

## Autoreferat

1. Imię i nazwisko: **Sławomir Stelmach**.

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

**2004 – doktor nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska**, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, tytuł rozprawy doktorskiej: Wpływ warunków pirolizy na wybrane parametry struktury wewnętrznej karbonizatów z osadów ściekowych.

**1994 – magister inżynier**, kierunek: inżynieria chemiczna i procesowa, specjalność: inżynieria chemiczna i budowa aparatury, Wydział Chemiczny, Politechnika Śląska.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.

**09.2013 -** - **Dyrektor Centrum Badań Technologicznych / Adiunkt**, Centrum Badań Technologicznych, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze

**02.2005 - 08.2013** - **Zastępca Dyrektora Centrum Badań Akredytowanych / Adiunkt**, Centrum Badań Akredytowanych, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze

**10.2004 - 01.2005** - **Adiunkt**, Centrum Badań Akredytowanych, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze

**02.2002 - 09.2004** - **Asystent II**, Zakład Koksownictwa i Ochrony Środowiska / Centrum Badań Akredytowanych, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze

**05.1996 - 01.2002** - **Asystent I**, Zakład Technologii Ochrony Środowiska / Zakład Koksownictwa i Ochrony Środowiska, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze

**11.1995 - 04.1996** - **Starszy inżynier chemik**, Zakład Technologii Ochrony Środowiska, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze

**01.1995 - 10.1995** - **Inżynier chemik**, Zakład Technologii Ochrony Środowiska, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze

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

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego:

Monografia: **Piroliza odpadów jako element gospodarki o obiegu zamkniętym.**

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy):

**Stelmach S.: Piroliza odpadów jako element gospodarki o obiegu zamkniętym. 2019, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, recenzenci wydawniczy: prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak, prof. dr hab. Adam Smoliński.**

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

Monografia będąca moim osiągnięciem naukowym, jest efektem moich wieloletnich zainteresowań metodami termicznego przekształcania odpadów oraz prac badawczych prowadzonych przeze mnie w tym obszarze wiedzy. Moim szczególnym zainteresowaniem od lat cieszy się piroliza odpadów i to przede wszystkim jej poświęcona jest omawiana praca.

Piroliza to proces degradacji (rozkładu) złożonej cząsteczki związku chemicznego pod wpływem dostatecznie wysokiej temperatury w środowisku beztlenowym. Piroliza jest zatem konwersją termiczną paliw prowadzoną w układzie zamkniętym, a więc bez doprowadzania z zewnątrz dodatkowych substratów (przede wszystkim tlenu), których obecność wpływa na zmianę spektrum uzyskiwanych produktów. W zależności od wysokości temperatury procesu rozróżnia się pirolizę niskotemperaturową - w przypadku przeróbki paliw węglowych zwaną potocznie wylewaniem (ok. 723÷973 K) oraz wysokotemperaturową - nazywaną koksowaniem (ok. 1173÷1373 K). Produkty uzyskane w efekcie pirolizy paliw, są wyłącznie wynikiem termicznej destrukcji wsadu i wtórnych reakcji zachodzących pomiędzy związkami chemicznymi powstałymi w trakcie rozpadu surowca. Produktami pirolizy paliw stałych (w tym odpadów) są najczęściej: gaz pirolityczny (zawierający zwykle CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, pył i inne śladowe zanieczyszczenia), frakcja ciepla

(wodno-smołowo-olejowa) oraz karbonizat (zawierający również składniki nieorganiczne wsadu poddawanego przeróbce).

Na skład i uzysk produktów pirolizy odpadów wpływa wiele czynników. W pierwszym rzędzie o właściwościach produktów decyduje rodzaj poddanego pirolizie odpadu. Dodatkowo o jakości i ilości powstających produktów decyduje cały szereg parametrów, w tym m.in. rodzaj i konfiguracja reaktora (prawdopodobnie najszerszy wachlarz możliwych rozwiązań konstrukcyjnych wśród procesów termicznych), sposób przygotowania wsadu, rozmiar cząstek, czas przebywania paliwa w reaktorze, sposób ogrzewania, temperatura procesu, czy też czas przebywania pierwotnych produktów rozkładu w strefie wysokiej temperatury.

Piroliza (jako proces fizykochemiczny, a nie technologia) jest fundamentalnym elementem wszystkich przemian termicznych paliw stałych, gdyż inicjuje zachodzenie konwersji termochemicznej paliwa, także w procesach zgazowania i spalania. Jest ona pierwszym etapem rozkładu paliwa i decyduje o przebiegu dalszych reakcji chemicznych zachodzących zarówno w fazie homogenicznej, jak i heterogenicznej.

Instalacje pirolizy odpadów są wciąż nielicznie stosowanymi rozwiązaniami technicznymi dla termicznego przekształcania odpadów. W tym względzie zdecydowanie bardziej rozpowszechnione są instalacje badawcze i prace badawczo-rozwojowe prowadzone z ich wykorzystaniem, co ma konsekwencje w znacznej liczbie publikacji naukowych z tego obszaru tematycznego. Niemniej jednak na przestrzeni lat funkcjonowały rozmaite instalacje komercyjne przetwarzające różnego rodzaju odpady o charakterze palnym. Wiele z nich z różnych względów zakończyło pracę, część w dalszym ciągu funkcjonuje, a powstają również nowe.

Racjonalne użytkowe zagospodarowanie produktów pirolizy odpadów pozwala wpisać się tej metodzie przeróbki w łańcuch działań gospodarki odpadami spójny z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym. Idea ta polega w ogólnym ujęciu na zwiększaniu poziomu recyklingu odpadów i ponownego użycia materiałów, co pozwoli zmaksymalizować wykorzystanie wszystkich dostępnych surowców, produktów i odpadów, a to z kolei ma umożliwić oszczędzanie energii i zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. Szczególnie trudnym zagadnieniem w przypadku pirolizy odpadów jest wskazanie możliwości użytecznego zastosowania karbonizatów, uzyskiwanych z przeróbki materiałów o różnej charakterystyce fizykochemicznej.

Głównym celem badań przedstawianych w mojej monografii było określenie możliwości utylitarne wykorzystania karbonizatów wytwarzanych z różnych odpadów palnych. Możliwość ta oceniana była w oparciu o wyniki badań właściwości karbonizatów uzyskiwanych w różnych skalach badawczych oraz testowanie różnych metod aplikacji tych materiałów.

