

AUTOREFERAT
**Modelowanie matematyczne kotłów parowych ze
szczególnym uwzględnieniem przegrzewaczy pary**

Dr inż. Marcin Trojan

Institut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Krakowska
Al. Jana Pawła II 37
31-864 Kraków

1. Imię i nazwisko: Marcin Trojan
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

2010 stopień naukowy *doktora nauk technicznych*, z dyscypliny naukowej Budowa i Eksploatacja Maszyn specjalność: Maszyny i Urządzenia Energetyczne uzyskany na Politechnice Krakowskiej, Wydział Mechaniczny Tytuł rozprawy doktorskiej: Identyfikacja stopnia zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych kotła parowego (promotor Prof. dr hab. inż. Jan Taler),

2007 tytuł *Auditora wewnętrznego systemu zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy*. studia podyplomowe w zakresie „Zarządzanie Bezpieczeństwem i Higieną Pracy”, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny.

2005 tytuł *magistra inżyniera* z dyscypliny naukowej Mechanika i Budowa Maszyn w zakresie specjalności Energetyka, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Pomiary prędkości i strumienia masy płynu (promotor Prof. dr hab. inż. Jan Taler).

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

od 2016 - adiunkt w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Krakowskiej

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

- 4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego:

Modelowanie matematyczne kotłów parowych ze szczególnym uwzględnieniem przegrzewaczy pary

- 4.2. Osiągnięcia naukowe – złożone z jednotematycznego cyklu publikacji naukowych, patentu oraz oryginalnego osiągnięcia technicznego:

- a) Monografia

[1] Trojan M., *Nonlinear mathematical model of a steam boiler with natural circulation*, Wydawnictwo Naukowe Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2017, ISBN 978-83-7242-931-5, liczba stron 147

- b) Artykuły z listy A MNiSW, tj., indeksowanych w Journal Citation Reports (lista filadelfijska)

[2] Dierwa P., Trojan M., Taler D., Kamińska K., Taler J., Optimum Heating of Thick-Walled Pressure Components Assuming a Quasi-steady State of Temperature Distribution, *Journal of Thermal Science* (2016) 25, pp. 380–388, ISSN 1993-033X
Punktacja MNiSW: 15 pkt (IF = 0.401, IF-5 = 0.448)

[3] Trojan M., Taler D., Thermal simulation of superheaters taking into account the processes occurring on the side of the steam and flue gas, *Fuel*, Volume 150, 15 June 2015, ISSN 0016-2361, pp. 75–87
Punktacja MNiSW: 40 pkt (IF = 3.611, IF-5 = 4.140)

- [4] Taler J., Węglowski B., Taler D., Sobota T., Dzierwa P., Trojan M., Madejski P., Pilarczyk M., Determination of start-up curves for a boiler with natural circulation based on the analysis of stress distribution in critical pressure components. *Energy* 92 (2015), ISSN 0360-5442, pp. 153-159
Punktacja MNiSW: 45 pkt (IF = 4.292, IF-5 = 4.810)
- [5] Taler D., Trojan M., Taler J., Mathematical Modeling of Cross-Flow Tube Heat Exchangers With a Complex Flow Arrangement, *Heat Transfer Engineering* 35 (14-15), 2014, ISSN 1521-0537, pp 1334-1343
Punktacja MNiSW: 25 pkt (IF = 0.814, IF-5 = 0.918)
- [6] Taler D., Trojan M., Taler J., Mathematical modelling of tube heat exchangers with complex flow arrangement, *Chemical and Process Engineering*, Vol. 32, 2011, No. 1, ISSN 0208-6425, pp. 7-19
Punktacja MNiSW: 15 pkt

c) **Artykuły z listy B MNiSW**

- [7] Taler J., Trojan M., Taler D., Dzierwa P., Kaczmarski K., Liszka M., Enhancement of power unit flexibility using pressure accumulation of hot water, *Rynek Energii*, Nr 1(128), 2017, ISBN 1425-5960, pp. 78-86
Punktacja MNiSW: 11 pkt
- [8] Trojan M., Computer modeling of a convective steam superheater, *Archives of Thermodynamics* 2015, Vol. 36, No. 1, pp 125-137
Punktacja MNiSW: 13 pkt
- [9] Trojan M., Taler J., Effect of scale deposits on the internal surfaces of the tubes on the superheater operation, *Archives of Thermodynamics*, Vol. 34 (2013), No. 4, ISSN 2083-6023, pp. 73-91
Punktacja MNiSW: 8 pkt
- [10] Taler J., Dzierwa P., Trojan M., Projektowanie, eksploatacja i monitorowanie kotłów o parametrach nadkrytycznych, *Rynek Energii*, nr 5 (108) 2013, ISSN 1425- 5960, str. 34 – 42
Punktacja MNiSW: 9 pkt

d) **Referaty z konferencji ASME ujęte w Web of Science**

- [11] Trojan M., Taler D., Taler J., Dzierwa P., Modeling of superheater operation in a steam boiler, *Proceedings of the ASME 2014 Power Conference, Technical Program Chair: Mike Smiarowski, POWER2014*, July 28-31, Baltimore, Maryland, USA, 2014, 15 pages
Punktacja MNiSW: 15 pkt (Indeksowane w Bazie Web of Science)
- [12] Dzierwa P., Taler D., Taler J., Trojan M., Optimum heating of thick wall pressure components of steam boilers, *Proceedings of the ASME 2014 Power Conference. Technical Program Chair: Mike Smiarowski, POWER2014*, July 28-31, Baltimore, Maryland, USA, 2014, 9 pages
Punktacja MNiSW: 15 pkt (Indeksowane w Bazie Web of Science)

e) Książki zagraniczne

[13] Taler J., Dzierwa P., Taler D., Jaremkiwicz M., Trojan M., *Materials Science and Technologies: Monitoring of Thermal Stresses and Heating Optimization Including Industrial Applications*, Nova Science Publishers, Inc., 2016, ISBN: 978-1-63485-367-5
Punktacja MNiSW: 25 pkt

[14] Taler J., Trojan M., Taler D., *Monitoring of Ash Fouling and Internal Scale Deposits in Pulverized Coal Fired Boilers*, Nova Science Publishers, Inc., New York 2011, Hauppauge, USA, 2011, ISBN: 978-1-61122-043-8
Punktacja MNiSW: 25 pkt

f) Rozdział w książce zagranicznej

[15] Taler D., Trojan M., Taler J., Rozdział 13: Numerical Modeling of Cross-Flow Tube Heat Exchangers with Complex Flow Arrangements, w książce pod redakcją A. Ahsana, *Evaporation, Condensation and Heat Transfer*, InTech, Rijeka 2011, pp. 261-278
Punktacja MNiSW: 5 pkt

g) Projekty naukowo - badawcze

[16] M-9/494/2013, Poprawa własności dynamicznych kotłów parowych – prace przygotowawcze dla EDF Rybnik”, data rozpoczęcia: 09.08.2013 data zakończenia: 07.02.2014, Zleceniodawca: Politechnika Wroclawska Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Wrocław, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27.

[17] M-9/238/2015/P, Poprawa elastyczności pracy parowych bloków energetycznych, data rozpoczęcia: 09.04.2015 data zakończenia: 30.09.2016, Zleceniodawca: EDF Polska S.A.

[18] Projekt badawczy „The system for monitoring the fouling of the boiler furnace chamber, superheaters, reheaters, and other heating surfaces (FOULING INSPECTOR)” („System monitorowania zanieczyszczenia komory paleniskowej, przegrzewaczy i innych powierzchni ogrzewalnych w kotle (FOULING INSPECTOR”)), projekt finansowany przez EDF (Électricité de France), Politechnika Krakowska, Umowa nr M-9/491/2012/P, czas realizacji: 11.09.2012 - 30.12.2013 – wykonawca

4.3. Omówienie prac wchodzących w skład głównego osiągnięcia naukowego:

Przedstawiony do oceny dorobek naukowy, wchodzący w skład głównego osiągnięcia naukowego, obejmuje:

- Monografię habilitacyjną
- 5 artykułów z listy A MNiSW, tj., indeksowanych w Journal Citation Reports (lista filadelfijska)
- 4 artykuły z listy B MNiSW
- 2 referaty z konferencji ASME ujęte w Web of Science
- 2 książki zagraniczne
- 1 rozdział w książce zagranicznej
- 3 projekty naukowo – badawcze realizowane na zlecenie EDF Polska S.A.

Główne osiągnięcie naukowe obejmuje następujące grupy tematyczne:

- a) opracowanie metody numerycznej do modelowania przegrzewaczy pary kotłów w stanach ustalonych i nieustalonych
- b) opracowanie numerycznego nieliniowego modelu matematycznego kotła parowego, umożliwiającego symulację pracy kotła w różnych warunkach
- c) opracowanie nowej, eksperymentalno-numerycznej metody do wyznaczania średniego stopnia zanieczyszczenia komory paleniskowej i poszczególnych stopni przegrzewacza pary w trybie on-line
- d) analiza wpływu stopnia zażużlowania ścian komory paleniskowej i zanieczyszczenia popiołem poszczególnych stopni przegrzewacza pary na parametry pracy kotła przy zastosowaniu opracowanego modelu matematycznego kotła
- e) analiza wpływu osadów na wewnętrznych powierzchniach rur przegrzewacza na zmianę temperatury pary i ścianek rur oraz przejmowany strumień ciepła
- f) analiza wpływu nierównomierności temperatury spalin na pracę przegrzewaczy pary
- g) modelowanie CFD (Computational Fluid Dynamics) komory paleniskowej kotła i przegrzewaczy pary
- h) poprawa elastyczności kotłów parowych

Monografia habilitacyjna jest rozszerzeniem i podsumowaniem najważniejszych publikacji habilitanta. Omówiono w niej szczegółowo przeprowadzone analizy numeryczne i badania.

