

Dr inż. Piotr Szulc
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Zakład Mechaniki i Systemów Energetycznych

Załącznik 2

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: Piotr Szulc

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

2003 – stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie Mechanika i budowa maszyn, Wydział Mechaniczno-Energetyczny Politechniki Wrocławskiej, temat pracy: *Modelowanie przepływu mieszaniny ciecz–para w parowniku kotła przepływowego*, promotor: prof. dr hab. inż. Kazimierz Wójs;

1999 – stopień mgr inż. mechanik, Wydział Mechaniczno-Energetyczny Politechniki Wrocławskiej.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

od 2003 do 2005 – asystent na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej;

od 2005 do dziś – adiunkt na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art.16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz 1311)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Osiągnięciem stanowiącym podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego jest praca opublikowana w całości w postaci monografii pt.: *Modelowanie procesów ciepłoprzepływowych towarzyszących pracy kotła energetycznego* (100% udziału własnego).

4.2. Autor, tytuł, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy

Piotr Szulc, *Modelowanie procesów ciepłoprzepływowych towarzyszących pracy kotła energetycznego*, 2017, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, recenzenci: prof. dr hab. inż. Zbigniew Królicki – Politechnika Wrocławska, prof. dr hab. inż. Andrzej Rusin – Politechnika Śląska.

4.3. Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

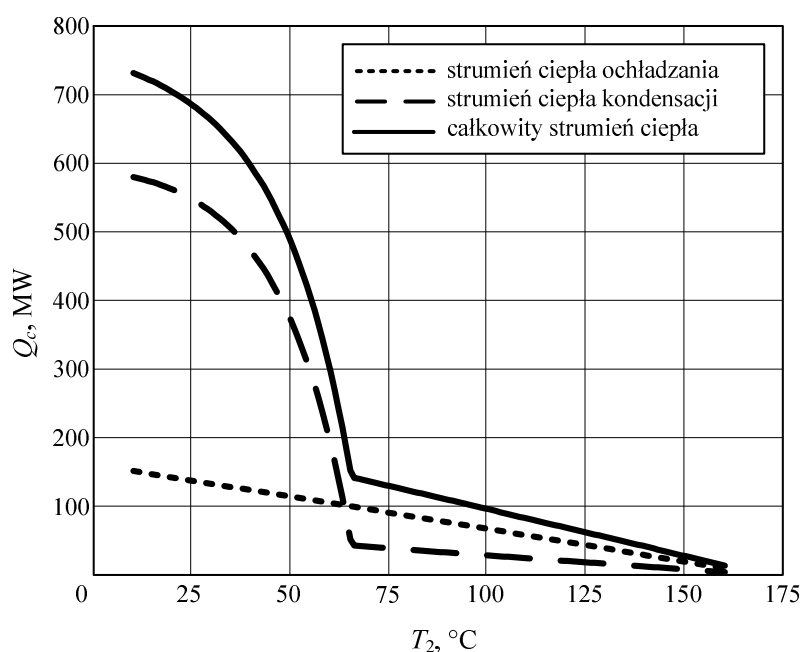
Wytwarzanie w kotle energetycznym pary wodnej związane jest z koniecznością spalania paliwa, a produktami tego procesu są spaliny oraz w przypadku paliwa stałego – popiół i żużel. Opuszczające kocioł spaliny poddawane są procesowi oczyszczania z popiołu, żużla i tlenków siarki, a następnie kierowane do komina. Temperatura opuszczających kocioł spalin zdecydowanie przekracza 100°C , co przyczynia się do obniżenia sprawności jego pracy. Usunięte w procesie oczyszczania stałe produkty spalania muszą natomiast zostać przetransportowane poza teren elektrowni na składowisko powierzchniowe. Pociąga to za sobą konieczność zasilania pomp do tłoczenia mieszaniny wieloskładnikowej złożonej z wody, popiołu i żużla, a do zapewnienia ciągłej produkcji pary z kotła potrzebna jest stabilność pracy jego parownika.

Z tego względu moim głównym osiągnięciem opisanym w monografii było opracowanie narzędzi w postaci modeli matematycznych do analizy procesów ciepło-przepływowych towarzyszących pracy kotła energetycznego. Te procesy to przepływ spalin z uwzględnieniem odzysku niskotemperaturowego ciepła odpadowego, hydrotransport, czyli proces usuwania produktów spalania, jakimi są żużel i popiół, oraz niestabilność przepływu czynnika w parowniku kotła. Są one ważne ze względów poznawczych i naukowych z powodu ich wpływu na sprawność nie tylko samego kotła, a także całego obiegu. Odpowiedni dobór parametrów ciepło-przepływowych może decydować o efektywności samego procesu, trwałości pracy urządzeń i może wpływać na poprawę efektu środowiskowego. W opisanych procesach niewielki strumień spalin niesie duży ładunek energii, zawarty na przykład w ciepłe kondensacji, lub niewielkie zmiany ciśnienia mogą powodować duże zmiany strumienia przepływającego czynnika – skutkiem tego może dochodzić do nieprzewidzianych awarii.

Każdy z wymienionych procesów należy potraktować indywidualnie, z tego względu pracę podzieliłem na trzy główne rozdziały. W każdym z nich szczegółowo omówiłem fizykę zjawiska, sposób opracowania modelu matematycznego, jego weryfikację na stanowisku badawczym i na wybranym obiekcie rzeczywistym.

W rozdziale 1 sformułowałem ogólnie zakres przeprowadzonych badań z zarysowanym celem jaki sobie założono. W rozdziale 2 natomiast skupiłem się na procesie odzysku niskotemperaturowego ciepła odpadowego ze spalin, w którym nowym pomysłem było uwzględnienie procesu kondensacji pary wodnej. Na podstawie literatury przedmiotu można wnioskować, że w większości pracujących w kraju i za granicą elektrowni do odzysku ciepła wykorzystuje się wymienniki bezkondensacyjne. Stopień schłodzenia spalin wylotowych jest wówczas niewielki, a odzyskanie ciepła odpadowego zwykle nie jest celem. Z tego powodu opracowałem model matematyczny uwzględniający proces kondensacji pary wodnej, dzięki któremu zdecydowanie wzrasta odzyskiwany strumień ciepła ze spalin. Ciepło odpadowe odzyskiwane było w postaci gorącej wody o temperaturze 90°C . W tej postaci ciepło odpadowe można wykorzystać w obiegu elektrowni na przykład do podgrzania powietrza lub wody w układzie regeneracji bloku. Tak postawione zadanie wymagało głębokiej analizy ze względu na skomplikowany model opisujący jednoczesną wymianę ciepła w obecności gazu inertnego, obecność pary wodnej i zjawisko kondensacji (zał. 4.1 [1, 4, 5, 7, 11, 12, 14, 17, 18, 19, 20, 21]).

Opracowałem model matematyczny w postaci równań bilansowych dla kondensacyjnego wymiennika ciepła z uwzględnieniem procesu wymiany ciepła w obecności gazu inertnego i kondensacji pary wodnej. Aby uzyskać duży strumień ciepła kondensacji, do badań wykorzystałem spaliny pochodzące ze spalania węgla brunatnego, które zawierają ok. 25% wilgoci. Temperatura początku kondensacji to ok. 64°C pod ciśnieniem 0,1 MPa. Z uwzględnieniem założonych parametrów bloku referencyjnego o mocy 900 MW obliczone zostały strumień masy wody chłodzącej kondensacyjny wymiennik ciepła, strumień masy powstającego kondensatu, strumień ciepła ochładzania spalin i kondensacji pary wodnej. W postaci przykładu na rysunku 1 przedstawiłem obliczoną zależność strumieni ciepła w funkcji temperatury spalin na wylocie z kondensacyjnego wymiennika ciepła bloku o mocy 900 MW. Z analizy przedstawionego rysunku wynika, że w momencie pojawienia się kondensacji strumień ciepła gwałtownie rośnie.