W monografii przedstawiłem wyniki badań procesu pirolizy ośmiu różnych odpadów. Poszczególne podrozdziały omawiają szczegółowo sytuację w zakresie aktualnego stanu gospodarki danym rodzajem odpadu, opis wykonanych badań, omówienie uzyskanych wyników wraz z analizą eksperymentalną bądź koncepcyjną możliwości utylitarnego wykorzystania produktów pirolizy. Badaniom poddane były:

- a) osady ściekowe z biologicznego oczyszczania ścieków,
- b) zużyte opony samochodowe,
- c) odpadowe drewno impregnowane olejem kreozotowym,
- d) odpady komunalne,
- e) paliwa z odpadów (SRF – solid recovered fuel),
- f) lekka frakcja z mechanicznej rozbiórki samochodów (ASR – automotive shredder residue),
- g) odpadowe jonity,
- h) odpady tekstylne.

ad a). Badania pirolizy osadów ściekowych prowadziłem z zastosowaniem różnych technik i w różnych skalach eksperymentalnych, począwszy od badań z wykorzystaniem techniki termogravimetrycznej, poprzez eksperymenty w skali wielkolaboratoryjnej (reaktor ze złożem stałym, ~1 kg/szarżę), a na badaniach przemysłowych skończywszy (kopiroliza z węglem w baterii koksowniczej). Jako surowiec wyjściowy wykorzystałem osady pochodzące z oczyszczalni ścieków komunalnych oraz oczyszczalni ścieków komunalno-przemysłowych. Przed wykonaniem eksperymentów pirolizy w układach laboratoryjnych osady poddawałem procesom podsuszania i granulacji. Karbonizaty uzyskiwane z osadów ściekowych charakteryzowałem strukturalnie z zastosowaniem adsorpcji azotu. Izotermi adsorpcji/desorpcji azotu, które wyznaczyłem dla karbonizatów otrzymanych z osadów ściekowych w warunkach laboratoryjnych, były izotermami IV typu, z charakterystyczną pętlą histerezy typu H3, będącą efektem zjawiska kondensacji kapilarnej występującego w porach adsorbentów. Fakt ten sugerował, iż materiały te cechują się podobieństwem właściwości do węgla aktywnych produkowanych z prekursorów biomasowych lub węglowych, co stało się dla mnie inspiracją do dalszych badań nad możliwością wykorzystania karbonizatów z osadów ściekowych w charakterze adsorbentów. Uzyskane w moich badaniach karbonizaty z osadów ściekowych charakteryzowały się generalnie słabo rozwiniętą strukturą wewnętrzną, z małą objętością mikroporów, jednak pojemność sorpcyjna tych materiałów wzrastała wraz z temperaturą końcową procesu pirolizy. Wyznaczone krzywe  $dV/dD$  w funkcji średnic porów wskazywały na występowanie ekstremum objętości porów o średnicach około 3÷4 nm, a więc najmniejszych mezoporów, które mogą być

artefaktem rozkładu ścian komórek mikroorganizmów obecnych w przerabianych pirolitycznie osadach ściekowych.

Celem potwierdzenia tezy, że karbonizaty z osadów ściekowych mogą pełnić rolę tanich zastępników komercyjnych adsorbentów węglowych w wybranych zastosowaniach, dla karbonizatów o najlepszych parametrach strukturalnych wykonałem eksperymenty adsorpcji z fazy ciekłej oraz adsorpcji/katalizy w fazie gazowej. Dla przetestowania zdolności usuwania zanieczyszczeń z fazy ciekłej przez karbonizaty z osadów ściekowych wykonałem testy ciągłego oczyszczania wody zafenolowanej oraz test ciągłego oczyszczania ścieków komunalnych (testy dynamiczne, układ przepływowy). Dodatkowo przeprowadziłem statyczne testy adsorpcyjnego oczyszczania ścieków komunalnych, ścieków koksowniczych oraz wodnego roztworu p-chlorofenolu. Badania adsorpcji zanieczyszczeń z fazy ciekłej za pomocą karbonizatów z osadów ściekowych wykazały słabe właściwości sorpcyjne tych materiałów. Dlatego nie można rekomendować ich do zastosowania w takich procesach dla usuwania zanieczyszczeń, których redukcję badałem w przeprowadzonych testach.

Karbonizaty z osadów ściekowych poddałem także laboratoryjnym testom adsorpcyjnego usuwania  $\text{SO}_2$  z gazów spalinowych oraz katalitycznej redukcji tlenków azotu. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań stwierdziłem, że rezultaty te są znacznie lepsze niż te, które uzyskałem podczas testów prowadzonych w fazie ciekłej. Uzyskany rezultat usuwania  $\text{SO}_2$  z gazów spalinowych za pomocą karbonizatu z osadów ściekowych potwierdził dobre właściwości adsorpcyjne tego materiału względem dwutlenku siarki, co może predysponować go do praktycznego zastosowania w adsorpcyjnych procesach oczyszczania spalin. Mechanizm sorpcji  $\text{SO}_2$  na badanym karbonizacie jest prawdopodobnie podobny do mechanizmu sorpcji  $\text{SO}_2$  na koksach aktywnych, o czym świadczył fakt całkowitej desorpcji  $\text{SO}_2$  z karbonizatu poddanego regeneracji (ilość zdesorbowanego  $\text{SO}_2$  kontrolowana była analitycznie). Wyklucza to więc praktycznie możliwość zachodzenia nieodwracalnej chemisorpcji na nieorganicznych składnikach karbonizatu. Z kolei uzyskany w przeprowadzonych przeze mnie badaniach stopień redukcji tlenków azotu dla badanego karbonizatu był wyższy niż dla komercyjnego koksu aktywnego HOK i tylko nieznacznie niższy niż dla koksów AKP-10, czy też MMC-10. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdziłem, że karbonizaty z osadów ściekowych mogą stanowić substytut komercyjnych koksów aktywnych wykorzystywanych w procesach sorpcji  $\text{SO}_2$  i katalitycznej redukcji tlenków azotu. Możliwość takiego zastosowania karbonizatów z osadów ściekowych uwiarygodnia również ich wysoka wytrzymałość mechaniczna, parametr niezbędny dla adsorbentów/katalizatorów stosowanych w adsorpcyjno-katalitycznych technologiach oczyszczania spalin.