Ad a) Jestem współautorem metody numerycznej modelowania przegrzewaczy pary kotłów w stanach ustalonych i nieustalonych, w ramach której opracowane zostały modele matematyczne o parametrach rozłożonych wymienników wysokotemperaturowych w kotłach [1, 3, 5, 6, 9, 11, 14, 15, 18]. Opracowane modele matematyczne pozwalają na symulację pracy wymienników o złożonych układach przepływowych, takich jak przegrzewacze o współprądowo-krzyżowym, przeciwprądowo-krzyżowym i mieszanym przepływie czynników, umożliwiając obliczenie temperatury ścianek rur. Z uwagi na wysoką temperaturę spalin dochodzącą do około 1100°C oraz na obecność w spalinach gazów trójatomowych, takich jak dwutlenek węgla i para wodna, uwzględniono po stronie spalin wymianę ciepła przez promieniowanie [1, 14, 18]. W modelach przegrzewaczy uwzględniono także obecność osadów na wewnętrznych powierzchniach rur po stronie pary (kamienia kotłowego), jak i obecność osadów popiołowych na zewnętrznych powierzchniach rur od strony spalin [1, 9, 11]. Opracowana metoda modelowania przegrzewaczy pary kotłów może być użyta do modelowania ich pracy z uwzględnieniem nierównomierności rozkładu temperatury spalin w przekroju kanału spalinowego [1, 11]. Ponadto zmiany w konstrukcji przegrzewacza, w tym zwiększanie lub zmniejszanie jego powierzchni, mogą być łatwo analizowane.

Proponowana metoda modelowania numerycznego przegrzewaczy pary może być skutecznym narzędziem w projektowaniu, eksploatacji i modernizacji przegrzewaczy pary i podgrzewaczy wody umieszczonych w części konwekcyjnej kotła. Jeśli temperatura pary na wylocie przegrzewacza jest zbyt niska lub zbyt wysoka, można osiągnąć zaprojektowaną temperaturę wylotową pary zmieniając układ przepływowy przegrzewacza.

Opracowana metoda modelowania numerycznego przegrzewaczy pary może być również użyteczna w badaniu mechanizmów osadzania się popiołu i kamienia kotłowego na powierzchniach rur, ponieważ temperatury pary, spalin i ścianek rur, które odgrywają istotną rolę w analizie procesów narastania osadów, są znane wzdłuż ścieżek przepływu pary i spalin.

Ad b) W oparciu o wyprowadzone równania bilansowe opracowałem model matematyczny komory paleniskowej oraz modele matematyczne o parametrach rozłożonych wszystkich stopni przegrzewacza pary i podgrzewacza wody z uwzględnieniem rzeczywistych układów przepływowych czynników. Do wyznaczania temperatury spalin i powietrza za poszczególnymi stopniami podgrzewacza powietrza zastosowano metodę ϵ -NTU [1].

Wymianę ciepła w komorze paleniskowej symulowano za pomocą modelu zakładającego, że temperatura spalin w całej komorze paleniskowej jest stała. Modelowano tylko radiacyjną wymianę ciepła do ścian szczelnych kotła. Kolejność usytuowania poszczególnych stopni przegrzewacza pary wzdłuż drogi przepływu spalin jest inna niż kolejność przepływu pary [1]. Pierwszy stopień przegrzewacza, z uwagi na kierunek przepływu pary, usytuowany jest jako ostatni, biorąc pod uwagę kierunek przepływu spalin. Jako pierwszy za komorą paleniskową znajduje się przegrzewacz grodziowy, następnie drugi i trzeci stopień przegrzewacza pary, na końcu pierwszy stopień przegrzewacza pary. Za pierwszym stopniem przegrzewacza pary usytuowany jest w kanale spalinowym dwustopniowy podgrzewacz wody.

który znajduje się już w drugim ciągu. Ostatnią powierzchnią ogrzewalną w kanale spalinowym jest rurowy trzystopniowy podgrzewacz powietrza. Z uwagi na takie usytuowanie powierzchni ogrzewalnych kotła oraz nieliniową wymianę ciepła niezbędne są obliczenia iteracyjne temperatury pary, spalin i powietrza.

Znajomość strumieni ciepła przejmowanych przez poszczególne stopnie przegrzewacza pary, które są obliczane jako strumień masy pary przepływającej przez dany stopień przegrzewacza pomnożony przez przyrost entalpii pary w tym przegrzewaczu, umożliwia sprawdzenie poprawności obliczania temperatury pary na wylocie z kotła. Na podstawie temperatury spalin mierzonej za podgrzewaczem powietrza wyznacza się kolejno temperaturę spalin przed podgrzewaczem powietrza, podgrzewaczem wody, pierwszym stopniem przegrzewacza pary, drugim i trzecim stopniem przegrzewacza pary, a następnie przed przegrzewaczem grodziowym. Temperatura spalin przed przegrzewaczem grodziowym jest jednocześnie temperaturą spalin wylotowych z komory paleniskowej.

Model matematyczny kotła przedstawiony w pracy [1] umożliwia wyznaczenie temperatury zewnętrznych i wewnętrznych powierzchni rur oraz zanieczyszczeń zewnętrznych dla wszystkich powierzchni ogrzewalnych kotła.

Opracowany model matematyczny kotła może zostać wykorzystany do symulacji pracy kotła przy różnych wydajnościach, paliwach, współczynnikach nadmiaru powietrza. Może zostać również użyty do prawidłowego zaprojektowania poszczególnych stopni przegrzewacza pary tak, aby uzyskać zadane temperatury za poszczególnymi stopniami. Dzięki temu, że wyznaczana jest lokalna temperatura ścianek rur zarówno w kierunku przepływu pary jak i w kierunku promieniowym, można dobrać odpowiedni gatunek stali na dany stopień przegrzewacza pary. Jest to bardzo ważne z uwagi na wysokie ceny stali stopowych. Aby uniknąć niepotrzebnego stosowania stali wysokostopowych stosuje się zwykle najtańszą stal, która wytrzyma daną temperaturę.

Model matematyczny umożliwia również prawidłowe dobranie parametrów pracy kotła (np. strumienia masy paliwa i współczynnika nadmiaru powietrza) przy spalaniu biomasy lub współspalaniu biomasy, odpadów komunalnych lub innych paliw z węglem. Zwykle wartość opałowa takiego paliwa jest niższa i kocioł nie osiąga znamionowej wydajności masowej. Nie osiągnięta jest także temperatura pary na wylocie z kotła. Dzięki zastosowaniu opracowanego modelu nieliniowego można obliczyć strumień masy pary produkowanej przez kocioł i tak dobrać współczynnik nadmiaru powietrza na wylocie z kotła, aby osiągnąć znamionową temperaturę pary przegrzanej. Można również wyznaczyć wartość poszczególnych strat i obliczyć rzeczywistą sprawność kotła, zwykle znacznie niższą niż przy spalaniu paliwa o projektowej wartości opałowej.

Opracowany model może być zastosowany do obliczeń projektowych i eksploatacyjnych kotłów parowych. W przypadku obliczeń eksploatacyjnych wyznaczany jest średni stopień zażużlowania ścian komory paleniskowej oraz zanieczyszczenia popiołem poszczególnych stopni przegrzewacza pary. W przypadku obliczeń projektowych bardzo istotna jest znajomość temperatury ścianki. Znajomość temperatury metalu przy różnych obciążeniach kotła pozwala prawidłowo dobrać gatunek stali na dany stopień przegrzewacza.

Model matematyczny kotła opracowany w rozprawie [1] umożliwia obliczanie sprawności kotła w trybie on-line. Za pomocą modelu można między innymi analizować spalanie węgla oraz współspalanie węgla z biomasa, odpadami komunalnymi lub osadami ściekowymi oraz wyznaczyć temperaturę ścianek rur, co pozwala uniknąć przegrzewania rur przegrzewacza pary, np. przy niskich obciążeniach kotła. Wykorzystując opracowany model kotła można eksploatować kocioł z wysoką sprawnością sterując strumieniem doprowadzonego do kotła powietrza tak, aby utrzymywać jego sprawność oraz sterować częstotliwością załączania wodnych lub parowych zdmuchiwaczy ścian komory paleniskowej i przegrzewaczy [14, 18]. Zapewnia to wydłużenie trwałości rur kotła i zmniejszenie zużycia pary i wody używanych do czyszczenia powierzchni ogrzewalnych – powierzchnie ogrzewalne czyści się tylko wtedy, gdy są faktycznie zanieczyszczone a nie np. raz na zmianę, jak ma to miejsce w praktyce.