Rys. 1. Zależność strumieni ciepła w funkcji temperatury końcowej spalin wylotowych wyznaczone na podstawie modelu matematycznego

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdziłem, że istnieje ograniczenie związane z temperaturą wody chłodzącej, które uniemożliwia schłodzenie spalin wylotowych poniżej określonej temperatury. Ograniczenie to powoduje, że spaliny można schłodzić jedynie o kilka stopni poniżej temperatury nasycenia pod zadaniem ciśnieniem parcjalnym pary wodnej. (zał. 4.1. [1, 12])

Opracowany model matematyczny zweryfikowałem na specjalnie wybudowanym stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w kondensacyjny wymiennik ciepła (rys. 2) (zał. 4.1. [17]). Jest to wymiennik o przepływie krzyżowo-przeciwprądowym wody chłodzącej i mocy cieplnej 46 kW.

Na stanowisku laboratoryjnym zbadałem wpływ temperatury wlotowej spalin, strumienia objętości spalin, strumienia objętości wody chłodzącej i współczynnika

zawilżenia spalin na punkt pracy kondensacyjnego wymiennika ciepła. Wyniki badań przedstawiłem w postaci charakterystyk oraz przeprowadziłem ich szczegółową analizę.

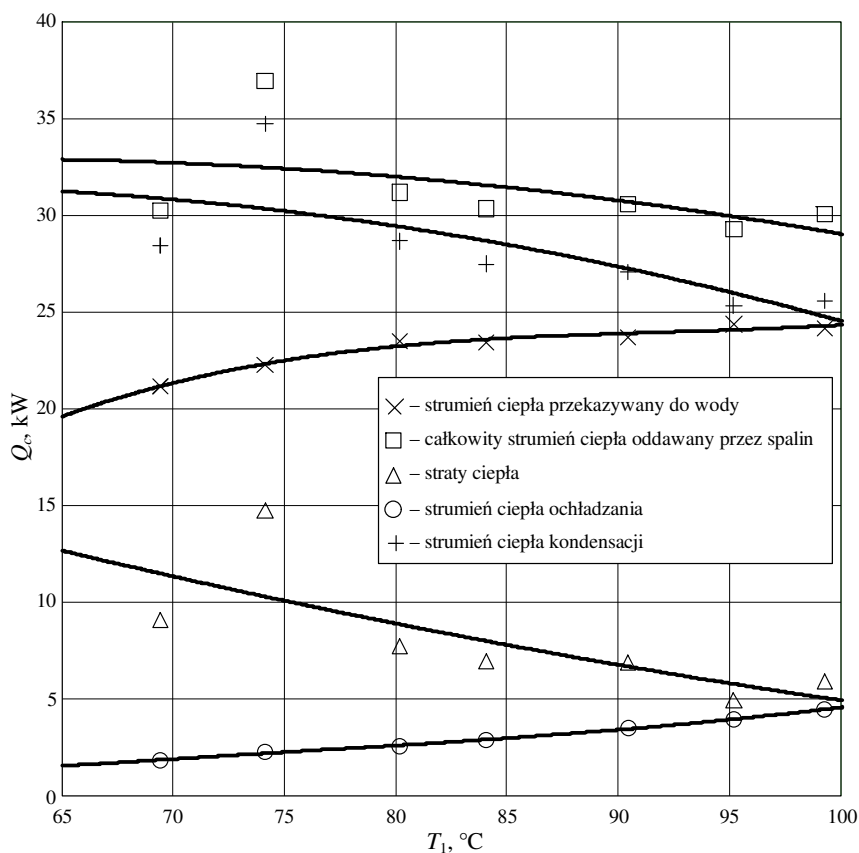


Rys. 2. Stanowisko do badania odzysku ciepła ze spalin zainstalowane w Zakładzie Mechaniki i Systemów Energetycznych Politechniki Wrocławskiej

Dla przykładu, z analizy wyników badań wpływu temperatury wlotowej spalin na punkt pracy kondensacyjnego wymiennika ciepła wynika, że wzrost temperatury spalin na jego wlocie powoduje nieznaczny wzrost strumienia ciepła ochładzania, a także spadek strumienia ciepła kondensacji. Następuje również wzrost strumienia ciepła przekazywanego do wody, który w wyższych temperaturach stabilizuje się na stałym poziomie (rys. 3) (zał. 4.1 [1, 5, 19]).

Wartość strumienia ciepła przenikającego do wody chłodzącej odpowiada odzyskanemu strumieniowi ciepła odpadowego ze spalin. W tym przypadku większy udział ma strumień ciepła kondensacji niż ciepła ochładzania. Na podstawie analizy wyników badań wpływu strumienia objętości spalin na punkt pracy kondensacyjnego wymiennika ciepła stwierdzić można, że ze wzrostem strumienia objętości spalin wzrasta strumień ciepła chłodzenia i kondensacji, przy czym wzrost ciepła chłodzenia jest niewielki. Zjawisko kondensacji przebiegało bardziej intensywnie, co przełożyło się na zwiększony strumień masy kondensatu. W efekcie ze spalin do wody chłodzącej przenikał większy strumień ciepła. Istotnym wnioskiem jest to, że odzyskany strumień ciepła odpadowego zwiększa się wraz ze wzrostem strumienia objętości spalin głównie z uwagi na duży udział strumienia ciepła kondensacji. Na podstawie analizy wyników badań strumienia objętości wody chłodzącej na punkt pracy kondensacyjnego wymiennika ciepła można wnioskować, że wzrost strumienia wody chłodzącej wymiennik ciepła powoduje nieznaczny wzrost strumienia ciepła ochładzania, ale za to duże przyrosty strumienia ciepła kondensacji. Widoczne jest to zwłaszcza dla małych wartości strumienia objętości wody. W konsekwencji rośnie strumień ciepła przenikający do wody chłodzącej. Na podstawie analizy wyników badań wpływu współczynnika zawilżenia spalin na punkt pracy kondensacyjnego wymiennika ciepła można natomiast stwierdzić, że wzrost wartości współczynnika zawilżenia spalin na wlocie do wymiennika ciepła powoduje nieznaczny spadek strumienia ciepła ochładzania i silny wzrost strumienia ciepła kondensacji. W rezultacie nastąpił wzrost strumienia ciepła przekazywanego od spalin do wody chłodzącej. W przeprowadzonych eksperymentach otrzymałem bardzo dobrą zgodność

zmierzonych współczynników zawilżenia spalin z obliczonymi. Wnioskiem końcowym było potwierdzenie, że wykorzystanie procesu kondensacji jest uzasadnione w przypadku spalin o dużym współczynniku zawilżenia, co znacznie zwiększa odzyskiwany strumień ciepła odpadowego ze spalin wylotowych.