W ramach eksperymentów przemysłowych przeprowadziłem także badania wpływu dodatku osadów ściekowych na jakość wytwarzanego koksu. Maksymalny udział osadów ściekowych w mieszankach węglowych poddawanych koksowaniu wynosił 8%<sub>mas.</sub>. Ocena jakości otrzymanych koksów oparta była o wyniki testu NSC (metoda Nippon Steel Corporation). Przeprowadzone z moim udziałem eksperymenty i ich wyniki wykazały, że udział odwodnionych osadów ściekowych w mieszance wsadowej kierowanej do koksowania (kopiroliza) nie powinien przekraczać 4%<sub>mas.</sub>, ze względu na konieczność utrzymania na pożądanym poziomie podstawowych parametrów koksu – CRI (coke reactivity indeks) i CSR (coke strength after reaction).

ad b). Badania pirolizy zużytych opon samochodowych (granulatu gumowego z mechanicznej przeróbki opon) prowadziłem w skali laboratoryjnej z wykorzystaniem termograwimetru, a także instalacji laboratoryjnej z reaktorem ze złożem stałym ogrzewanym w piecu elektrycznym (~3 kg/szarżę). Na podstawie wykonanych badań pirolizy granulatu gumowego prowadzonej z wykorzystaniem termograwimetru stwierdziłem, że badana próbka ulega rozkładowi termicznemu w zakresie temperatur od około 553 do około 823 K, przy czym największa intensywność wydzielania lotnych produktów rozkładu występuje w przedziale około 653-773 K. Powyżej temperatury 773 K rozkład termiczny testowanego materiału był już praktycznie zakończony (dla przyjętej prędkości ogrzewania), przy uzysku karbonizatu na poziomie około 40%<sub>mas.</sub>. Dalszy ubytek masy podczas nagrzewania próbki był nieznaczny. Karbonizaty z opon uzyskane przeze mnie w warunkach laboratoryjnych charakteryzowały się relatywnie niską zawartością popiołu, niskimi zawartościami części lotnych i słabymi właściwościami adsorpcyjnymi. Ich podstawowe właściwości pozwalały przypuszczać, że mogą być dobrymi prekursorami do dalszej konwersji w celu wytworzenia adsorbentów węglowych, dlatego poddałem je testom aktywacji parowo-gazowej w celu wytworzenia z nich użytecznych adsorbentów. Badaniom aktywacji poddałem ponadto karbonizat z opon samochodowych wytworzony w piecu obrotowym zlokalizowanym w Wielkiej Brytanii.

Aktywację fizyczną karbonizatów ze zużytych opon z użyciem pary wodnej prowadziłem z wykorzystaniem instalacji z reaktorem ze złożem stałym, a także z użyciem pieca obrotowego (złoże ruchome). Zaobserwowałem, że karbonizaty z opon, niezależnie od pochodzenia oraz warunków wstępnej obróbki pirolitycznej, wykazują podobne zachowanie w procesie aktywacji fizycznej parą wodną. Wraz z wydłużeniem czasu aktywacji maleje uzysk produktu oraz rośnie w nim zawartość popiołu ze względu na zachodzące reakcje zgazowania matrycy węglowej. Natomiast właściwości adsorpcyjne produktu wyrażone w postaci liczby adsorpcji jodu LJ oraz powierzchni właściwej  $S_{BET}$  wykazują maksimum po około 50 minutach trwania

procesu aktywacji. W procesie aktywacji karbonizatu z opon samochodowych uzyskałem dla produktu aktywowanego blisko trzykrotny wzrost jego pojemności sorpcyjnej wobec jodu w porównaniu do surowca wyjściowego. W przypadku powierzchni właściwej wzrost ten był około 25-krotny. Przeprowadzone przeze mnie testy wykazały dobrą podatność karbonizatów z opon samochodowych na aktywację parą wodną. Najlepsze produkty aktywacji posiadały dobre własności adsorpcyjne i mogłyby znaleźć praktyczne wykorzystanie w technice adsorpcyjnego doczyszczania ścieków lub gazów. Wytyczne procesowe, które określiłem na podstawie wyników badań laboratoryjnych aktywacji w złożu stałym wskazywały na konieczność prowadzenia procesu aktywacji do uzysku produktu wynoszącego około 50%<sub>mas.</sub>. Testy aktywacji w piecu obrotowym wykazały, że najlepszy jakościowo produkt otrzymywałem przy uzyskach produktu w granicach 35÷40%<sub>mas.</sub>. Moje badania wykazały, że możliwe jest wytworzenie ze zużytych opon samochodowych adsorbentów węglowych o przeciętnej jakości ( $S_{BET} \approx 400 \text{ m}^2/\text{g}$ ), poprzez ich sekwencyjną karbonizację (pirolizę) i aktywację parą wodną uzyskanego karbonizatu.

Wytworzony przeze mnie ze zużytych opon samochodowych adsorbent, charakteryzujący się m.in. wartością liczby jodowej wynoszącą 550 mg/g i powierzchnią właściwą  $S_{BET} = 350 \text{ m}^2/\text{g}$ , wykorzystałem w badaniach adsorpcyjnego doczyszczania dwóch rodzajów oczyszczonych ścieków przemysłowych – z produkcji pestycydów oraz z koksowni. Testy te wykazały dobre właściwości badanego adsorbentu z opon samochodowych w zakresie usuwania zanieczyszczeń organicznych ze ścieków koksowniczych oraz pestycydów fosforoorganicznych ze ścieków z zakładu produkującego pestycydy. Generalnie za pomocą 1 kg adsorbentu węglowego wytworzonego z opon samochodowych można oczyścić od kilku do kilkunastu metrów sześciennych uciążliwych ścieków, w zależności od początkowego stężenia usuwanych zanieczyszczeń.

Oprócz testów adsorpcyjnego doczyszczania ścieków współuczestniczyłem także w badaniach wykorzystania karbonizatów ze zużytych opon samochodowych w charakterze adsorbentów rtęci w fazie gazowej (bez poddawania karbonizatów dodatkowej aktywacji parowo-gazowej). Adsorpcję par rtęci w złożu badanych adsorbentów prowadziłem w standardowej aparaturze stosowanej do badań adsorpcji na koksach aktywnych. Materiałem porównawczym w wykonanych badaniach był koks aktywny AKP-5. Stwierdziłem, że wpływ temperatury na stopień adsorpcji par rtęci jest nieco odmienny dla koks aktywnego i karbonizatów otrzymanych z opon samochodowych. W przypadku karbonizatów zaobserwowałem wyraźne polepszenie skuteczności usuwania par rtęci wraz ze wzrostem temperatury, szczególnie w przedziale temperatur 353÷393 K. Prawdopodobnym wytłumaczeniem tego faktu może być duża zawartość siarki w karbonizatach z opon. W trakcie adsorpcji rtęć reaguje z siarką obecną w adsorbencie tworząc trwałe HgS.