Ad c) W pracach [1, 18] zaproponowana została nowa, eksperymentalno-numeryczna metoda do wyznaczania średniego stopnia zanieczyszczania komory paleniskowej w trybie on-line. Średni stopień zanieczyszczenia komory paleniskowej wyznaczany jest z warunku równości zmierzonego i obliczonego strumienia masy pary z parownika kotła. Strumień masy pary z parownika kotła wyznaczany jest na podstawie pomiaru strumienia masy pary świeżej pomniejszonego o strumień masy wody wtryskiwanej do schładzaczy pary. Na każdym kroku iteracyjnym wyznaczany jest strumień ciepła przejmowany przez parownik od spalin z wykorzystaniem nieliniowego modelu wymiany ciepła w komorze paleniskowej kotła.

Stopień zanieczyszczenia popiołem poszczególnych stopni przegrzewacza wyznaczany jest z warunku równości obliczonego i zmierzonego strumienia ciepła przejmowanego przez dany stopień przegrzewacza od strony pary. Znajomość strumieni ciepła przejmowanych przez poszczególne stopnie przegrzewacza pary umożliwia również sprawdzenie poprawności obliczania temperatury pary na wylocie z kotła.

Dzięki wyznaczaniu na bieżąco stopnia zanieczyszczenia komory paleniskowej oraz poszczególnych stopni przegrzewacza można sterować częstotliwością załączania zdmuchiwaczy żużla i popiołu. Powierzchnie ogrzewalne kotła mogą być oczyszczane tylko wtedy, gdy istnieje taka potrzeba [14]. Obecnie w wielu elektrowniach zarówno ściany komory paleniskowej jak i wybrane powierzchnie przegrzewaczy oczyszczane są np. raz na zmianę, przez co niepotrzebnie zużywane są para, woda oraz energia do ich czyszczenia. Warto zaznaczyć, że poprzez zbyt częste i niepotrzebne czyszczenie powierzchni ogrzewalnych kotła skraca się ich żywotność.

Ad d) Przy zastosowaniu opracowanego modelu matematycznego kotła przeprowadzona została analiza wpływu stopnia zażubrowania ścian komory paleniskowej i zanieczyszczenia popiołem poszczególnych stopni przegrzewacza pary na parametry pracy kotła [1, 14]. Symulowano pracę kotła przy czystych i zanieczyszczonych ścianach komory paleniskowej oraz pracę poszczególnych stopni przegrzewacza pary przy czystych i zanieczyszczonych popiołem powierzchniach rur. Otrzymane wyniki pokazują jaki wpływ na parametry pracy kotła mają zanieczyszczenia jego powierzchni ogrzewalnych. W przykładowej symulacji pracy kotła z zanieczyszczoną komorą paleniskową zanieczyszczone ekrany przejmują mniej ciepła niż w przypadku czystego kotła, a co za tym idzie, kocioł produkuje mniej pary i wzrasta temperatura spalin na wylocie z komory paleniskowej. Wyższa temperatura spalin powoduje, że poszczególne stopnie przegrzewacza pary przejmują więcej ciepła. Z uwagi na mniejszą wydajność kotła przez przegrzewacze przepływa mniej pary, co skutkuje wyższą temperaturą pary przegrzanej na wylocie z kotła (za przegrzewaczem trzeciego stopnia).

W przypadku pracy przegrzewacza pary przy zanieczyszczonych popiołem powierzchniach rur widać wyraźny wzrost temperatury spalin za danym stopniem przegrzewacza, w odniesieniu do temperatury spalin podczas jego pracy przy czystych powierzchniach rur [1, 5, 6, 11, 14, 15]. Zanieczyszczenia popiołowe powodują bowiem zmniejszenie strumienia ciepła przejmowanego przez rury przegrzewacza, co skutkuje również zmniejszeniem temperatury pary na wylocie z danego stopnia przegrzewacza pary, a tym samym zmniejszeniem przyrostu temperatury pary przepływającej przez przegrzewacz. Przeprowadzone obliczenia doskonale pokazują negatywny wpływ zanieczyszczeń popiołowych na pracę przegrzewaczy. Powodują z jednej strony wzrost temperatury spalin za poszczególnymi stopniami przegrzewacza, z drugiej zaś spadek temperatury pary.

Wyniki modelowania numerycznego porównano z wynikami pomiarów przeprowadzonych w elektrowniach [1]. Ich zgodność jest bardzo dobra, co potwierdza poprawność opracowanego modelu matematycznego kotła.

Ad e) Osady na wewnętrznych powierzchniach rur tworzą się w wyniku odkładania się kamienia kotłowego i produktów korozji na wewnętrznej powierzchni rur. Utlenianie wewnętrznej powierzchni rur występuje w szczególności w kotłach o parametrach nadkrytycznych. Tworząca się warstwa tlenków żelaza często odpada od powierzchni rur i może powodować zatykanie rur lub uszkodzenia turbiny. Przy zastosowaniu opracowanej metody modelowania matematycznego przegrzewacza pary przeprowadzona została analiza wpływu osadów na wewnętrznych powierzchniach rur przegrzewacza na zmianę temperatury pary i ścianek rur oraz przejmowany strumień ciepła [1, 3, 11]. Współczynnik wnikania ciepła na wewnętrznych, zanieczyszczonych kamieniem kotłowym powierzchniach rur jest większy od współczynnika wnikania ciepła na wewnętrznych powierzchniach czystych rur. Dzieje się tak, ponieważ prędkość pary wzrasta ze względu na mniejszą średnicę wewnętrzną. Otrzymane wyniki pokazują, że zanieczyszczenia na wewnętrznych powierzchniach rur mają duży wpływ na temperaturę pary. Dla przegrzewacza z zanieczyszczonymi rurami, temperatura pary na wylocie z przegrzewacza jest o około 25 K niższa niż dla przegrzewacza z czystymi rurami. Strumień ciepła przepływający od spalin do pary maleje, zwiększając maksymalną temperaturę metalu, co z kolei może prowadzić do przegrzania materiału rurowego. Względny spadek mocy cieplnej przegrzewacza wynosi 15,55%.

Ad f) Przy zastosowaniu opracowanej metody modelowania matematycznego przegrzewacza pary przeprowadzona została analiza wpływu nierównomierności rozkładu temperatury spalin na pracę przegrzewacza pary [1, 3, 11]. W kolektorze wlotowym przegrzewacza strumień pary podzielony zostaje na kilka równoległych rur. Para przepływając przez rury zostaje podgrzana przez przepływające spaliny, następnie wpada do kolektora wylotowego, gdzie ulega zmieszaniu.

Z kolektora wylotowego para przepływa do kolejnego stopnia przegrzewacza. W rzeczywistych przegrzewaczach pary często występuje nierównomierne ogrzewanie rur spowodowane wyższą prędkością i temperaturą spalin w centralnej części kanału spalinowego. Podczas pracy kotła tworzą się osady popiołowe na zewnętrznej powierzchni rur w środkowej części przegrzewacza zmniejszając przepływ spalin. W wyniku tego zmniejsza się temperatura pary w środkowej części przegrzewacza, natomiast rośnie w kierunku ścianki kanału spalinowego, ponieważ spaliny przepływają przez wolny przekrój poprzeczny. Wpływ nierównomiernego nagrzewania równoległych rur przegrzewacza

na rozkład przepływu i temperatury pary często jest ignorowany. Nadmierne nagrzewanie niektórych rur zmniejsza przepływ masowy płynu przepływającego przez te rury. Może to spowodować przegrzanie materiału rurowego. Podczas modelowania numerycznego pracy przegrzewacza przyjęto, że niektóre jego rury znajdują się w strefie podwyższonych temperatur spalin. Ponadto przyjęto, że różnica ciśnienia pary między wlotowym a wylotowym kolektorem przegrzewacza jest stała. Najpierw przeprowadzono obliczenia przegrzewacza dla równomiernej temperatury spalin w przekroju poprzecznym kanału, a następnie z uwzględnieniem nierównomierności rozkładu temperatury spalin. Analizując wyniki można zauważyć, że w przypadku nierównomierności temperatury spalin, temperatura pary na wylocie z przegrzewacza wzrosła w porównaniu z pary wyznaczoną dla przypadku równomiernej temperatury spalin w przekroju poprzecznym kanału. Spadek ciśnienia po stronie pary jest większy, gdy wzrasta temperatura spalin. Wynika to z wyższej objętości właściwej pary przegrzanej, co z kolei powoduje, że prędkość pary jest większa, ponieważ przepływ masowy jest stały. Spadek ciśnienia pary w ogrzewanej i nieogrzewanej rurze przegrzewacza powinien być taki sam, ponieważ w obu rurach para przepływa równolegle. Przy założeniu, że liczba rur ogrzewanych spalinami o wyższej temperaturze jest mniejsza niż liczba pozostałych rur można przyjąć, że spadek ciśnienia pomiędzy wlotowym i wylotowym kolektorem nie zmienia się. Aby uzyskać taką samą różnicę ciśnień jak w przypadku równomiernej temperatury spalin w przekroju poprzecznym kanału, należy zmniejszyć strumień przepływającej pary przez bardziej ogrzewaną rurę. Spadek strumienia przepływającej pary w nadmierze ogrzewanej rurze przyczynia się do wzrostu temperatury pary przegrzanej. Wadą przegrzewaczy pary jest brak zdolności do samoregulacji. Z punktu widzenia bezpieczeństwa rur przegrzewacza należałoby zwiększyć przepływ pary przegrzanej przez rurę bardziej ogrzewaną, aby zapewnić jej lepsze chłodzenie, gdy temperatura spalin wzrasta. Przeprowadzone badania pokazują jednak, że przy wzroście temperatury spalin strumień masy pary spada o kilka procent, podczas gdy w rurach mniej ogrzewanych strumień masy pary jest większy.