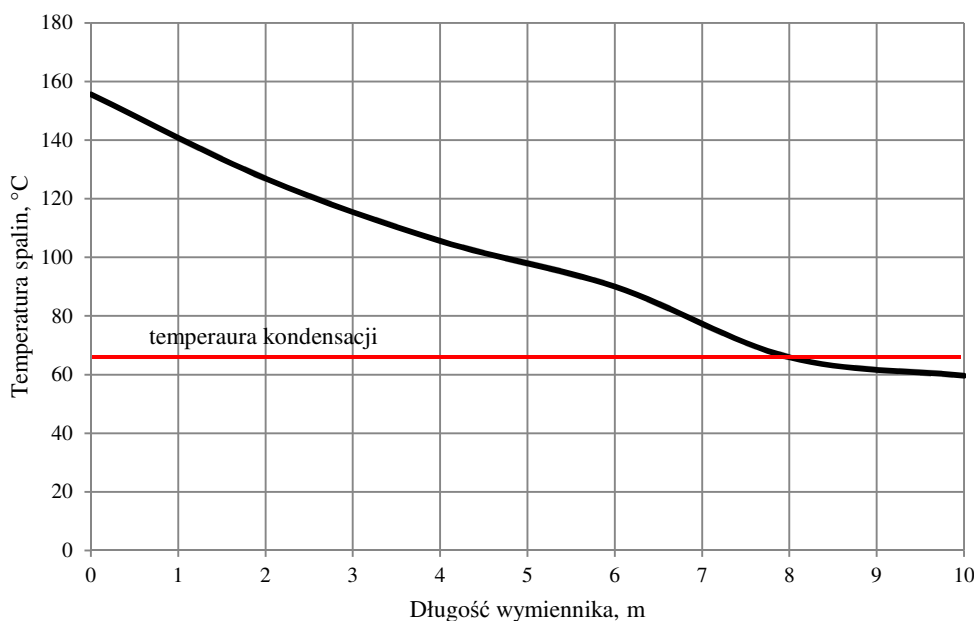
Rys. 3. Bilans strumieni ciepła w kondensacyjnym wymienniku ciepła w zależności od temperatury spalin na jego wlocie otrzymane na podstawie badań na stanowisku laboratoryjnym

W dalszej części rozdz. 2 przedstawiłem wyniki badań odzysku ciepła odpadowego w skali pilotowej. Pomiary przeprowadzone zostały na specjalnie wybudowanym stanowisku badawczym, które podłączono do kanału spalin rzeczywistego kotła BB-1150 w PGE GiEK S.A. Oddział Elektrownia Bełchatów. Najważniejszą częścią instalacji pilotowej był kondensacyjny wymiennik ciepła. Jego zadanie to ochłodzenie spalin poniżej wodnego punktu rosy i odzyskanie ciepła odpadowego w postaci gorącej wody o temperaturze 90°C (rys. 4) (zał. 4.1. [1, 4, 12]).



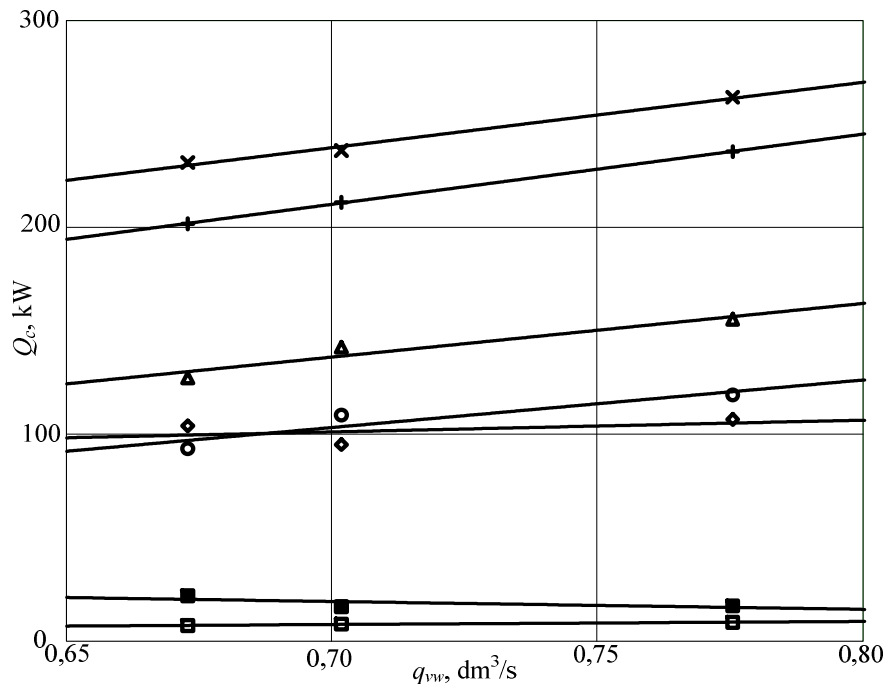
Rys. 4. Stanowisko pilotowe zainstalowane w PGE GiEK SA Oddział Elektrownia Bełchatów

Najważniejszym testem było sprawdzenie stanowiska pod kątem utrzymania założonego punktu pracy, przy którym odzyskane ciepło w postaci gorącej wody osiągnie temperaturę 90°C. Wyniki prac testowych przedstawiłem w postaci charakterystyk czasowych strumienia i temperatury spalin, temperatury i strumienia objętości wody chłodzącej wymiennik. Na rysunku 5 przedstawiam pomiary rozkładu temperatury spalin na długości wymiennika – wynika z nich, że kondensacja pary wodnej rozpoczyna się na ósmym metrze wymiennika (rys. 5) (zał. 4.1 [1, 4, 12]).



Rys. 5. Rozkład temperatury spalin na długości pilotowego wymiennika ciepła

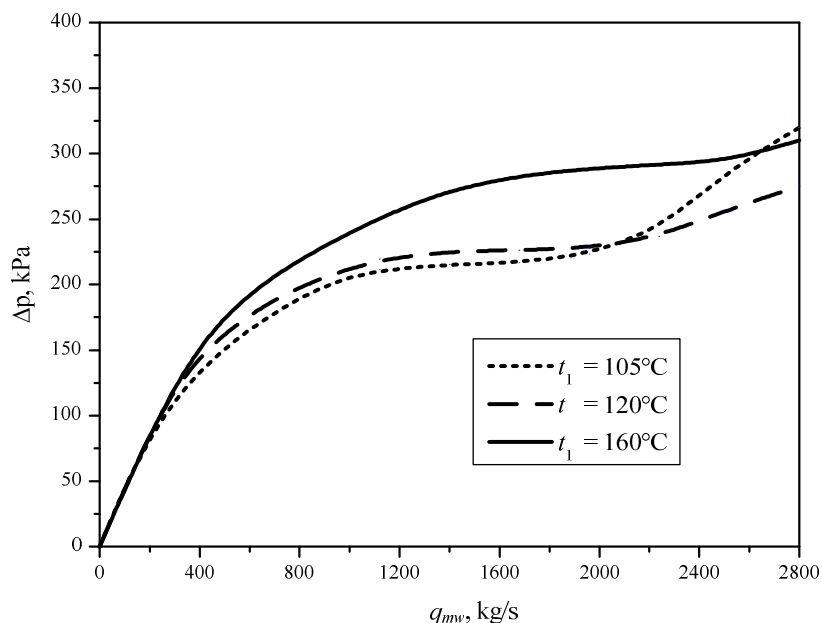
Kondensację potwierdziły również zdjęcia wykonane przez okienko inspekcyjne w końcowej części wymiennika pilotowego. Zbadałem również wpływ strumienia objętości spalin oraz strumienia objętości wody chłodzącej na punkt pracy wymiennika ciepła. Z przeprowadzonych badań na stanowisku pilotowym wynika, że wymiennik osiągnął założony punkt pracy i odzyskano ciepło odpadowe w postaci gorącej wody o strumieniu objętości 2,4 m³/h i temperaturze przekraczającej 90°C. Sporządziłem bilanse cieplne kondensacyjnego wymiennika ciepła z wykorzystaniem do tego opracowanego modelu matematycznego, a przykładowy przedstawiam na rys. 6. Z przeprowadzonych analiz wynika, że strumień odzyskanego niskotemperaturowego ciepła odpadowego w postaci gorącej wody zmienia się w zakresie 180–230 kW. Przeanalizowałem również zmiany współczynnika zawilżenia spalin na wylocie z wymiennika ciepła oraz strumienia masy kondensatu w zależności od strumienia spalin i wody chłodzącej wymiennik. Przedstawione wyniki badań są zgodne z rezultatami otrzymanymi na stanowisku w skali laboratoryjne. Wniosek końcowy przeprowadzonych prac to potwierdzenie, że odzysk niskotemperaturowego ciepła odpadowego jest zasadny w przypadku spalin o dużej zawartości wilgoci, a odzyskane ciepło w postaci gorącej wody o temperaturze 90°C można wykorzystać na przykład w obiegu siłowni cieplnej do podwyższenia jego sprawności (zał. 4.1. [1, 4, 12]).