Wykonane przez mnie badania adsorpcji par rtęci wykazały, że pomimo niewielkiej powierzchni właściwej karbonizatów z opon, możliwe jest z ich wykorzystaniem skuteczne usuwanie par rtęci w układzie z nieruchomym złożem karbonizatu i przepływającą przez nie fazą gazową. Czyni to tę metodę atrakcyjną, gdyż są to materiały odpadowe, co w dużym stopniu może decydować o cenie użytkowego produktu.

Poza testowaniem możliwości wykorzystania karbonizatów z opon samochodowych bezpośrednio jako adsorbentów, bądź pośrednio jako ich prekursorów, współuczestniczyłem także w testowaniu możliwości zastosowania karbonizatu z opon w procesie spiekania rud żelaza. W badaniach wykorzystałem karbonizat pochodzący z jednej z komercyjnych instalacji pirolizy zużytych opon wyposażonej w piec obrotowy, funkcjonującej na terenie kraju. Próby spiekania z udziałem karbonizatu z opon jako zamiennika części koksiku prowadzone były w laboratoryjnym stanowisku przeznaczonym do prób spiekania rud żelaza i ich koncentratów oraz innych materiałów (między innymi odpadów), w konwencjonalnej misie spiekalniczej. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdziłem, że karbonizat z opon można wprowadzać do procesu spiekania w ilości maksymalnie do 10%<sub>mas.</sub> jego udziału w masie paliwa, z utrzymaniem ścisłej kontroli zawartości cynku w tym paliwie.

ad c). Skutecznym rozwiązaniem problemu zagospodarowania odpadowego drewna impregnowanego olejem krezotowym może być opracowanie i wdrożenie technologii jego odzysku materiałowego (np. poprzez pirolizę) lub energetycznego (np. poprzez zgazowanie). Badania pirolizy zużytych podkładów kolejowych w skali laboratoryjnej prowadziłem z wykorzystaniem stanowiska badawczego wyposażonego w reaktor ze złożem stałym umieszczony w piecu ogrzewanym elektrycznie. Próbkę podkładów przeznaczoną do testów pirolizy rozdrabniałem do postaci zrębków, które poddawałem suszeniu w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 333 K przez 48 godzin. Piroliza prowadzona była w atmosferze azotu, przy zadanej końcowej temperaturze nagrzewania wynoszącej 773 K. W uzyskanym karbonizacie oznaczałem zawartość wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych poprzez poddanie go ekstrakcji toluenem. Wynosiła ona 80,95 mg/kg (ppm). Biorąc pod uwagę zawartość oleju impregnacyjnego w drewnie wynoszącą zazwyczaj od około 7-12%<sub>mas.</sub> widać, że resztkowa zawartość WWA w próbce skarbonizowanych podkładów kolejowych była wielokrotnie mniejsza. Mimo to była ona wciąż wysoka, co wskazuje iż impregnowane drewno należy karbonizować w wyższych temperaturach, celem wydestylowania i/lub destrukcji większej ilości składników oleju impregnacyjnego. Biorąc pod uwagę określone w analizach właściwości fizykochemiczne karbonizatu ze zużytych podkładów



kolejowych stwierdziłem, że praktycznie (poza zawartością WWA, możliwą do obniżenia poprzez podwyższenie temperatury pirolizy) spełnia on wymogi stawiane komercyjnym węglom drzewnym.

Badania pirolizy zużytych podkładów kolejowych prowadziłem także w skali przemysłowej w reaktorze obrotowym. Temperatura konwersji pirolitycznej w tym układzie wynosiła 823 K, a czas procesu - ok. 16 h. Badania przeprowadzone przeze mnie dla uzyskanego karbonizatu wykazały m.in., że zawierał on 1,23 mg WWA/kg. Tak niska zawartość WWA w karbonizacie wytworzonym w warunkach przemysłowych wskazywała, iż piroliza zużytych podkładów kolejowych musi być prowadzona w odpowiednio wysokiej temperaturze (co najmniej 823 K) i przez odpowiednio długi czas (co najmniej kilkanaście godzin).

Wykonane przeze mnie badania właściwości karbonizatów uzyskiwanych z odpadowego drewna impregnowanego olejem kreozotowym wykazały, że karbonizaty te mają bardzo interesujące właściwości, zbliżone do właściwości węgla drzewnego. Mogą być one stosowane jako jego zastępnik, np. w przemyśle chemicznym (wytwarzanie dwusiarczku węgla, cyjanku sodu, węgliku krzemu i węglików metali i in.), czy też metalurgicznym (wytapianie i spiekanie rud żelaza i metali nieżelaznych, w produkcji żelazokrzemu i czystego krzemu, przy hartowaniu stali, jako paliwo przy wytopie żeliwa, w produkcji elektrod, i in.). Wykorzystanie tych karbonizatów w celach kulinarnych, w produkcji pasz, czy też adsorbentów przeznaczonych do uzdatniania wody pitnej lub stosowanych w celach farmaceutycznych, nie powinno mieć miejsca, ze względu na fakt, iż odpadowe drewno impregnowane olejem kreozotowym, z którego są one wytwarzane, jest formalnie odpadem niebezpiecznym.

ad d). W celu minimalizowania ilości odpadów komunalnych kierowanych na składowiska poszukuje się wciąż nowych rozwiązań umożliwiających racjonalne zagospodarowanie przynajmniej części tych odpadów. Jednym z rozważanych od lat rozwiązań (incydentalnie wdrażanym w skali przemysłowej) jest również piroliza nieprzetworzonych wstępnie odpadów komunalnych. Zasadniczym problemem w realizacji takiego rozwiązania jest zagospodarowanie powstającego stałego odpadu poprocesowego (karbonizatu).

