)	2	12
5	Patenty		
6.	Zgłoszenia patentowe	2	
6	Publikacje łącznie	6	170 *192
7	Sumaryczny IF		3.488
8	Sumaryczny IF-5		3.893

* punktacja według aktualnej listy MNiSW

Damian Joachimiak