Rys. 6. Bilans cieplny pilotowego kondensacyjnego wymiennika ciepła przy zmianie strumienia objętości wody chłodzącej;

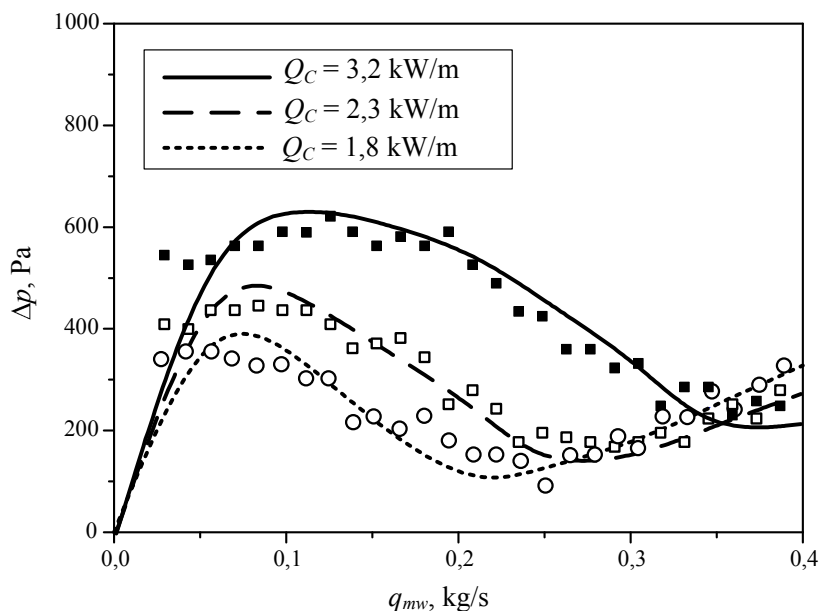
„x” – całkowity strumień ciepła oddawany przez spaliny, „◇” – strumień ciepła oddawany przez gaz inertny, „Δ” – strumień ciepła oddawany przez parę wodną, „+” – strumień ciepła przenikający do wody chłodzącej, „○” – strumień ciepła kondensatu, „□” – strumień ciepła ochładzania

W rozdziale 3 omówiłem modelowanie przepływu mieszaniny cieczy i pary w modelu parownika oraz w rzeczywistym parowniku kotła przepływowego BP-1150. Z przeglądu literatury przedmiotu wynika, że niewiele jest prac dotyczących statycznej niestabilności przepływu w kotłach przepływowych – zwykle chodzi o znalezienie optymalnych modeli przepływów dwufazowych z wymianą ciepła. Najczęściej stosowanymi są modele z podziałem na fazy ciekłą i gazową. Modele te zwiększają jednak liczbę równań koniecznych do rozwiązania rozpatrywanego w tej pracy problemu, co w następstwie zwiększa liczbę potrzebnych danych, a w konsekwencji wydłuża czas obliczeń. Z tego względu opracowałem model matematyczny przepływu dwufazowego w parowniku bazujący na fizykalnych równaniach masy, pędu i energii. Model ten wykorzystałem do wyznaczenia charakterystyk przepływu w modelu parownika i rzeczywistym parowniku kotła przepływowego BP-1150. Przeprowadziłem symulację pracy rzeczywistego parownika kotła parowego dla szerokiego zakresu ciśnienia i temperatury wody zasilającej oraz strumienia ciepła doprowadzanego do parownika. Wykazałem wpływ tych parametrów na kształt charakterystyk przepływu. Stwierdziłem, że w przypadku temperatury i ciśnienia wody zasilającej – 120°C i 4 MPa, na wykresach pojawia się obszar siodłowy, który charakteryzuje przepływ niestabilny (rys. 7). Wraz ze wzrostem strumienia ciepła zwiększa się zakres występowania niestabilności przepływu (zał. 4.1. [1, 23, 34-38]).



Rys. 7. Charakterystyki przepływu w parowniku kotła pod stałym ciśnieniem $p_1 = 4$ MPa i przy stałym strumieniu ciepła $Q_c = 10$ kW/m

W części doświadczalnej zbadałem przepływ mieszaniny cieczo-para na specjalnie wybudowanym stanowisku będącym modelem fizycznym parownika. Mierzyłem spadek ciśnienia i strumień objętości w parowniku, zmieniając temperaturę wody zasilającej na wlocie oraz strumień ciepła doprowadzanego do parownika. Na podstawie pomiarów sporządziłem charakterystyki przepływu dla mieszaniny wody i pary wodnej, a przykładową przedstawiam na rys. 8 (zał. 4.1 [1, 34-38]).



Rys. 8. Porównanie charakterystyk przepływu $\Delta p = f(q_m)$ w parowniku w stałej temperaturze $t_1 = 96^\circ\text{C}$

Wyniki badań eksperymentalnych porównałem z wynikami rozwiązań numerycznych dla modelu parownika. Na tej podstawie stwierdziłem dobrą zgodność wyników pomiarów z wynikami rozwiązania dla modelu matematycznego.

Opracowany przeze mnie model wraz z algorytmem rozwiązania jest prostym narzędziem służącym do analizy przepływów dwufazowych w parownikach kotłów parowych oraz w innych urządzeniach, w których występuje przepływ dwufazowy z wymianą ciepła. Narzędzie to umożliwia kontrolę procesu na podstawie wyznaczonego rozkładu temperatury, ciśnienia i zawartości pary w przepływającej mieszaninie.

W rozdziale 4 omówiłem modelowanie procesu hydraulicznego odpopielania bloków energetycznych. To kolejny proces towarzyszący pracy kotła, służący do transportowania pozostałości po procesie spalania na składowisko powierzchniowe. Z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu wynika, że często przy hydraulicznym transporcie żużła i popiołu udział masowy części stałych nie przekracza 10%. Prowadzi to do małej efektywności tego procesu, a niewłaściwie dobrane parametry przepływu powodują osadzanie i cementację na ściankach rur składników mineralnych wytrącających się z mieszaniny. W związku z tym opracowałem narzędzie w postaci modelu matematycznego i programu obliczeniowego umożliwiającego zbadanie procesu hydraulicznego transportu w celu uzyskania efektów ekonomicznych i środowiskowych (zał. 4.1 [1, 29, 30]).