Badania pirolizy odpadów komunalnych (syntetycznej próby o składzie odpowiadającym przeciętnemu składowi morfologicznemu odpadów komunalnych) prowadziłem w wielkolaboratoryjnej instalacji badawczej, umożliwiającej wykonywanie szarżowej konwersji nawet kilkudziesięciokilogramowych prób paliw. Testy pirolizy przygotowanego do badań odpadu przeprowadziłem dla dwóch końcowych temperatur nagrzewania wsadu – 973 K oraz 1273 K. Pirolizie poddawałem każdorazowo próbki o masie 15 kg ubite (podobnie jak nabój węglowy

w ubijanym systemie koksowania) w wielkolaboratoryjnej retorcie stalowej o przekroju prostokątnym. W przypadku temperatury 973 K piroliza trwała około 2,5 godziny, natomiast w przypadku 1273 K – około 4 godziny. Na podstawie sporządzonych bilansów masowych stwierdziłem, że uzysk karbonizatu z próby poddanej pirolizie wynosił przy temperaturze 973 K 47,5%<sub>mas.</sub>, a przy temperaturze 1273 K – 43,4%<sub>mas.</sub>.

Obydwa wytworzone karbonizaty cechowały się znaczną niejednorodnością i bardzo wysokimi zawartościami frakcji mineralnej (oznaczanej jako zawartość popiołu) - >70%<sub>mas.</sub>. Wartość opałowa pierwszego z karbonizatów (8,6 kJ/g) świadczyła o tym, że mógłby on być spalany autotermicznie w dedykowanym do tego celu układzie. Wartość opałowa drugiego z karbonizatów była zdecydowanie niższa (2,9 kJ/g), a więc nie mógłby on być spalany bez udziału dodatkowego paliwa.

W badaniach pirolizy odpadów komunalnych stwierdziłem, że w przypadku zagospodarowania stałych produktów pirolitycznej konwersji takich materiałów w grę wchodzi praktycznie jedynie ich wykorzystanie energetyczne. Wytworzenie z tak niejednorodnych materiałów użytkowych produktów (np. adsorbentów, reduktorów, czy innych) jest być może technicznie wykonalne, ale ekonomicznie z pewnością nieuzasadnione.

ad e). Wykorzystanie zmieszanych odpadów komunalnych w charakterze paliwa (w dowolnym procesie termicznym) stwarza problemy technologiczne ze względu na heterogeniczny i zmienny charakter tego materiału. Przetworzenie odpadów komunalnych do tzw. paliwa z odpadów, pozwala częściowo rozwiązać te problemy, a paliwo takie może być z powodzeniem stosowane w kotłach różnego typu. Wśród paliw z odpadów zdecydowanie najbardziej homogeniczny pod względem składu chemicznego, formy i granulacji, jest tzw. SRF (solid recovered fuel), dlatego wydaje się on najbardziej predestynowany do procesów termicznego przekształcania nie tylko poprzez spalanie, ale także zgazowanie lub pirolizę.

Badania pirolizy skomponowanej mieszanki odpadowej symulującej SRF prowadziłem w instalacji wielkolaboratoryjnej wyposażonej w reaktor ze złożem stałym, ogrzewany w piecu elektrycznym. Skład próbki poddanej pirolizie był następujący: papier 52%<sub>mas.</sub>, tworzywa sztuczne 27,5%<sub>mas.</sub>, drewno, guma, skóra 11,6%<sub>mas.</sub>, resztki żywności 2,7%<sub>mas.</sub> oraz inert 6,2%<sub>mas.</sub>. Próbkę (około 500 g) rozdrabniałem do uziarnienia poniżej 50 mm i ubijałem w stalowej retorcie, którą umieszczałem w piecu z automatyczną regulacją temperatury. Piroliza prowadzona była w atmosferze azotu, z przyrostem temperatury wynoszącym 4 K/min. Końcowa temperatura procesu wynosiła 873 K, a proces prowadzony był do pełnego odgazowania próbki.

Uzyskany karbonizat charakteryzował się umiarkowanie wysoką zawartością popiołu ( $40\%_{\text{mas.}}$ ), jednak zdecydowanie niższą niż karbonizaty uzyskiwane w wyniku pirolizy zmieszanych odpadów komunalnych. Mimo to jego ewentualna dalsza przeróbka w kierunku wytwarzania bardziej szlachetnych pod względem jakości produktów stoi pod znakiem zapytania. Podobnie jak w przypadku karbonizatów uzyskanych w wyniku pirolizy zmieszanych odpadów komunalnych materiał ten nadaje się praktycznie jedynie do dalszego spalania w dedykowanych do tego celu urządzeniach.

Wyniki badań pirolizy zarówno prób zmieszanych odpadów komunalnych jak i wytwarzanych z nich paliw pozwoliły mi stwierdzić, że realizacja tego sposobu konwersji w stosunku do tak złożonych materiałowo substancji, mająca prowadzić w ostatecznym efekcie do pełnego spalania wszystkich produktów, wydaje się niekonkurencyjna w stosunku do ich bezpośredniego spalania.

ad f). Bardzo ważnym elementem racjonalnej gospodarki wycofanymi z eksploatacji pojazdami poddanymi mechanicznej przeróbce jest właściwe wykorzystanie lekkich frakcji ASR (ang. automotive shredder residue), zawierających przede wszystkim odpadowe tworzywa sztuczne (OTS). Celem moich badań była wstępna ocena możliwości wykorzystania procesu pirolizy, jako metody waloryzacji wieloskładnikowych odpadów ASR.

Badania pirolizy próbek ASR prowadziłem z wykorzystaniem instalacji eksperymentalnej wyposażonej w reaktor ze złożem stałym ogrzewany w piecu elektrycznym. Do badań pirolizy próbek ASR wykorzystałem odpady pochodzące z dwóch krajowych zakładów prowadzących recykling pojazdów samochodowych wycofanych z eksploatacji. Badane próbki poddałem rozdrobnieniu do rozmiaru ziaren poniżej 3 mm celem lepszego uśrednienia. Testom pirolizy w atmosferze azotu w dwóch procesowych wariantach eksperymentalnych poddawałem próbki odpadów ASR o masie 50 g. Temperatura końcowa pirolizy w pierwszym wariantcie eksperymentalnym wynosiła 973 K, natomiast w drugim – 1123 K.