Ad g) Szybki rozwój metod CFD (Computational Fluid Dynamics) umożliwia ich zastosowanie do modelowania wymiany ciepła w wymiennikach z uwzględnieniem rzeczywistej budowy. Rozkłady temperatur pary i spalin wzdłuż drogi ich przepływu przez przegrzewacz wyznaczone zostały przy wykorzystaniu modelowania CFD w programie ANSYS-CFX [1, 8]. Analiza wymiany ciepła dla zadanych warunków brzegowych pozwoliła także na wyznaczenie rozkładu temperatury pary (z uwzględnieniem warstwy przyściennej) i spalin na wylocie z przegrzewacza oraz rozkładu temperatury na ścianie, wraz z maksymalną jej wartością. Znajomość tych temperatur ma duże znaczenie praktyczne, ponieważ pozwala prawidłowo dobrać gatunek stali na dany stopień przegrzewacza.

Obliczenia CFD przeprowadzono dla powtarzalnego fragmentu przegrzewacza złożonego z jednego rzędu rur w rzeczywistych wymiarach. Na zewnętrznej powierzchni każdej z rur wchodzących w skład rzędu przyjęto warstwę zanieczyszczeń popiołowych o jednakowej grubości i stałym współczynniku przewodzenia ciepła. Współczynnik przewodzenia ciepła dla materiału rur przegrzewacza przybliżony został zależnością wyznaczoną na podstawie danych eksperymentalnych. Spaliny zamodelowane zostały jako mieszanina gazów: N_2 , CO_2 , SO_2 , O_2 oraz H_2O o odpowiednich udziałach masowych i własnościach. Własności pary przegrzanej zdefiniowane zostały przy użyciu biblioteki IAPWS IF97.

W celu zbadania, czy dla przeprowadzonych obliczeń zachowany został bilans energii dla zadanej objętości kontrolnej wyznaczony został przejmowany strumień ciepła od strony spalin i od strony pary. Różnice pomiędzy tymi strumieniami są bardzo małe, co pozwala przyjąć, że bilans energii został zachowany.

W celu zbadania wpływu siatki dobranej dla wybranego powtarzalnego fragmentu przegrzewacza na jakość obliczeń, przeprowadzono również obliczenia dla modelu o siatce zagęszczonej w stosunku do modelu wyżej opisanego. Otrzymane wyniki pokrywały się z wynikami otrzymanymi podczas wcześniejszej symulacji.

Analiza otrzymanych wyników modelowania CFD poprzedzona została przeprowadzeniem ich weryfikacji z wynikami otrzymanymi na podstawie modelowania matematycznego z wykorzystaniem opracowanej metody. Zgodność otrzymanych wyników jest bardzo dobra.

Przeprowadzone zostały również symulacje CFD komory paleniskowej kotła przy użyciu programu ANSYS-CFX [1]. Analiza wymiany ciepła dla zadanych warunków brzegowych pozwoliła określić rozkład temperatury spalin w komorze spalania oraz średnią temperaturę spalin na wylocie z komory paleniskowej. Ponadto wyznaczone zostały rozkłady temperatur w komorze paleniskowej na wybranych wysokościach, począwszy od leja, poprzez poszczególne palniki i wloty powietrza, aż do wylotu z komory paleniskowej, a także wyznaczony został rozkład temperatury spalin wzdłuż wysokości komory paleniskowej w wybranych przekrojach.

Średnia temperatura spalin na wylocie komory spalania obliczona przy użyciu modelu CFD dała doskonałą zgodność ze średnią temperaturą na wylocie z komory spalania określoną przy użyciu opracowanego systemu komputerowego bazującego na modelowaniu matematycznym. Modele CFD mogą być stosowane w obliczeniach projektowych do właściwego doboru kształtu komory spalania lub położenia palników oraz do obliczeń wydajności, w celu określenia

rozkładu temperatury spalin w komorze spalania i emisji szkodliwych substancji. Symulacja CFD dostarcza wiele cennych informacji potrzebnych do projektowania i eksploatacji kotła parowego. Wadą symulacji CFD jest długi czas obliczeń.

Ad h) Przez elastyczność bloku rozumie się zwiększanie szybkości nagrzewania i ochładzania krytycznych elementów kotła, skrócenie czasu rozruchu i wyłączania z ruchu kotła oraz obniżanie mocy bloku w dolinie nocnej oraz podwyższanie obciążenia maksymalnego w godzinach szczytu [16, 17]. W związku z szybkim rozwojem farm wiatrowych, ogniw fotowoltaicznych i innych rozproszonych źródeł energii występują duże wahania wytwarzanej mocy. Gdy w systemie energetycznym występuje niedobór mocy, energia powinna być szybko dostarczona do sieci przez ciepłe bloki energetyczne. Od nowoczesnych bloków energetycznych wymaga się aby moc bloku podwyższać lub obniżać z prędkością 2-8% mocy zainstalowanej na minutę w pełnym zakresie kontroli, tj. od obciążenia minimalnego do maksymalnego. Również rozruch z różnych stanów bloku powinien przebiegać szybko.

Przeprowadzona została analiza możliwości zastosowania ciśnieniowych zasobników gorącej wody do podwyższania elastyczności bloku o mocy 200MW. W okresie tzw. doliny nocnej zasobniki mogą być wykorzystywane do zmniejszenia mocy bloku z uwagi na małe zapotrzebowanie na energię elektryczną. W okresie zmniejszonego zapotrzebowania na energię elektryczną kocioł może pracować z minimalnym dopuszczalnym obciążeniem (na poziomie minimum technicznego kotła), a para jest wykorzystywana do wytwarzania energii elektrycznej i podgrzewania gorącej wody gromadzonej w zasobnikach. W okresie szczytowego zapotrzebowania na energię elektryczną, które zwykle w naszym kraju występuje od godziny 16 do godziny 22, można podwyższyć moc bloku energetycznego. Zamykane są wtedy niskoprężne upusty regeneracyjne dzięki czemu wzrasta nagle moc bloku gdyż większy strumień pary przepływa przez turbinę. Kocioł zasilany jest gorącą wodą zgromadzoną w zasobnikach w okresie nocy.

Zasobniki gorącej wody mogą być wykorzystywane również do napełniania kotła gorącą wodą na początku rozruchu bloku. Zgodnie z metodą optymalnego nagrzewania walczaka kotła, zaproponowaną w pracach [2, 4, 7, 10, 12, 16], parownik kotła łącznie z walczakiem może być zalewany gorącą wodą o temperaturze znacznie wyższej od temperatury początkowej. Gorącą wodą z zasobników ciśnieniowych można zasilać dolne kolektory ścian komory paleniskowej kotła, a wypychaną wodę z parownika kotła można kierować do dolnej części zasobnika ciśnieniowego. Dzięki zastosowaniu zasobników rozruch kotła ze stanu zimnego można przeprowadzić szybciej i bezpieczniej.

Zasobniki ciśnieniowe gorącej wody mogą być również wykorzystywane w układzie automatycznej regulacji częstotliwości i mocy (ARCM) do nagłego podwyższenia mocy bloku. Poprzez zamknięcie upustów regeneracyjnych niskoprężnych i zasilaniu kotła gorącą wodą z zasobników można przez kilka godzin podwyższyć maksymalną moc bloku o ponad 7%.

Należy dodać, że moc osiągalna badanego bloku jest większa, może dochodzić nawet do 225MW przy strumieniu masy pary świeżej wynoszącej 680 – 700 t/h. Wyniki przeprowadzonych analiz można ekstrapolować liniowo do obciążenia większego lub mniejszego.

Elastyczność bloku poprawiona zostanie przez:

- W okresie szczytowego zapotrzebowania na energię, woda z ciśnieniowych zasobników ciepła kierowana będzie do kotła w celu podniesienia mocy bloku.
- W okresie tzw. doliny nocnej blok pracuje przy minimalnym obciążeniu wynoszącym ok. 60% obciążenia nominalnego. Dzięki wprowadzeniu ciśnieniowych zasobników ciepłej wody minimalne obciążenie można obniżyć o ok. 15%, tj. do ok. 51% obciążenia nominalnego
- Czas rozruchu kotła ze stanu zimnego skrócony zostanie z 6 godz. do 3,5 godz.

Zasobniki ciśnieniowe mogą być też wykorzystane do napełniania gorącą wodą parownika kotła w czasie uruchamiania bloku ze stanu zimnego [2, 4, 12]. Przy napełnianiu parownika, a następnie walczaka o temperaturze początkowej T_0 gorącą wodą o temperaturze $T_0 + \Delta T_{cz}$ można w dalszej fazie rozruchu zmniejszyć szybkość nagrzewania walczaka. Przy nieco krótszym czasie rozruchu w porównaniu z czasem otrzymanym na podstawie PN-EN 12952-3, naprężenia na brzegu otworu w połączeniu walczak-rura opadowa nie przekraczają naprężenia dopuszczalnego. W przypadku nagrzewania parownika kotła z prędkościami wyznaczonymi zgodnie z normą PN-EN 12952-3, naprężenia dopuszczalne na części obwodu otworu są przekraczane [2, 4, 7, 12]. Może to prowadzić do szybkiego pojawiania się pęknięć na brzegu otworu rury opadowej. Zaproponowana w pracach [2, 12] metoda rozruchu kotła z zalewaniem parownika kotła gorącą wodą jest bezpieczna. W odróżnieniu od normy PN-EN 12952-3, dopuszczalny jest skokowy wzrost temperatury czynnika w walczaku na początku procesu nagrzewania walczaka. Temperaturę wody w walczaku kotła można podnieść nawet do 100 °C. Dzięki temu można zmniejszyć zużycie mazutu spalanego w kotle w pierwszej fazie jego rozruchu, gdyż temperaturę czynnika podnosi się od temperatury 100°C do temperatury znamionowej 315°C, a nie od 20°C do 315°C.