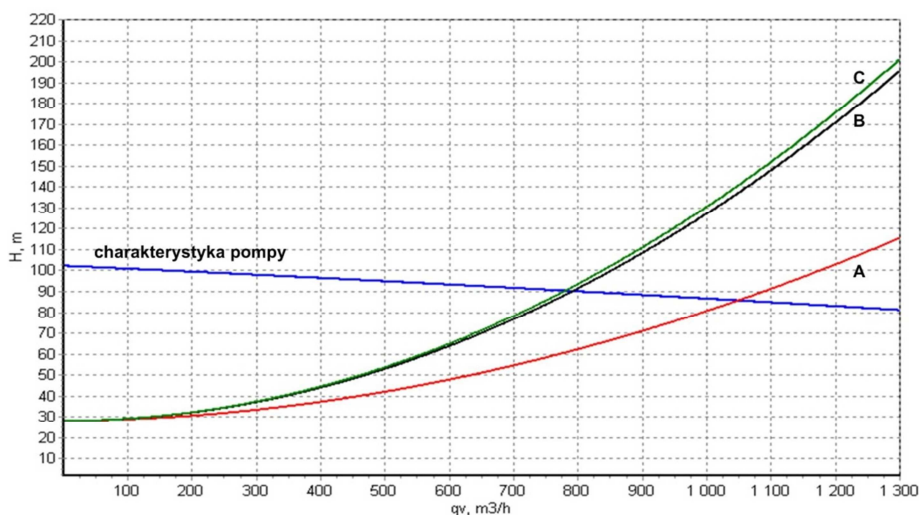
Szczegółowo omówiłem proces tworzenia się i przepływu mieszaniny wieloskładnikowej, czyli wody z popiołem i żużlem. O możliwości jej ruchu decyduje zawartość popiołu i cząstek dużych – o średnicach przekraczających kilka milimetrów. Stwierdziłem, że ważną wielkością jest prędkość opadania cząstek stałych, która (jak wynika z przedstawionych w tej pracy badań) maleje wraz ze wzrostem zagęszczenia mieszaniny. Z tego względu źle dobrana prędkość przepływu mieszaniny może powodować nieprzewidziane opadanie cząstek stałych i osadzanie ich na dnie. Może to prowadzić do zmniejszenia się przekroju poprzecznego rurociągu, a w efekcie do awarii instalacji. Aby temu zapobiec, konieczne jest utrzymywanie parametrów przepływu na odpowiednim poziomie. Z tego względu do analizy tego procesu wykorzystałem model Vocadla i Charlesa, uwzględniający zawartość w mieszaninie cząstek stałych o zarówno małych jak i dużych średnicach. Opracowałem program, który zweryfikowałem na podstawie danych obiektu rzeczywistego jednej z elektrowni.

Badałem wpływ zagęszczenia mieszaniny na prędkość opadania cząstek, wpływ chropowatości powierzchni rurociągu, średnicy, koncentracji popiołu i zawartości cząstek dużych na punkt pracy układu. Wyniki analizy zaprezentowałem w postaci charakterystyk przepływu. Na wykresie przeanalizowałem położenie punktu pracy układu – przecięcie się charakterystyki rurociągu i pompy (zał. 4.1 [1, 29, 30]).

Z analizy wpływu zagęszczenia mieszaniny na prędkość opadania cząstek wynika, że prędkości przepływu mniejsze od 1,8 m/s są prędkościami niekorzystnymi w przypadku przepływu mieszaniny o koncentracji mniejszej niż 10%. W tym zakresie może pojawiać się przepływ wleczony. W związku z tym do utrzymania odpowiednich parametrów pracy układu korzystna jest praca pomp ze strumieniem objętości większym niż 1000 m³/h.

W analizie wpływu chropowatości rurociągu na punkt pracy wykazałem natomiast, że wzrost chropowatości rury o 0,5 mm nie wpływa znacząco na parametry pracy układu.

Wzrost chropowatości do 3 mm przesunął punkt pracy układu do strumienia objętości $750 \text{ m}^3/\text{h}$, co odpowiada prędkości przepływu $1,3 \text{ m/s}$. Prędkość ta jest znacząco mniejsza od prędkości granicznej i może prowadzić do osadzania się popiołów na dnie rurociągu, co zdecydowanie przyspiesza krystalizację i cementację osadów. Przypadek taki może mieć miejsce w rurociągu po długim czasie użytkowania (rys. 9).

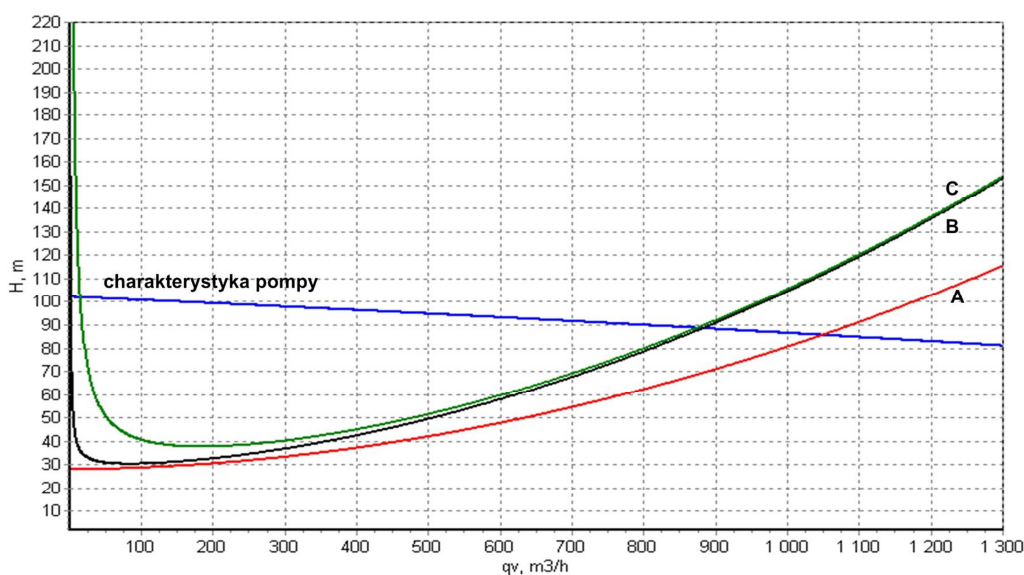


Rys. 9. Charakterystyka przepływu mieszanki dla zmiennej wartości chropowatości powierzchni:
 $k = 0,1 \text{ mm}$ (A), $k = 2,6 \text{ mm}$ (B), $k = 3,0 \text{ mm}$ (C)

Podobnie jest kiedy zmniejsza się średnica rurociągu, co wpływa na wzrost oporów przepływu. Krzywe stają się bardziej strome, a punkt pracy układu przesunął się w lewo – w stronę zmniejszania się strumienia przepływu. Początkowe zmniejszenie się średnicy o 10 mm ma niewielki wpływ na stromość charakterystyk i nie powoduje zagrożenia wytrącania się osadów z płynącej mieszanki. Dalsze zmniejszanie średnicy natomiast wpływa na zmniejszenie się strumienia objętości przepływającej mieszanki do wartości mniejszej niż $1000 \text{ m}^3/\text{h}$. Dla mieszanki o koncentracji 10% jest to już prędkość, która może powodować wytrącanie się niesionych cząstek stałych. Dalsze zmniejszenie średnicy rurociągu (np. o 50 mm) wpływa znacząco na przesunięcie się punktu pracy. Wartość strumienia objętości przepływającej mieszanki spada tu do wartości $750 \text{ m}^3/\text{h}$. Prędkość przepływu jest mniejsza od wartości granicznej. Korzystne staje się tłoczenie mieszanki o zdecydowanie większym zagęszczeniu, np. 20% lub 30% . Prędkość opadania cząstek stałych zmniejsza się.

Z analizy badania wpływu koncentracji popiołu wynika, że zwiększanie koncentracji w niewielkim stopniu wpływa na punkt pracy układu. Charakterystyki przesuwają się w lewą stronę w niewielkim zakresie – maksymalnie do wartości ok. $870 \text{ m}^3/\text{h}$ strumienia przepływu mieszanki dla koncentracji $c_v = 50\%$. Można stwierdzić, że dla mieszanki o koncentracji 25% i 30% przebieg wyznaczonych charakterystyk przepływu odpowiada charakterystykom, jak dla chropowatości rurociągu $k = 0,2 \text{ mm}$ lub średnicy rurociągu 411 mm . Są to charakterystyki, dla których nie występował osad denny. Z tego wynika, że celowe staje się tłoczenie mieszanki o koncentracji nawet 30% , gdyż nie wpływa to znacząco na opory przepływu (zał. 4.1 [1, 29, 30]).