Rezultaty przeprowadzonych przeze mnie badań wykazały bardzo duży uzysk produktu stałego ( $>75\%_{\text{mas.}}$ ), ze względu na bardzo wysoką zawartość frakcji nieorganicznej w odpadach poddawanych testom konwersji pirolitycznej. Wzrost temperatury pirolizy nie spowodował istotnej zmiany w uzysku frakcji stałej, co świadczy o tym, iż proces rozkładu termicznego frakcji organicznej badanych odpadów był praktycznie zakończony przy temperaturze około 973 K i jego prowadzenie w wyższych temperaturach konwersji nie jest uzasadnione. Oprócz popiołu głównym składnikiem wytworzonych karbonizatów był pierwiastkowy węgiel. Jednak w oparciu o przeprowadzone wyniki analiz stwierdziłem, że wszystkie cztery uzyskane w badaniach pirolizy ASR karbonizaty charakteryzowały się cechami

praktycznie wykluczającymi możliwość ich wykorzystania w charakterze paliw. Inne użytkowe wykorzystanie takich materiałów (np. w charakterze prekursorów adsorbentów, czy też reduktorów w procesach metalurgicznych) jest praktycznie również wykluczone.

ad g). Rynek wymiennicy jonowych rozwija się dynamicznie przede wszystkim dzięki stale rosnącemu zapotrzebowaniu na czystą wodę w różnych gałęziach przemysłu. W Polsce roczne zużycie wymiennicy jonowych oceniane jest na około  $3000\div 3500\text{ m}^3$ , co oznacza, że podobna ilość zużytych jonitów powinna być każdego roku poddana utylizacji. W ramach prac nad pirolizą różnych rodzajów odpadów współuczestniczyłem w wykonywaniu prób utylizacji zużytych jonitów poprzez poddanie ich kopirolizie z mieszanką węglową w przemysłowej baterii koksowniczej. Badaniom kopirolizy poddawane były próby zużytych jonitów stanowiących mieszankę kilku rodzajów jonitów wykorzystywanych najczęściej w procesach przemysłowych (głównie jonity Purolite i Amberlyst)

W jednej z krajowych koksowni przeprowadziłem wraz ze współpracownikami dwa warianty testów kopirolizy zużytych jonitów z węglem: tzw. „testy skrzynkowe” (skala 150 kg/test, 2 serie badań) oraz „testy komorowe” (skala 20 Mg/test, 1 seria badań). Podczas „testów skrzynkowych” udział zużytych jonitów w koksowanej mieszance węglowej wynosił  $1\%_{\text{mas.}}$  i  $3\%_{\text{mas.}}$ . Natomiast podczas „testu komorowego” udział odpadowych jonitów w koksowanej mieszance węglowej wynosił w poszczególnych komorach baterii koksowniczej odpowiednio  $2\%_{\text{mas.}}$  i  $5\%_{\text{mas.}}$ . Próbki wytworzonych koksów poddałem badaniom jakościowym, celem określenia wpływu zastosowanego dodatku odpadowego jonitu na właściwości produktu.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdziłem, że dodatek zużytych jonitów do wsadu wyraźnie poprawił parametry wytrzymałościowe koksu (parametr  $M_{80}$  oraz  $M_{40}$ ). Jednocześnie zaobserwowałem wzrost ścieralności koksu charakteryzowanej wskaźnikiem  $M_{10}$ . Ścieralność koksu zmieniała się znacząco wraz ze wzrostem ilości jonitów dodawanych do mieszanki węglowej. Zaobserwowany fakt jest nietypowy, gdyż zazwyczaj wzrostowi wskaźników wytrzymałościowych koksu towarzyszy obniżenie wskaźnika ścieralności.

Dodatek zużytych jonitów do mieszanki węglowej wpływał na reakcyjność koksu, nie stwierdziłem jednak w tym względzie jednoznacznego trendu. Przeprowadzone testy wykazały generalnie zmniejszanie się wartości tego parametru wraz ze wzrostem udziału jonitów w koksowanej mieszance.

Zwiększanie udziału zużytych jonitów w koksowanym wsadzie wpływało jednoznacznie negatywnie na zawartość siarki w produkowanym koksie. Wysoka zawartość siarki w koksie otrzymywanym przy  $5\%_{\text{mas.}}$  udziale jonitów w koksowanym

wsadzie wskazywała, że taki poziom dodatku tych odpadów jest nie do zaakceptowania z punktu widzenia jakości wytwarzanego produktu.

Przeprowadzone z moim udziałem przemysłowe badania kopiolizy zużytych jonitów z węglem potwierdziły techniczną możliwość realizacji odzysku tych odpadów w bateriach koksowniczych. Wyniki badań wykazały, że akceptowalny z punktu widzenia jakości wytwarzanego koksu poziom dodatku jonitów do mieszanki węglowej nie powinien przekraczać 3%<sub>mas.</sub> wsadu.

ad h). W składzie morfologicznym odpadów komunalnych blisko 4%<sub>mas.</sub> stanowią odpady tekstylne. Trafiają one w dużej mierze na wysypiska odpadów ze względu na wciąż niedoskonały system selektywnej zbiórki takich materiałów. W skład odpadów tekstylnych wchodzi głównie zużyta odzież, więc powstają one przede wszystkim w gospodarstwach domowych. Problem zagospodarowania odpadów tekstylnych jest wciąż nierozwiązany. W całym szerokim wachlarzu dostępnych środków ich przetwarzania znajduje się również piroliza. Moja działalność badawcza objęła również badania z zakresu pirolizy tego rodzaju materiałów.

Badaniom pirolizy poddawałem odpady tekstylne pochodzące z dużego przedsiębiorstwa prowadzącego recykling takich materiałów. Odpady były wstępnie rozdrobnione i nie wymagały dalszego mechanicznego przygotowania. Badania pirolizy odpadów tekstylnych prowadziłem w układzie eksperymentalnym wyposażonym w reaktor ze złożem stałym, ogrzewany w piecu elektrycznym. Próbkę materiałów tekstylnych o masie 700 g umieszczałem w retorcie stalowej, którą wprowadzałem do pieca. Finalna temperatura procesu pirolizy prowadzonej w atmosferze azotu wynosiła 873 K. Próbkę przetrzymywałem w końcowej temperaturze procesu przez jedną godzinę. W tych samych warunkach procesowych wykonałem dwa eksperymenty.

Karbonizat wytworzony z odpadów tekstylnych charakteryzował się niską zawartością frakcji mineralnej (popiołu) i bardzo niską zawartością części lotnych, co świadczy o praktycznie zupełnym odgazowaniu przetwarzanego odpadu. Jego właściwości (w tym wstępnie utworzona struktura porowata) pozwalały przypuszczać, że może on stać się potencjalnym prekursorem adsorbentów węglowych. Dla zweryfikowania tych przypuszczeń poddałem go zatem testom aktywacji fizycznej.