Wyniki obliczeń ekonomicznych wskazują, że dla przyjętych założeń dotyczących m.in. pracy bloku i uśrednionych godzinowych cen sprzedaży elektryczności w "szczycie" i w okresie "doliny" zapotrzebowania na elektryczność proponowana inwestycja cechuje się wysoką, jak na inwestycje w tej kategorii obiektach, opłacalnością. Należy jednak zwrócić uwagę, że wynik ekonomiczny przedsięwzięcia w wysokim stopniu zależy od relacji cen sprzedaży energii elektrycznej pomiędzy okresem "dolinowym" i "szczytowym". Jak wykazują wyniki analizy wrażliwości przy niewielkich różnicach cen w tych okresach doby inwestycja może stać się nieopłacalna. Próg rentowności wyrażony ceną sprzedawanej energii elektrycznej „szczytowej” wynosi 240 PLN/MWh.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowych – badawczych

5.1. Publikacje naukowe

Habilitant jest autorem 1 monografii i 7 prac naukowo badawczych (w tym 2 rozdziałów w Encyclopedii Thermal Stresses wydawnictwa Springer) oraz współautorem 54 prac naukowo-badawczych (w tym: publikacji z listy filadelfijskiej o sumarycznym wskaźniku Impact Factor 9.118, Impact Factor-5-letni 10.316, 2 monografii zagranicznych wydawnictw, 9 rozdziałów w monografiach zagranicznych wydawnictw, 7 rozdziałów w monografiach krajowych wydawnictw).

5.1.1. Statystyka publikacji

Podsumowanie publikacji naukowo-badawczych habilitanta

Okres doktoratu :

Prace związane z moim doktoratem pt. „Identyfikacja stopnia zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych kotła parowego” wykonywałem w latach 2006 – 2010 i dotyczyły one problemów monitorowania w trybie on-line sprawności kotła, monitorowania procesów przeplywowo-ciepłnych zachodzących w kotle oraz monitorowania zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych kotła i wymienników ciepła. W pracy doktorskiej zaprezentowałem system monitorowania narastania osadów w paleniskach kotła i przegrzewaczach pary. W przypadku opalania węglem, stosunkowo mała ilość popiołu powoduje problemy z odkładaniem się zanieczyszczeń na powierzchniach ogrzewalnych kotłów. Żużel i osady popiołowe odkładają się zazwyczaj na ścianach komory paleniskowej oraz przegrzewaczach grodziowych. Zmusza to użytkowników kotłów do częstego oczyszczania ścian komór paleniskowych i rur przegrzewaczy. Warunki zażużlowania i zanieczyszczenia stanowią krytyczne czynniki wpływające na efektywność cieplną i dyspozycyjność komory spalania i przegrzewaczy w kotle. Żużel i zanieczyszczenia popiołowe mogą odkładać się równomiernie na całej powierzchni ogrzewalnej kotła lub lokalnie, tworząc często nawisy o dużej masie. Zanieczyszczenia prowadzą do obniżenia sprawności kotła, podwyższania lub obniżania temperatury pary za poszczególnymi stopniami przegrzewacza oraz zmniejszania strumienia masy pary wytwarzanej w kotle.

Stan kotła charakteryzujący się czystymi powierzchniami ścian komory paleniskowej i przegrzewacza jest bardzo pożądanym z uwagi na duży strumień masy pary produkowanej przez kocioł przy wysokiej jego sprawności.

Opracowany komputerowy układ do oceny stopnia zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych kotła pozwala na realizację obliczeń ciepłino-przeplywowych energetycznego kotła parowego w trybie on-line. Wyniki pomiarów temperatury, ciśnienia, przepływu oraz analiza składu spalin wykorzystywane są do prowadzenia analizy wymiany ciepła w komorze paleniskowej i części konwekcyjnej kotła. Okresowo wprowadzana jest wartość opałowa paliwa oraz zawartość części palnych w żużlu i lotnym popiele. Na podstawie zmierzonych i wprowadzonych wielkości wyznaczane są na bieżąco takie parametry jak: sprawność kotła, współczynnik sprawności cieplnej ekranów, stopień zanieczyszczenia parownika i przegrzewaczy oraz temperatura spalin na wylocie z komory paleniskowej. Sprawność kotła wyznaczana jest metodą pośrednią.

Oprócz globalnych wskaźników zanieczyszczenia charakteryzujących zanieczyszczenie wszystkich ścian komory paleniskowej oraz wszystkich stopni przegrzewacza monitorowane jest lokalne obciążenie cieplne ścian komory

paleniskowej za pomocą wstawek termometrycznych. Wstawki umożliwiają niezawodną rejestrację spadku lokalnego obciążenia cieplnego, gdy na ścianach komory paleniskowej odkłada się żużel. Przejmowany strumień ciepły (obciążenie cieplne) wyznaczane jest na podstawie pomiaru temperatury wstawki w czterech punktach usytuowanych w czołowej jej części. Temperatura mierzona jest za pomocą czterech termoelementów Ni-NiCr umieszczonych w otworach równoległych do osi wstawki, tak aby uniknąć błędów spowodowanych przewodzeniem ciepła wzdłuż osi termoelementów. Przy takim położeniu otworów temperatura termoelementu na całej długości otworu jest stała i ciepło nie dopływa ani nie odpływa od punktu, w którym mierzona jest temperatura. Termoelementy wyprowadzone są na zewnątrz z tyłu rury.

Ocena stanu zużycia komory paleniskowej kotła oraz zanieczyszczenia jego powierzchni ogrzewalnych, obejmująca również optymalizację pracy zdmuchiwalcy parowych może być wykonywana w oparciu o pomiary standardowo realizowane przez układ AKiP elektrowni.

Pomiary w trybie on-line odkładania się osadów popiołu mogą być wykorzystane do sterowania pracą zdmuchiwalcy żużla w komorze paleniskowej i zdmuchiwalcy popiołu w przegrzewaczach pary. Zdmuchiwalce w kotłach często uruchamiane są w stałych odstępach czasowych, przy czym odstęp czasowy między kolejnymi zdmuchiwaniami jest dobierany na podstawie bliżej nieokreślonych kryteriów. W badanym kotle o wydajności 210 t/h zdmuchiwalce żużla i popiołu włączane były w stałych odstępach czasowych równych 8 godzin. Tak częste uruchamianie zdmuchiwalcy, jak pokazują przeprowadzone badania, jest niepotrzebne. W wyniku zbyt częstego uruchamiania zdmuchiwalcy występują straty wody lub pary używanej do zdmuchiwania, następuje przyspieszone zużycie erozyjne rur ścian komory paleniskowej i przegrzewacza oraz zwiększone zużycie oleju opałowego używanego do stabilizacji spalania pyłu węglowego w czasie przeprowadzania zdmuchiwania żużla i popiołu. Uruchamianie zdmuchiwalcy na podstawie informacji podawanych przez układ komputerowy prowadzi do zwiększenia sprawności kotła i obniżenia kosztów związanych ze zużyciem paliwa na wyprodukowanie 1 kWh energii elektrycznej. Dzięki uruchamianiu zdmuchiwalcy tylko wtedy, gdy zachodzi potrzeba wydłużona zostaje trwałość rur parownika i przegrzewacza kotła. Rezygnując ze stałych cykli czasowych uruchamiania zdmuchiwalcy, częstotliwość włączania zdmuchiwalcy żużla i popiołu może być zoptymalizowana w oparciu o wyznaczany w trybie on-line rzeczywisty stan zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych kotła.

W opracowanym układzie komputerowym wyniki pomiarów i obliczeń charakteryzujących stopień zanieczyszczenia ścian komory paleniskowej i rur przegrzewacza prezentowane są na bieżąco na ekranie monitora na odpowiednio przygotowanych wykresach. Na monitorze przedstawiane są przebiegi czasowe wielkości zmierzonych i obliczonych, które umożliwiają operatorowi łatwą ocenę stopnia zanieczyszczenia ścian komory paleniskowej i rur przegrzewacza.

Na podkreślenie zasługuje wdrożenie opracowanego układu do nadzoru eksploatacji kotła w jednej z elektrowni krajowych.

Okres po doktoracie:

W rozprawie doktorskiej opracowałem system monitorowania narastania osadów w paleniskach kotła i przegrzewaczach pary zainstalowany na kotle nr 8 w Elektrowni Skawina, pozwalający na realizację obliczeń ciepło-przepływowych energetycznego kotła parowego w trybie on-line. Wyniki pomiarów i obliczeń charakteryzujących stopień zanieczyszczenia ścian komory paleniskowej i rur przegrzewacza prezentowane są na bieżąco na ekranie monitora na dziewięciu wykresach.