Z analizy wpływu zawartości cząstek dużych wynika, że charakterystyka ta odbiega od charakterystyki wody oraz charakterystyki przepływu mieszaniny zawierającej tylko cząstki małe. Jest to dobrze widoczne od strumienia przepływu $800 \text{ m}^3/\text{h}$. Tworzenie się osadu dennego jest jednak wyraźnie widoczne w przypadku średnicy cząstek większej niż 1 mm . Spadek strumienia przepływu poniżej $100 \text{ m}^3/\text{h}$ powoduje bardzo szybki wzrost oporów przepływu. Charakterystyka rośnie do nieskończoności, co oznacza, że przepływ ustaje (rys. 10). Obszar ten jest jeszcze lepiej widoczny w przypadku średnicy cząstek większych niż 3 mm . Charakterystyka przepływu szybko wzrasta już od strumienia mniejszego niż $300 \text{ m}^3/\text{h}$. Osad denny tworzy się zdecydowanie szybciej ze względu na to, że cząsteczki o tej średnicy są cięższe i szybciej zaczynają opadać na dno rurociągu.



Rys. 10. Charakterystyka przepływu mieszaniny z zawartością cząstek dużych:
woda (A), mieszanina $c_v = 30\%$, $d_p = 1 \text{ mm}$ (B),
mieszanina $c_v = 30\%$, $d_p = 3 \text{ mm}$ (C)

Z przeprowadzonej analizy pracy układu wynika, że tłoczenie mieszaniny o udziale części stałych większym niż 10% jest zdecydowanie korzystniejsze. Główne korzyści to zmniejszenie strumienia wody w obiegu powodujące zmniejszenie zużycia energii elektrycznej przez silniki pomp obiegowych, wolniejsza sedymentacja części stałych, co zapewnia dłuższy czas rozplywu mieszaniny po składowisku. Straty hydrauliczne w mieszaninie o większej koncentracji zwiększają się nieznacznie, co umożliwia zachowanie wymaganych parametrów przepływu (zał. 4.1 [1, 29, 30]).

Na podstawie wyników otrzymanych z modelowania opisanych procesów ciepłoprzepływowych towarzyszących pracy kotła, stwierdziłem, że opracowane do analizy tych procesów narzędzia mogą mieć wpływ na poprawę sprawności już nie tylko kotła energetycznego, ale całego obiegu. Główne korzyści to obniżenie kosztów ekonomicznych oraz ochrona środowiska poprzez obniżenie temperatury spalin, lepsze wykorzystanie powierzchni składowiska, mniejsza awaryjność, większa trwałość i efektywniejsza praca urządzeń.

Wszystkie zamieszczone w tej monografii wyniki stanowią syntezę moich dotychczasowych prac, jak również prac realizowanych we współpracy z partnerami

przemysłowymi i prac realizowanych w ramach projektów badawczych, z których najważniejszym był Strategiczny Program Badawczy „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”. Zadanie nr 1 – „Opracowanie technologii dla wysokosprawnych zero-emisyjnych bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin” realizowany w latach 2010–2015. Temat badawczy w Strategicznym Programie dotyczył „Opracowania, zbadania i sprawdzenia nowych koncepcji odzysku i akumulacji ciepła niskotemperaturowego z bloków energetycznych”. Przytoczone w monografii wyniki badań opublikowałem w postaci artykułów w czasopismach naukowych. Kilka najważniejszych przedstawiam w poniższej tabeli (ich kopie znajdują się w załączniku 7) a cały dorobek w załączniku 3 oraz 4.1.

1.	[45] Szulc P., Tietze T., Rączka P., Wójs K., <i>Porównanie wybranych konstrukcji wymienników ciepła pracujących w układzie odzysku ciepła odpadowego ze spalin</i> , „Archiwum Energetyki”, 2013, t. 43, nr 1-4, s.11-30
2.	[46] Szulc P., Tietze T., Wójs K., <i>Studies on the process of recovering low-temperature waste heat from a flue gas in a pilot-scale plant</i> , „Chemical and Process Engineering”, 2016, vol. 37, nr 4, s. 529-543
3.	[47] Szulc P., Tietze T., Wójs K., <i>Wpływ strumienia objętości spalin na strumień niskotemperaturowego ciepła odpadowego odzyskanego w kondensacyjnym wymienniku ciepła</i> , „Rynek Energii”, 2016, nr 6, s. 43-49
4.	[49] Szulc P., Tietze T., Wójs K., <i>Numerical analysis of a waste heat recovery process with account of condensation of steam from flue gases</i> , „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, 2015, R. 15, nr 4, s. 1017-1023
5.	[53] Tietze T., Szulc P., Wójs K., <i>Stanowisko do badania kondensacyjnego wymiennika ciepła do odzysku ciepła odpadowego ze spalin</i> , „Rynek Energii”, 2014, nr 3, s. 93-100
6.	[54] Tietze T., Szulc P., Wójs K., <i>Wyznaczanie ciepła skraplania pary wodnej na przykładzie kondensacyjnego wymiennika ciepła do odzysku ciepła odpadowego ze spalin</i> , „Rynek Energii”, 2015, nr 1, s. 76-82
7.	[58] Wójs K., Redzicki R., Szulc P., Sitka A., <i>Właściwości fizykochemiczne i reologiczne mieszaniny wodnej żużla i popiołu</i> , „Inżynieria Chemiczna i Procesowa”, 2006, t. 27, z. 3/2, s. 1101-1116
8.	[60] Wójs K., Szulc P., <i>Analysis of possible occurrence of flow instability in once-through steam boiler</i> , “VGB Powertech”, 2004, vol. 84, nr 11, s. 86-90
9.	[61] Wójs K., Szulc P., <i>Badania niestabilności zjawisk w parowniku kotła przepływowego</i> , „Inżynieria Chemiczna i Procesowa”, 2004, t. 25, z. 4, s. 2439-2447
10.	[64] Wójs K., Szulc P., Redzicki R., Cirkos B., <i>Analiza pracy rzeczywistego układu hydraulicznego odpopielania bloków energetycznych</i> , „Archiwum Energetyki”, 2006, t. 36, nr spec., s. 275-285
11.	Szulc Piotr, Tietze Tomasz, 2017, Recovery and energy use of flue gas from a coal power plant, <i>Journal of Power Technologies</i> 97 (2), s. 135–141

5. Omówienie pozostałych osiągnięć

5.1. Dorobek naukowo-badawczy

Cały mój dorobek naukowo-badawczy jest związany z energetyką konwencjonalną, a w szczególności z zagadnieniami dotyczącymi pracy bloku energetycznego. Oprócz problemów poruszonych w monografii podejmowana przeze mnie tematyka badawcza ma związek z procesem odzysku ciepła odpadowego również w innych aspektach, cementacją mieszaniny popiołu i żużla z wodą na ściankach rurociągów hydraulicznego odpopielania bloków energetycznych, zjawiskiem kawitacji czy zgazowania biomasy.

Odzyskiem ciepła odpadowego ze spalin zajmuję się praktycznie od samego początku mojej pracy naukowej. Potwierdzeniem mojej pracy są artykuły opublikowane w ramach konferencji naukowych, w których zwracałem uwagę na wzrost sprawności bloku energetycznego o mocy 200 MW w przypadku zainstalowania układu do odzysku ciepła ze spalin wylotowych. Badania te polegały na symulacji pracy bloku z zainstalowanym układem do odzysku ciepła odpadowego, a do prac wykorzystywałem opracowany przeze mnie model matematyczny bloku o mocy 200 MW. Wyniki prac przedstawiono w postaci charakterystyk, z analizy których można zauważyć wzrost sprawności w zależności od stopnia odzyskanego strumienia ciepła odpadowego (zał. 4.1 [25, 33, 41, 42, 43]).