Badania aktywacji fizycznej karbonizatu z odpadów tekstylnych przeprowadziłem z wykorzystaniem instalacji eksperymentalnej wyposażonej w reaktor ze złożem stałym, ogrzewany w piecu elektrycznym. Aktywację 60 g karbonizatu przeprowadziłem w dwóch wariantach – z wykorzystaniem CO<sub>2</sub> oraz z wykorzystaniem pary wodnej jako czynnika aktywującego.

Proces aktywacji karbonizatu z odpadów tekstylnych, przeprowadzony zarówno z wykorzystaniem CO<sub>2</sub> jak i pary wodnej, pozwolił mi na otrzymanie adsorbentów

węglowych o dobrze rozwiniętej strukturze porowatej, na co wskazuje wielkość powierzchni właściwej tych materiałów (odpowiednio  $S_{\text{BET}}=487 \text{ m}^2/\text{g}$  i  $S_{\text{BET}}=974 \text{ m}^2/\text{g}$ ). Eksperymentalnie wykazałem, że wytwarzanie adsorbentów z odpadów tekstylnych jest technicznie możliwe. Ze względu na bardzo niską gęstość nasypową i wytrzymałość mechaniczną tych materiałów ich ewentualne zastosowanie w praktyce może sprowadzać się jedynie do aplikacji w formie pylistej.

Przedstawione powyżej syntetyczne informacje dotyczące wykonywanych przeze mnie badań pirolizy różnych rodzajów odpadów i oceny możliwości zagospodarowania stałych produktów pirolitycznej konwersji stanowią trzon mojej monografii habilitacyjnej. Obejmuje ona również inne kwestie związane z opisywanym procesem, będące jednak wyłącznie uzupełnieniem podstawowego zagadnienia.

Nowością prezentowanych przeze badań jest kompleksowe podejście do przedmiotowej tematyki poprzez objęcie zakresem eksperymentów szerokiego spektrum odpadów. Finalnym wynikiem moich prac w tym obszarze tematycznym jest zestawienie utylitarnych sposobów zagospodarowania karbonizatów wytwarzanych z różnych substancji odpadowych w procesie pirolizy. Wskazane kierunki możliwych zastosowań karbonizatów z różnych rodzajów odpadów są cennymi wytycznymi dla operatorów instalacji pirolizy odpadów, powstających coraz częściej na terenie naszego kraju. Badaniami swymi wykazałem, że piroliza niektórych rodzajów odpadów może pozwolić na wytwarzanie produktów o interesujących cechach użytkowych i wpisać się tym samym w ideę gospodarki o obiegu zamkniętym.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

Oprócz tematyki naukowo-badawczej przedstawionej w mojej monografii habilitacyjnej główne zagadnienia, którymi zajmowałem się podczas mojej działalności naukowo-badawczej, obejmowały także:

- a) preparację i aplikację adsorbentów węglowych,
- b) badania procesów zgazowania paliw stałych,
- c) wykorzystanie paliw alternatywnych w energetyce,
- d) badania konwersji gazów procesowych,
- e) wytwarzanie węglowych paliw niskoemisyjnych.

ad a). Moją działalność w obszarze preparacji i aplikacji adsorbentów węglowych rozpocząłem od udziału w projekcie EUREKA [Zał. 3, poz. II J/22], w ramach którego

proceeding the research on the production of cheap carbon adsorbents from brown coal using brown coal as precursors. I conducted large-scale laboratory experiments of single-stage carbonization and activation of brown coal from KWB „Adamów”, KWB „Sieniawa” and Cigel (Czechy). The conducted research showed that adsorbents produced from brown coal in a single-stage process of carbonization/activation can be counted among commercial adsorbents of average quality, with parameters typical for active cokes [Zał. 3, poz. II B/38, F/108]. Active cokes from brown coal „Sieniawa” were used, e.g., in tests of adsorptive cleaning of coke-oven effluents, and the results of the research showed the possibility of practical application of such adsorbents for this purpose [Zał. 3, poz. II F/109].

In the work on carbon adsorbents, I participated in the development of concepts, construction and industrial testing of an adsorber with a mobile bed of active coke. Using this reactor, I conducted research on the adsorptive cleaning of flue gas from the combustion of hazardous waste in one of the domestic furnaces, achieving very good results [Zał. 3, poz. II E2/63, F/104, F/106]. The used active coke was subjected to thermal regeneration in a large-scale laboratory installation with a stationary bed, in which the hot gas mixture was introduced directly to the thermally isolated bed of regenerated material [Zał. 3, poz. II E2/69, F/103]. I also analyzed the changes in the microstructure of active coke after regeneration, in relation to its primary structure [Zał. 3, poz. II E2/66]. The research showed a significant difference in the pore structure of active coke before and after regeneration. In the same installation, I also conducted research on the regeneration of two types of granular carbon adsorbents impregnated with biocides during the cleaning of industrial effluents. The research conducted by me showed that it is possible to restore the primary pore structure of active carbon used in the process of biocide removal from effluents [Zał. 3, poz. II E2/36]. The restoration of the primary microstructure of active carbon testified to the complete removal of adsorbed impurities during the cleaning of effluents.

The experience in the implementation of work related to the adsorptive cleaning of gases enabled me to participate in the work commissioned by Hyundai Steel Corporation. It consisted in the selection, based on the research of various active cokes, of the most suitable material for the cleaning of gases from a blast furnace of one of the steel mills of this group [Zał. 3, poz. II B/6, E2/12, F/43]. One of my last works in this area was the development of a technological concept for the production of a pyrolytic carbon adsorbent from brown coal.

usuwania rtęci ze spalin. Koncepcja ta została zweryfikowana badawczo w skali produkcyjnej wynoszącej 50 kg adsorbentu/h [Zał. 3, poz. II E2/2].

Kierowałem również projektem mającym na celu dokonanie oceny techniczno-ekonomicznej transformacji jednej z likwidowanych krajowych koksowni w nowoczesny zakład produkujący adsorbenty węglowe, dedykowane dla różnych zastosowań [Zał. 3, poz. II F/2, F/7]. Jedną z opcji technologicznych tego zakładu była produkcja pylistego adsorbentu na bazie pyłu koksowego z suchego chłodzenia koksu, dedykowanego do usuwania rtęci ze spalin w energetyce. Uczestniczyłem w pierwszych na świecie testach technologicznych usuwania rtęci ze spalin z wykorzystaniem partii takiego adsorbentu, prowadzonych w elektrowni opalanej węglem brunatnym (Niemcy) [Zał. 3, poz. II B/1]. Rezultaty badań były na tyle obiecujące, że będą one kontynuowane w krajowej energetyce.