Prace wykonywane przeze mnie w okresie po ukończeniu doktoratu skupiły się przede wszystkim na zaproponowaniu metody numerycznej modelowania przegrzewaczy pary kotłów oraz opracowaniu numerycznego nieliniowego modelu matematycznego kotła parowego, w tym w szczególności:

Opracowanie metody numerycznej modelowania przegrzewaczy pary kotłów w stanach ustalonych i nieustalonych. Na podstawie zapisanych równań zachowania energii dla pary, ścianki rury wraz z zanieczyszczeniami popiołowymi oraz dla spalin sporządzone zostały modele matematyczne

o parametrach rozłożonych przegrzewaczy pary w kotłach. Opracowane modele matematyczne pozwalają na symulację pracy wymienników o złożonych układach przepływowych. Metoda ta może być użyta do modelowania pracy przegrzewaczy pary w różnych warunkach, takich jak: zanieczyszczenia popiołowe po stronie spalin, osady kamienia kotłowego na wewnętrznych powierzchniach rur i nierównomierność rozkładu temperatury spalin w przekroju kanału spalinowego. Ponadto zmiany w konstrukcji przegrzewacza, w tym zwiększanie lub zmniejszanie powierzchni przegrzewacza, mogą być łatwo analizowane. Opracowana metoda umożliwi obliczenie temperatury ścianek rur nie tylko dla wymienników współprądowych czy przeciwprądowych, ale także dla wymienników o mieszanym przepływie czynnika.

- Opracowanie nieliniowego modelu matematycznego kotła parowego, pozwalającego przy wykorzystaniu między innymi zaproponowanej metody modelowania numerycznego przegrzewaczy pary na symulację pracy kotła w różnych warunkach. Na podstawie przeprowadzonych symulacji możliwe jest:
 - a) wyznaczenie temperatury zewnętrznych i wewnętrznych powierzchni rur oraz zanieczyszczeń zewnętrznych dla wszystkich powierzchni ogrzewalnych kotła;
 - b) wyznaczenie temperatur czynników;
 - c) pokazanie wpływu osadów na wewnętrznych powierzchniach rur przegrzewacza na zmianę temperatury pary i ścianek rur;
 - d) pokazanie pracy przegrzewacza pary z uwzględnieniem nierównomierności temperatury spalin.Opracowany model matematyczny kotła umożliwi obliczanie jego sprawności w trybie on-line, co pozwala eksploatować kocioł z wysoką sprawnością. Przy jego zastosowaniu możliwe jest prawidłowe dobranie parametrów pracy kotła przy spalaniu biomasy lub współspalaniu biomasy, odpadów komunalnych lub innych paliw z węglem. Opracowany model matematyczny kotła może być zastosowany do obliczeń projektowych i eksploatacyjnych kotłów parowych.
- Zaproponowanie nowej, eksperymentalno-numerycznej metody do wyznaczania średniego stopnia zanieczyszczania komory paleniskowej i przegrzewaczy pary w trybie on-line. Dzięki wyznaczaniu na bieżąco stopnia zanieczyszczenia komory paleniskowej oraz poszczególnych stopni przegrzewacza można sterować częstotliwością załączania zdmuchiwaczy żużla i popiołu. Powierzchnie ogrzewalne kotła mogą być oczyszczane tylko wtedy, gdy istnieje taka potrzeba.
- Analiza wpływu stopnia zażużowania ścian komory paleniskowej i zanieczyszczenia popiołem poszczególnych stopni przegrzewacza pary na parametry pracy kotła. Wyniki modelowania numerycznego porównano z wynikami pomiarów przeprowadzonych w elektrowniach. Ich zgodność jest bardzo dobra, co potwierdza poprawność opracowanego modelu matematycznego kotła.
- Analiza lokalnego stopnia zanieczyszczenia ścian komory paleniskowej przy wykorzystaniu wstawek termometrycznych umożliwiających niezawodną rejestrację spadku lokalnego obciążenia cieplnego, gdy na ścianach komory paleniskowej odkłada się żużel.
- Modelowanie CFD komory paleniskowej i przegrzewaczy pary przy użyciu oprogramowania ANSYS-CFX.
- Analiza możliwości przyspieszenia rozruchu i wyłączenia z ruchu bloku energetycznego. Przeprowadzone dla bloku energetycznego o mocy 206MW analizy pokazują, że czas rozruchu bloku może być skrócony ponad 2 krotnie.

- Analiza możliwości przeprowadzenia zmian w technologii rozruchu i ewentualnych zmian konstrukcyjnych kotła, umożliwiających skrócenie czasu rozruchu i zmniejszenie zużycia mazutu bez zmniejszania trwałości elementów kotła. Zaproponowana została nowa technologia rozruchu z wykorzystaniem ciśnieniowego zasobnika wody.
- Propozycja zastosowania ciśnieniowych zasobników gorącej wody do poprawy elastyczności bloków parowych. Dzięki instalacji tych zasobników można zwiększyć moc bloku o około 7% w czasie szczytowego zapotrzebowania na energię elektryczną oraz zmniejszyć jego moc o około 15% w czasie tzw. doliny nocnej lub w ciągu dnia przy zwiększonym zapotrzebowaniu energii elektrycznej na klimatyzację w czasie letnich upałów.

Uczestniczyłem w projekcie, budowie i wdrażaniu komputerowego układu do monitorowania parametrów przeplywowo – cieplnych i wytrzymałościowych dużych kotłów parowych.

Jestem członkiem stowarzyszonym Sekcji Termodynamiki PAN w kadencji 2015 – 2018

Tabela 1 Wykaz osiągnięć naukowych przed i po okresie doktoratu

	Łącznie	Przed doktoratem	Po doktoracie
Sumaryczna liczba punktów MNiSW	494	25	469
Sumaryczny IF	9,118	0	9,118
Sumaryczny IF-5	10,316	0	10,316
Publikacje ogółem:	20	2	18
Publikacje z listy A MNiSW	6	0	6
Publikacje z listy B MNiSW	14	2	12
Monografie	3	0	3
Rozdziały w monografiach:	16	3	13
Rozdziały monografiach w języku polskim	7	2	5
Rozdziały monografiach w języku angielskim	9	1	8
Publikacje w materiałach konferencyjnych:	23	5	18
Publikacje w materiałach konferencyjnych w języku angielskim	19	3	16
Publikacje w materiałach konferencyjnych w języku polskim	4	2	2
Rozprawa doktorska	1	1	0
Udział w konferencjach:	26	6	20
Konferencje krajowe	21	5	16
Konferencje zagraniczne	5	1	4
Projekty badawcze ogółem (kierowane)	24(0)	3(0)	21(0)
Zgłoszenia patentowe	0	0	0

Cytowania prac naukowych:

a) Statystyka cytowania prac wg. bazy Publish or Perish (Google Scholar)

https://scholar.google.pl/citations?hl=pl&user=yXHYDdwAAAAJ&view_op=list_works&gmla=AJsN-F74eWnEA6VkufP7VgbvsOOfxnu3R6-bl1U0P2Amo0Je42J-hue3lx6ULIAcP3tKmtzqMjfg_t7cvo3SJbYUNzxJ4u49alDXD0ddV1DztrWk0Ty3svFrTr90nEXeHsWT3LyiWZYdcYcWIX6CnbEDb6FX-uwz1A

Publikacje indeksowane: 43

<u>Indeksy cytowań</u>	Wszystkie	Od 2012
<u>Cytowania</u>	94	83
<u>h-indeks</u>	6	5
<u>i10-indeks</u>	2	2

b) Statystyka cytowania prac wg. bazy Scopus:

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?origin=resultslist&authorId=26665144400&zone>

Publikacje indeksowane: 17

<u>Indeksy cytowań</u>	Wszystkie	Od 2010
<u>Cytowania</u>	44	44
<u>h-indeks</u>	5	5

c) Statystyka cytowania prac wg. bazy Web of Science:

http://apps.wofknowledge.com/CitationReport.do?product=WOS&search_mode=CitationReport&SID=Z1CRTHVyKQgtxiscN8f&page=1&cr_pqid=12&viewType=summary&from_ML=true&colName=WOS

Publikacje indeksowane: 12

<u>Indeksy cytowań</u>	Wszystkie	Od 2010
<u>Cytowania</u>	16	16
<u>h-indeks</u>	3	3

5.3. Udział w konferencjach naukowych krajowych i zagranicznych**Konferencje zagraniczne:**

1. International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning – 2009, Schladming, Austria, 14-19 June 2009. Referat: Taler J., Trojan M., Taler D.: Assessment of ash and slagging in coal fired utility boilers (przed doktoratem)
2. Incotee 2011: International conference on thermal energy and environment; Madurai (Indie), march 24, 2011 - march 26, 2011. Referat: Taler D., Trojan M., Taler J., Mathematical modelling of cross-flow tube heat exchangers with the complex flow arrangement

3. 6th International Conference „Inverse Problems: Modeling and Simulation”, May 21-26 2012, Antalya, Turkey. Referat: **Trojan M.**, Taler D., Taler J., Determination of ash deposits resistance in superheaters of steam boilers
4. POWER 2014, ASME 2014 Power Conference, Baltimore, USA, 28-31 Lipca, 2014, Referat: 1) Dzierwa P., Taler D., Taler J., **Trojan M.**, Optimum heating of thick wall pressure components of steam boilers, 2) **Trojan M.**, Taler D., Taler J., Dzierwa P., Modeling of superheater operation in a steam boiler
5. Power & Energy 2016-59082, ASME 2016, Charlotte, USA, 26-30 Czerwca, Referat: Taler J., Węglowski B., Sobota T., Taler D., **Trojan M.**, Dzierwa P., Jaremkiewicz M., Pilarczyk M., Thermal Performance and Stress Monitoring of Power Boiler