Wyniki moich badań zostały również potwierdzone w czasie prac w trakcie realizacji Programu Strategicznego – Zadanie 1 „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”, w którym wykazaliśmy poprawę sprawności referencyjnego bloku o mocy 900 MW w sytuacji zarówno zawrócenia ciepła odpadowego do bloku, jak i sprzedaży tego ciepła na zewnątrz elektrowni (zał. 4.1 [50–55]). Do moich ważnych osiągnięć w tej dziedzinie zaliczyć można udział w projektowaniu i budowie stanowiska laboratoryjnego do badania kondensacyjnego wymiennika ciepła zainstalowanego w laboratorium Zakładu Mechaniki i Systemów Energetycznych Politechniki Wrocławskiej oraz instalacji pilotowej do sprawdzenia procesu odzysku ciepła odpadowego ze spalin podłączonej do kanału spalin bloku 360 MW w Elektrowni Bełchatów. W ramach tych prac mam jedno zgłoszenie patentowe (zał. 4.1 [56]).

W ramach prac w Programie Strategicznym prowadziłem również badania wpływu kondensacyjnego wymiennika ciepła na proces oczyszczania spalin z popiołu, kwasów (HF, HCl), metali (Zn, Ni, Cr, Cu, Pb) oraz rtęci (zał. 4.1 [2, 3]). Na podstawie analizy wyników badań wykazano zdecydowany wpływ zainstalowania wymiennika na stopień oczyszczenia spalin pochodzących z węgla brunatnego, w szczególności rtęci i metali ciężkich.

Problemem odzysku ciepła zajmowałem się również w trakcie realizacji wspólnie z Elektrownią Turów, Projektu Celowego „Technologia odzysku ciepła i wody odpadowej w Elektrowni Turów”, w którego ramach został opracowany i uruchomiony prototyp układu do odzysku ciepła oraz wody odpadowej w elektrowni Turów (zał. 4.1 [57-59]). Mój udział polegał na opracowaniu części instalacji i jej testowaniu.

Aktualnie biorę udział w Programie Badawczym: wspólne przedsięwzięcie – CuBR „Opracowanie innowacyjnej technologii magazynowania energii z wykorzystaniem technik sztucznej inteligencji”, w którym odpowiadam za identyfikację źródeł ciepła

odpadowego, wykonanie obliczeń do projektów technologicznych instalacji odzyskujących to ciepło oraz projektowanie układów wykorzystujących odzyskane ciepło odpadowe.

Uczestniczyłem również w pracach badawczych dotyczących cementacji osadów na ściankach rurociągów tłoczących mieszaninę popiołu z żużlem i wodą (zał. 4.1 [26, 27, 60]). Jest to zjawisko bardzo niekorzystne, powodujące wzrost oporów przepływu mieszaniny, a tym samym wzrost zapotrzebowania na energię instalacji. W ramach tych prac wyznaczałem charakterystyki granulometryczne popiołu, reologiczne mieszaniny, badałem wpływ składników mineralnych wody obiegowej na szybkość zarastania rur, a także wpływ zagęszczenia mieszaniny na szybkość jej sedymentacji oraz szybkość rozprętu.

Zajmowałem się też badaniem metod zapobiegania zjawisku kawitacji w urządzeniach i systemach energetycznych – głównie opracowywaniem wyników badań (zał. 4.1 [32]).

W Programie Strategicznym Zadanie 4 „Opracowanie zintegrowanych technologii wytwarzania paliw i energii z biomasy, odpadów rolniczych i innych” natomiast brałem czynny udział w badaniach procesu zgazowania biomasy, którą był wywar gorzelniany po produkcji bioetanolu (zał. 4.1 [45–49]). Mój wkład polegał na opracowaniu otrzymanych wyników badań i przygotowaniu raportów.

Brałem również czynny udział w pracach zespołu eksperckiego zajmującego się „Oceną przyczyn nieprawidłowej pracy pomp wody nadosadowej zainstalowanych w pompowni wody powrotnej dla składowiska odpadów paleniskowych w Elektrowni Bełchatów S.A.” oraz wydaniem „Opinii technicznej wielowariantowej koncepcji rewitalizacji urządzeń kotłowych i wielowariantowej koncepcji modernizacji urządzeń maszynowni” (zał. 4.1 [61]).

5.2. Podsumowanie dorobku naukowo-badawczego po doktoracie

Podsumowanie dorobku naukowego po doktoracie przedstawiam w poniższych tabelach, szczegółowy wykaz mojego dorobku naukowo-badawczego natomiast w załączniku 3: „Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki”.

Monografie, publikacje, referaty i udział w konferencjach	Razem
Publikacje w czasopismach z listy Journal Citation Reports (JCR)	6
Redakcja monografii	2
Rozdziały w monografiach i książkach	8
Publikacje w czasopismach międzynarodowych lub krajowych spoza listy Journal Citation Reports (JCR)	14
Referaty na konferencjach naukowych międzynarodowych i krajowych	26
Prace niepublikowane, raporty	18

Oryginalne osiągnięcia, patenty, wzory użytkowe i zgłoszenia	Razem
Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne	3
Zgłoszenia patentowe	1
Projekty badawcze krajowe	4

Impact factor, index Hirscha i liczba cytowań	Razem
Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	4,399
Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (w latach 2003–2017)	4
Indeks Hirscha według bazy Web of Science	1
Liczba punktów ministerialnych	147

5.3. Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki

Od początku zatrudnienia na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym – najpierw na stanowisku asystenta, a następnie adiunkta – czynnie uczestniczę w przygotowaniach oraz prowadzeniu zajęć dydaktycznych.

Do moich najważniejszych osiągnięć w tej dziedzinie zaliczam wkład w przygotowanie materiałów i opracowanie kursów zgodnie z Krajowymi Ramami Kształcenia z mechaniki 1, mechaniki 2, podstaw mechaniki i wytrzymałości materiałów, mechaniki i wytrzymałości materiałów oraz kursów anglojęzycznych „Fundamentals of mechanics and strength of materials” i „Mechanics and strength of materials”. Uczestniczyłem też w przygotowywaniu aktualnych instrukcji do ćwiczeń laboratoryjnych z mechaniki płynów.

Jestem prowadzącym, następujących kursów dla studentów I stopnia studiów stacjonarnych, na specjalności energetyka oraz mechanika i budowa maszyn: „Pakiety użytkowe” – zajęcia komputerowe (laboratorium), „Komputerowe wspomaganie prac inżynierskich AutoCad” – zajęcia komputerowe (laboratorium), „Mechanika płynów” – ćwiczenia rachunkowe i laboratorium, „Podstawy mechaniki i wytrzymałości materiałów” – wykład i ćwiczenia rachunkowe, „Mechanika i wytrzymałość materiałów” – wykład i ćwiczenia rachunkowe, „Mechanika 1” – wykład i ćwiczenia rachunkowe, „Mechanika 2” – wykład i ćwiczenia rachunkowe.

Prowadziłem również kursy w języku angielskim dla studentów I stopnia studiów stacjonarnych specjalności energetyka: „Fundamentals of mechanics and strength of materials” – wykład i ćwiczenia rachunkowe, „Mechanics and strength of materials” – wykład i ćwiczenia rachunkowe.