Konferencje krajowe:

6. Konferencja „Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej”, Warszawa 11-14 grudnia 2007, 607-618. Referat: Taler J., Taler D., **Trojan M.** Monitoring of Slagging and Fouling in Steam Boilers (przed doktorem)
7. Xli International Symposium on Heat Transfer And Renewable Sources of Energy, Szczecin/Międzyzdroje, wrzesień 2008. Referat: Taler J., **Trojan M.**, Taler D.: Computer system for fouling assesment in coal-fired utility boilers (przed doktorem)
8. II Konferencja Nauka Dla Biznesu pt.: „Współpraca biznesu z nauką szansą na rozwój gospodarczy – Giełda kooperacyjna Politechniki Krakowskiej”, Kraków, 17 listopad 2008. Referat: **Trojan M.**, Taler J.: Komputerowy układ do oceny w trybie on-line stopnia zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych kotła (przed doktorem)
9. Jubileuszowa Konferencja Kociołowa, 2009 z okazji 60-LECIA Fabryki Kotłów RAFAKO SA w Raciborzu. Aktualne Problemy Budowy i Eksploatacji Kotłów, Szczyrk, Orle Gniazdo, październik 2009. Referat: Taler J., **Trojan M.**, Taler D.: Simulation and monitoring of fouling and slagging in coal-fired steam boilers (przed doktorem)
10. International Conference on Boiler Technology 2009, Gliwice. Referat: Taler J., **Trojan M.**, Taler D.: Simulation and Monitoring of Fouling and Slagging in Coal-Fired Steam Boilers (przed doktorem)
11. Seminarium Naukowe Sekcji Spalania Komitetu Termodynamiki i Spalania Polskiej Akademii Nauk oraz Polskiego Instytutu Spalania, Kraków, 26 marzec 2010. Referat: Taler J., Taler D., **Trojan M.**, Monitorowanie zanieczyszczeń komór paleniskowych w kotłach energetycznych
12. II Konferencja Naukowo Techniczna, Współczesne Technologie i Urządzenia Energetyczne, Kraków, 15 – 17 wrzesień 2010. Referat: Taler J., **Trojan M.**: Monitorowanie zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych kotła w trybie on-line
13. Międzynarodowa XI Konferencja Kociołowa ICBT'2010 (130 lat Fabryki Kotłów w Sosnowcu), Szczyrk, CKiR Orle Gniazdo, 19 – 22 października 2010. Referat: **Trojan M.**: Modelowanie wymiany ciepła w przegrzewaczu grodziowym
14. GRE 2012: XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, 25-27 maj 2012, Szczyrk. Referat: Taler J., **Trojan M.**, Taler D., Numeryczno – eksperymentalna metoda oceny zanieczyszczenia popiołem przegrzewaczy kotłów

15. IV Konferencja grupy tematycznej I i II Programu Strategicznego „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”, Nowe koncepcje zwiększania sprawności węglowych technologii wytwarzania elektryczności i ciepła, Borowa Oleśnicka, 28-29 styczeń 2013r.
16. IV Seminarium sprawozdawcze, Szczyrk, 1-4 lipiec 2013r. Referat: Wysokosprawna eksploatacja dużych kotłów energetycznych z wykorzystaniem systemu okreśania stopnia zażużlowania i zanieczyszczenia popiołem powierzchni ogrzewalnych kotła w trybie on – line – Analiza wyników eksperymentalnych otrzymanych za pomocą opracowanego układu komputerowego
17. Międzynarodowa Konferencja Energetyka i Ochrona Środowiska, Współczesne problemy konstrukcji i eksploatacji kotłów energetycznych, Kraków, AGH, 26-27 września 2013 r.
18. III Konferencja Naukowo-Techniczna Współczesne Technologie i Urządzenia Energetyczne, 16-18 października 2013 r. Kraków Referat: Taler J., Dzierwa P., Trojan M., Projektowanie, eksploatacja i monitorowanie kotłów o parametrach nadkrytycznych
19. Współczesne Technologie i Urządzenia Energetyczne 2013, Kraków, 15-18 Październik 2013, Referat: Taler J., Dzierwa P., **Trojan M.** Projektowanie, eksploatacja i monitorowanie kotłów o parametrach nadkrytycznych
20. Międzynarodowa XII Konferencja Kociołowa ICBT 2014, Aktualne Problemy Budowy i Eksploatacji Kotłów, Polska, Szczyrk, CKiR Orle Gniazdo, 21-24 października 2014, Referat: Taler J., Węglowski B., Taler D., Madejski P., Dzierwa P., **Trojan M.**, Sobota T., Pilarczyk M., Determination of start-up curves for a boiler with natural circulation based on the analysis of stress distribution in critical pressure components
21. XII Zjazd Termodynamików, 24-27 września 2014r., Polańczyk. Referat: **Trojan M.** Modelowanie CFD Konwekcyjnego Przegrzewacza Pary
22. Konferencja naukowa Polski Mix Energetyczny 2014, 15-17 października 2014, Ustronie. Referat: **Trojan M.**, Computer modelling of a convective steam superheater
23. 12th International Conference on Boiler Technology 2014, Poland, Szczyrk, CKiR Orle Gniazdo, October 21-24, 2014, Gliwice 2014. Referat: Taler J., Węglowski B., Taler D., Madejski P., Dzierwa P., **Trojan M.**, Sobota T., Pilarczyk M., Determination of start-up curves for a boiler with natural circulation based on the analysis of stress distribution in critical pressure components
24. Konferencja Energetyka 2014, Wrocław 2014, Referat: Taler J., Węglowski B., Taler D., **Trojan M.**, Sobota T., Dzierwa P., Pilarczyk M., Czupryński P., Janda T., Madejski P., Nabagło D., Thermo-flow and strength monitoring of a PC boiler,
25. IX International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, ICCHMT2016, Kraków 2016, Referat. 1) Dzierwa P., Taler D., **Trojan M.**, Kamińska K., Taler J., Optimum heating of thick-walled pressure components assuming a quasi-steady state of temperature distribution; 2) Dzierwa P., Taler D., **Trojan M.**, Taler J., Optimum heating of boiler evaporator
26. Energetyka i Paliwa 2016, 21-23.09.2016 Kraków, AGH. Referat: Taler J., **Trojan M.**, Taler D., Dzierwa P., Kaczmarski K., Shortening start-up and an extension of the power unit load range

5.2. Recenzje artykułów w czasopiśmie z ministerialnej listy A:

5.3. Kierowanie lub udział w grantach i projektach badawczych

Projekty badawcze finansowane przez koncerny zagraniczne działające w Polsce:

1. Projekt badawczy „The system for monitoring the fouling of the boiler furnace chamber, superheaters, reheaters, and other heating surfaces (FOULING INSPECTOR)” („System monitorowania zanieczyszczenia komory paleniskowej, przegrzewaczy i innych powierzchni ogrzewalnych w kotle (FOULING INSPECTOR”)), projekt finansowany przez EDF (Électricité de France), Politechnika Krakowska, Umowa nr M-9/491/2012/P, czas realizacji: 11.09.2012 - 30.12.2013 – wykonawca
2. Projekt badawczy „Improving dynamic properties of steam boilers” („Poprawa własności dynamicznych kotłów parowych”), projekt finansowany przez EDF (Électricité de France), Politechnika Krakowska, Umowa nr M9/492/2012, czas realizacji: 21.09.2012 - 30.06.2014 – wykonawca
3. Projekt badawczy „Improving dynamic properties of steam boilers - preliminary study” („Poprawa własności dynamicznych kotłów parowych - prace przygotowawcze”) - prace przygotowawcze dla EDF Rybnik”, projekt finansowany przez EDF (Électricité de France), Politechnika Krakowska, Umowa nr M9/494/2013, czas realizacji: 09.08.2013 - 07.02.2014 – wykonawca
4. Projekt badawczy „Installation of thermal-flow and strength performance monitoring system for the steam boiler operation and for accelerated start-ups and steady-state operation as well as conducting trial shortened start-ups” („Instalacja układu bezpiecznej eksploatacji kotłów parowych w warunkach przyspieszonych rozruchów i ustalonej pracy kotła oraz przeprowadzenie próbnych przyspieszonych rozruchów kotła energetycznego”), projekt finansowany przez EDF (Électricité de France), Politechnika Krakowska, Umowa nr M-9/492/2015/P, czas realizacji: 13.07.2015 - 30.09.2016 – wykonawca
5. Projekt badawczy „Flexibility increasing of steam power blocks” („Poprawa elastyczności pracy parowych bloków energetycznych”), projekt finansowany przez EDF (Électricité de France), Politechnika Krakowska, Umowa nr M-9/238/2015/P, czas realizacji: 09.04.2015- - 30.09.2016 – wykonawca
6. Projekt badawczy nr 0540/R/T02/2007/03 (umowa nr M-5/612/R/2007) „Nowy sposób nagrzewania i ochładzania elementów ciśnieniowych bloku energetycznego z uwagi na naprężenia cieplne”, projekt finansowany przez KBN, czas realizacji: 2007-2010 – wykonawca
7. Projekt badawczy zamawiany nr PBZ-MEiN-4/2/2006 (decyzja nr G 005/T02/2007). „Nadkrytyczne bloki węglowe”, projekt finansowany przez KBN, czas realizacji: 20.04.2007 - 19.04.2010 – wykonawca
8. Projekt badawczy rozwojowy nr NR07-0046-10/2010 (0946/R/T02/2010/10) „Systemy do oceny materiałów konstrukcyjnych urządzeń pracujących w warunkach zmiennych obciążeń i w wysokich temperaturach”, projekt finansowany przez KBN, czas realizacji: 01.10.2010 - 30.09.2012 – wykonawca

9. Projekt badawczy nr N N513 332538 (3325/B/T02/2010/38) „Dynamika układu: kocioł na biopaliwo-kolektory słoneczne - zasobniki ciepłej wody użytkowej”, projekt finansowany przez NCN, czas realizacji: 13.04.2010 - 12.04.2013 – wykonawca
10. Projekt badawczy nr NR15 0060-10/2011 (1083/R/T02/2010/10) „Ocena zachowania się i prognoza długotrwałej pracy stali nowych generacji na elementy kotłów eksploatowanych powyżej temperatury granicznej”, projekt finansowany przez KBN, czas realizacji: 03.03.2011 - 31.10.2013 – wykonawca
11. Projekt badawczy strategiczny nr SP/E/1/67484/10 „Opracowanie technologii dla wysokosprawnych zero-emisyjnych bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin” realizowanego w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”, projekt finansowany przez NCBiR, czas realizacji: 01.05.2010 - 30.04.2015 – wykonawca
12. Projekt badawczy nr N N513 323940 (3239/B/T02/2011/40) „Nowa metoda rozruchu kotła walczkowego”, projekt finansowany przez KBN-NCN, czas realizacji: 15.04.2011 - 14.04.2014 – wykonawca
13. Projekt badawczy stosowany nr PBS1/A4/4/2012 „Opracowanie nowoczesnych metod oceny trwałości resztkowej elementów ciśnieniowych instalacji energetycznych”, projekt finansowany przez NCBiR, czas realizacji: 01.11.2012 - 31.10.2015 – wykonawca
14. Projekt badawczy rozwojowy nr NR07-0046-10/2010 (0946/R/T02/2010/10) „Systemy do oceny materiałów konstrukcyjnych urządzeń pracujących w warunkach zmiennych obciążeń i w wysokich temperaturach”, projekt finansowany przez KBN, czas realizacji: 01.10.2010 - 30.09.2012 – wykonawca
15. Projekt badawczy nr NR15 0060-10/2011 (1083/R/T02/2010/10) „Ocena zachowania się i prognoza długotrwałej pracy stali nowych generacji na elementy kotłów eksploatowanych powyżej temperatury granicznej”, projekt finansowany przez KBN, czas realizacji: 03.03.2011 - 31.10.2013 – wykonawca
16. Projekt badawczy strategiczny nr SP/E/1/67484/10 „Opracowanie technologii dla wysokosprawnych zero-emisyjnych bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin” realizowanego w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”, projekt finansowany przez NCBiR, czas realizacji: 01.05.2010 - 30.04.2015 – wykonawca Politechnika Krakowska realizowała trzy duże zadania.
 - 16.1) Etap II.6 Wysokosprawna eksploatacja dużych kotłów energetycznych z wykorzystaniem systemu określania stopnia zażużłowania i zanieczyszczenia popiołem powierzchni ogrzewalnych kotła w trybie on-line – wykonawca
 - 16.2) Etap III.2 Nowe systemy nadzoru eksploatacyjnego, ocena ryzyka oraz planowanie gospodarki diagnostyczno-remontowej bloków energetycznych nowych generacji i obecnie użytkowanych oraz instalacji energetycznych, zadanie III.2.1 Monitorowanie nieustalonych stanów cieplno-wytrzymałościowych ciśnieniowych elementów kotłów – wykonawca

- 16.3) Etap IV.4, Analizy optymalizacyjne i badania przygotowujące do wprowadzenia do polskiej energetyki bloku 50+, zadanie IV.4.1 Poprawa właściwości dynamicznych kotłów parowych pod kątem ich pracy w systemie energetycznym ze znacznym udziałem farm wiatrowych – wykonawca
17. Projekt badawczy nr N N513 323940 (3239/B/T02/2011/40) „Nowa metoda rozruchu kotła walczakowego”, projekt finansowany przez KBN-NCN, czas realizacji: 15.04.2011 - 14.04.2014 – wykonawca
18. Projekt badawczy strategiczny nr SP/E/4/65786/10 „Opracowanie zintegrowanych technologii wytwarzania paliw i energii z biomasy, odpadów rolniczych i innych” realizowanego w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”, projekt finansowany przez NCBiR, czas realizacji: 01.06.2010 - 31.05.2015 – wykonawca
19. Brałem udział w realizacji następujących zadań:
- 19.1) Opracowanie kompleksowego projektu wielopaliwowego kotła do współpracy z układem oleju termalnego – wykonawca
 - 19.2) Zagospodarowanie energetyczne ciepła odpadowego z agregatów prądotwórczych – wykonawca
 - 19.3) Dokumentacja typoszeregu układów kogeneracyjnych na bazie silnika spalinowego, z turbiną lub mikroturbiną gazową, ORC oraz układów gazowo-parowych – wykonawca
- 20 Projekt badawczy stosowany nr PBS1/A4/4/2012 „Opracowanie nowoczesnych metod oceny trwałości resztkowej elementów ciśnieniowych instalacji energetycznych”, projekt finansowany przez NCBiR, czas realizacji: 01.11.2012 - 31.10.2015 – wykonawca

Prace badawcze i wdrożeniowe realizowane na zlecenie przemysłu

Prace realizowane dla koncernów zagranicznych:

21. Umowa nr M-9/459/2009/P, „Heat flux measurement on the control rod surface” („Analiza gęstości strumienia ciepła na powierzchniach prętów sterujących”), praca badawcza realizowana na zlecenie Forsmark Nuclear Power Plant, Vattenfall AB, Sweden, czas realizacji: 01.08.2009 - 01.08.2010 – wykonawca
22. Umowa nr M-9/58/2011/P, „Design and manufacturing of measuring inserts and software for determination of heat flux and temperature measurement on the insert outer surface” („Wykonanie wstawek pomiarowych oraz oprogramowania do wyznaczenia wartości gęstości strumienia ciepła na powierzchniach zewnętrznych badanych wstawek”), praca badawcza realizowana na zlecenie Forsmark Nuclear Power Plant, Vattenfall AB, Sweden, czas realizacji: 01.09.2010 - 01.07.2011 – wykonawca
23. Projekt badawczy KIC M9 „Multi-fuel energy generation for Sustainable and Efficient use of Coal (SECoal). Modeling tools, monitoring and control of multi-fuel power generation”, projekt finansowany przez EIT Knowledge & Innovation Community, KIC InnoEnergy, czas realizacji: 01.12.2010 - 31.12.2013 – wykonawca

Prace realizowane dla polskich przedsiębiorstw:

24. Umowa nr UZ/ZK2/0791/AP „Analiza dynamiczna kotła BP-2450”, praca badawcza dla RAFAKO S.A., czas realizacji: 2016 – wykonawca

5.4. Współpraca krajowa i międzynarodowa

Współpraca z przemysłem:

Firmy z branży energetycznej

- EDF Polska: (udział w trzech projektach dotyczących poprawy elastyczności bloków energetycznych, monitorowania elementów instalacji energetycznych oraz poprawy własności dynamicznych kotłów parowych).
- Forsmark (udział w jednym projekcie dotyczącym opracowania oprogramowania do obliczeń gęstości strumienia ciepła na powierzchni zewnętrznej wstawek pomiarowych).

5.5. Nagrody i odznaczenia :

6. Omówienie osiągnięć organizacyjnych i dydaktycznych

6.1. Osiągnięcia organizacyjne

Organizacja współpracy zagranicznej

Jestem współinicjatorem współpracy Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych z następującymi ośrodkami naukowymi z zagranicy:

1. Technische Universitaet Braunschweig (Niemcy)
2. Technische Universitaet Bergakademie Freiberg (Niemcy)
3. Uniwersytet w Calgary (Kanada)
4. Velammal College of Engineering and Technology (Indie)
5. Sardar – Rządowy Instytut Technologiczny w Surat (Indie)
6. Uniwersytet w Shizuoka (Japonia)

6.2. Osiągnięcia dydaktyczne

Prowadziłem następujące zajęcia dydaktyczne, kursy i szkolenia:

1. Wymiana ciepła i masy (wykłady, ćwiczenia)
2. Metody numeryczne (wykłady, laboratoria komputerowe)
3. Analiza i projektowanie systemów energetycznych (wykłady, projekt)
4. Modelowanie za pomocą systemu ANSYS (laboratoria komputerowe)
5. Elektrownie i elektrociepłownie (wykłady, ćwiczenia)
6. Maszyny i urządzenia energetyczne (laboratorium)
7. Modelowanie CFD (laboratorium komputerowe)
8. Szkolenia z MES (w ramach programu Kapitał Ludzki)
9. Szkolenia z AutoCad (w ramach programu Kapitał Ludzki)

Pełnię funkcję promotora pomocniczego pana Karola Kaczmarskiego, doktoranta na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej (od stycznia 2017 roku).


.....

Podpis wnioskodawcy