Od roku 2007 jestem poza tym głównym prowadzącym zajęć dla studentów I stopnia studiów niestacjonarnych na specjalności energetyka oraz mechanika i budowa maszyn: „Mechanika 1” – wykład i ćwiczenia rachunkowe, „Mechanika 2” – wykład i ćwiczenia

rachunkowe, „Podstawy mechaniki i wytrzymałości materiałów” – wykład i ćwiczenia rachunkowe oraz „Mechanika i wytrzymałość materiałów” – wykład i ćwiczenia rachunkowe.

Prowadzę również zajęcia laboratoryjne z mechaniki płynów dla studentów specjalności inżynieria lotnicza. Wcześniej prowadziłem jeszcze zajęcia rachunkowe z mechaniki płynów na Wydziale Inżynierii Środowiska.

Co roku prowadzę projekty indywidualne inżynierskie i magisterskie. Dotychczas byłem promotorem dziewięciu prac inżynierskich i dwóch magisterskich, których tematyka nawiązuje do moich zainteresowań naukowych dotyczących procesów ciepłno-przepływowych w bloku energetycznym.

Jestem systematycznie powoływany na członka Komisji Egzaminacyjnej prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich dla studentów studiów stacjonarnych i niestacjonarnych.

Od samego początku zatrudnienia włączyłem się do działań związanych z promocją Wydziału i Uczelni. Między innymi uczestniczyłem w organizowaniu wystaw w szkołach średnich reklamujących i zachęcających młodzież do podjęcia nauki na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym. Jako prelegent promowałem go w trakcie tzw. dni otwartych. Jednak do moich najważniejszych osiągnięć zaliczam czynną promocję Wydziału, Uczelni i przede wszystkim popularyzuję nauki w ramach Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej z cyklu ENERGETYKA, której w latach 2004–2008 byłem członkiem, a od 2008 do dziś jestem sekretarzem Komitetu Organizacyjnego. Konferencja ta jest spotkaniem pracowników naukowych wyższych uczelni, placówek naukowo-badawczych, a także pracowników sektora gospodarczego z kraju i zagranicy. Zwykle to około 200 uczestników prezentujących swoje osiągnięcia podczas dyskusji panelowych, sesji plenarnych i tematycznych, także w postaci wystaw i prezentacji promocyjnych. Kluczowe tematy i zagadnienia dyskutowano z ważnymi przemysłowymi partnerami krajowymi i zagranicznymi – zwłaszcza z koncernami wytwarzającymi energię elektryczną: dawne RWE Polska (Innogy), PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A., TAURON Wytwarzanie S.A. oraz z wielką odbiorcą energii – KGHM Polska Miedź S.A. Do popularyzacji nauki włączyłem się również, jako sekretarz naukowy czasopisma „Journal of Energy Science”, które wydawano w postaci zeszytów, złożonych z artykułów naukowych, zgłoszonych w ramach konferencji z cyklu ENERGETYKA.

W tym miejscu warto jeszcze wymienić cyklicznie organizowane seminaria sprawozdawcze Programu Strategicznego „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii” – części Zadania 1, które organizowałem jako sekretarz koordynatora merytorycznego grupy zadań I i II. Na seminariach tych poszczególni wykonawcy prezentowali wyniki i postępy prac realizowanych w ramach Programu.

W latach 2005–2006 byłem autorem i osobą odpowiedzialną za obsługę strony internetowej ówczesnego Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów.

Czynnie uczestniczyłem w seminariach i konferencjach naukowych krajowych i zagranicznych, na których prezentowałem w postaci referatów swoje osiągnięcia naukowe (zał. 3).

5.4. Działalność organizacyjna

Od samego początku zatrudnienia na moim Wydziale angażuję się w działalność organizacyjną. Ze wszystkich osiągnięć w tej dziedzinie za najważniejszą uważam współorganizację Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej z cyklu ENERGETYKA stanowiąca duże wyzwanie. Pierwszy raz do Komitetu Organizacyjnego zostałem włączony w 2004 r, a moja praca i zaangażowanie zostały szybko dostrzeżone. Zakres obowiązków oraz odpowiedzialności z każdą następną edycją ulegał rozszerzaniu do tego stopnia, że od 2008 r. pełnię funkcję sekretarza tej Konferencji. W tym czasie miałem możliwość kierowania i koordynowania prac zespołu wykonawczego konferencji, przygotowywania programu i materiałów, aranżowania spotkań komitetu organizacyjnego i naukowego konferencji, opracowywania budżetu, współpracy z redaktorami naczelnymi czasopism naukowych („Chemical and Process Engineering”, „Archiwum Energetyki”, „Archives of Thermodynamics”, „Systems”, „Archiwum Spalania”, „Archivum Combustionis”), w których publikowane były artykuły zgłaszane przez uczestników konferencji, tworzenia i prowadzenia strony internetowej konferencji. Przy okazji VIII edycji ENERGETYKI uczestniczyłem w organizacji 60-lecia Wydziału Mechaniczno-Energetycznego.

Moją działalność docenił prof. dr hab. inż. Kazimierza Wójs, i w latach 2010–2015 r. powierzył mi funkcję sekretarza koordynatora merytorycznego grup tematycznych I i II części Programu Strategicznego „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii” Zadanie 1. Zadaniem grupy tematycznej I było: „Opracowanie zestawu algorytmów i programów do pełnej i wiarygodnej symulacji pracy bloku energetycznego o złożonej strukturze technologicznej w różnych stanach obciążenia z uwzględnieniem separacji CO₂”, a grupy II – „Identyfikacja, badania i sprawdzenie nowych koncepcji wzrostu sprawności węglowych technologii wytwarzania elektryczności i ciepła”. Koordynacja merytoryczna obejmowała 13 tematów realizowanych przez zespoły badawcze z Politechniki Wrocławskiej, Politechniki Śląskiej, Politechniki Warszawskiej, Politechniki Częstochowskiej, Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrzu oraz Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Do moich zadań należało organizowanie seminariów sprawozdawczych, przygotowywanie sprawozdań z postępów prac poszczególnych zespołów oraz czynne uczestnictwo w seminariach sprawozdawczych organizowanych przez Lidera Programu.

Od 2015 roku pełnię funkcję sekretarza Wydziałowej Komisji Konkursowej prac dyplomowych im. Prof. Romana Sobolskiego. Komisja wybiera najlepsze prace z dziedziny mechaniki i budowy maszyn. Moim głównym zadaniem w ramach komisji jest wstępny wybór zgłoszonych wniosków, przygotowanie dokumentacji konkursowej i przedstawienie wstępnie wybranych wniosków na posiedzeniach komisji.

Moje zaangażowanie zostało zauważone przez władze Wydziału i w 2006 r. zostałem powołany na członka Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej, w której pracach uczestniczyłem do 2012 r.

W tym samym roku zostałem powołany do Wydziałowej Komisji ds. Oceny i Zapewnienia jakości kształcenia dla kierunku energetyka, a w 2015 r. Komisji ds. Podziału Środków z dotacji w ramach działalności statutowej Wydziału Mechaniczno-Energetycznego.

Moje zaangażowanie dostrzeżone przez współpracowników poskutkowało tym, że w latach 2008–2012 zostałem powołany na członka Rady (ówczesnego) Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów.

Doceniony w tej dziedzinie zostałem również przez władze Uczelni, o czym świadczą otrzymane przeze mnie Nagrody Rektora przyznane w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni w latach 2011, 2013 i 2014. W 2012 roku zostałem odznaczony brązowym medalem przez Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej za długoletnią służbę, a 2004 r. za całokształt działalności naukowo-dydaktycznej przez Dziekana Wydziału.

Aktualnie pełnię funkcję zastępcy Kierownika Zakładu Mechaniki i Systemów Energetycznych oraz Kierownika Laboratorium Mechaniki i Systemów Energetycznych.

Piotr Sulc