Obok działań badawczych związanych z adsorpcyjnym oczyszczaniem fazy gazowej, współuczestniczyłem również w badaniach adsorpcji zanieczyszczeń z fazy ciekłej. Przykładem takich badań były prace dotyczące adsorpcyjnego oczyszczania ścieków z przemysłu farmaceutycznego metodą „cheap adsorptive cleaning” [Zał. 3, poz. II B/37]. Metoda ta polegała na wykorzystaniu w charakterze adsorbentu pyłu koksowego z suchego chłodzenia koksu oraz równoczesnego dodatku do zawiesiny w reaktorze z cyrkulującym złożem fluidalnym ściśle określonej ilości soli żelaza  $Fe^{3+}$ . Zastosowanie takiej metodyki pozwoliło na znaczące obniżenie wskaźnika ChZT oraz mętności ścieków w porównaniu do sekwencyjnego oczyszczania tych samych ścieków taką samą ilością pyłu koksowego, z następczą koagulacją za pomocą soli żelaza  $Fe^{3+}$ .

Badania adsorpcji z fazy ciekłej prowadziłem również w warunkach przemysłowych. Prace te dotyczyły zaprojektowania, wybudowania, uruchomienia i zoptymalizowania układu adsorpcyjnego oczyszczania ścieków zanieczyszczonych pestycydami [Zał. 3, poz. II F/92]. Zastosowanie adsorpcyjnego układu oczyszczania ścieków zanieczyszczonych pestycydami w zakładzie, w którym uruchomiono instalację, pozwoliło uzyskać bardzo dobre wyniki usunięcia niebezpiecznych zanieczyszczeń z fazy ciekłej.

Uczestniczyłem również w badaniach z wykorzystaniem adsorbentów impregnowanych. Ich przykładem mogą być prace, w których opracowałem metodykę impregnacji koksu aktywnego węglanem potasu. Wytworzone próbki adsorbentów zostały użyte do przeprowadzenia badań sorpcji-desorpcji  $CO_2$ . W trakcie badań sorpcji  $CO_2$  uzyskiwałem stopień przereagowania  $K_2CO_3$  wynoszący 90%. Niestety w trakcie badań stwierdziłem, że pojemności sorpcyjna badanych adsorbentów zmniejsza się w każdym kolejnym cyklu sorpcji-desorpcji [Zał. 3, poz. II E2/18, E2/20, F/37].



ad b). Badania procesu zgazowania paliw stanowią jeden z głównych obszarów moich zainteresowań i działalności (w zakres ten wchodzi również opisane wcześniej kwestie związane z aktywacją fizyczną prekursorów adsorbentów węglowych, będącą formalnie zgazowaniem o małej intensywności). Pierwsze prace z zakresu badania procesu zgazowania obejmowały mój współdziałanie w zakończonych sukcesem pracach mających na celu optymalizację działania komercyjnego reaktora zgazowania biomasy ze złożem stałym [Załącznik 3, poz. II F/93]. Reaktor ten wytwarzał gaz palny wykorzystywany do produkcji ciepła użytkowego. W reaktorze tego samego typu prowadziłem również badania zgazowania frakcji odpadowej z przesiewania kompostu [Załącznik 3, poz. II E2/15]. W wyniku wysokosprawnego zgazowania badanych odpadów otrzymywany był niskokaloryczny gaz, który można było spalać w kotle odzysknicowym, bez konieczności doprowadzania dodatkowego paliwa gazowego. Kolejna, bardzo podobna praca w której brałem udział, obejmowała wykonanie pomiarów on-line stężeń głównych składników gazu procesowego ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) pochodzącego ze zgazowania odpadów z przemysłu meblarskiego, a także składu spalin (wraz z zanieczyszczeniami) wytwarzanych ze spalania tego gazu [Załącznik 3, poz. II F/17].

Niezwykle ważną kwestią w przebiegu procesu zgazowania paliw stałych jest reaktywność paliwa poddawanego konwersji. Uczestniczyłem w opracowaniu nowej metodyki prowadzenia badań reaktywności węgla względem  $\text{CO}_2$  pod zwiększonym ciśnieniem (5 MPa). Opracowałem koncepcję stanowiska badawczego i współuczestniczyłem w przygotowaniu jego projektu technicznego, skonstruowaniu i uruchomieniu tego układu, a także prowadzeniu badań w tej instalacji z wykorzystaniem różnych materiałów węglowych [Załącznik 3, poz. II B/9, F/54].

Kierowałem międzynarodowym projektem, którego celem było zoptymalizowanie parametrów procesowych zgazowania biomasy i odpadów oraz opracowanie skutecznych sposobów oczyszczania gazu poprocesowego dla jego energetycznego wykorzystania w silnikach gazowych oraz ogniwach paliwowych [Załącznik 3, poz. II F/51]. Prace badawcze obejmowały liczne eksperymenty zgazowania mieszanek paliwowych w reaktorze z cyrkulującym złożem fluidalnym. Uzupełnione były one modelowaniem matematycznym badanego procesu.

W latach 2010-14 byłem członkiem zespołu realizującego duży projekt inwestycyjny polegający na budowie kompleksu instalacji technologicznych dedykowanych różnorodnym badaniom bezpiecznej środowiskowo konwersji paliw stałych (przede wszystkim węgla) [Załącznik 3, poz. II B/8, F/32]. W ramach tego przedsięwzięcia brałem udział w opracowaniu koncepcji technologicznej, projektowaniu, budowie i rozruchach trzech instalacji zgazowania paliw stałych, wyposażonych odpowiednio w reaktor ze złożem stałym, atmosferyczny reaktor z cyrkulującym złożem fluidalnym oraz ciśnieniowy reaktor z cyrkulującym złożem

fluidalnym. Inwestycja ta zakończyła się pełnym sukcesem, a uruchomione instalacje służą do tej pory prowadzeniu licznych prac badawczo-rozwojowych (w tym międzynarodowych) w obszarze zgazowania paliw stałych.

W ramach Zadania Badawczego nr 4 strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt. „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii” uczestniczyłem w opracowaniu koncepcji technologicznej, opracowaniu projektu technicznego, projektowaniu, budowie i uruchamianiu instalacji zgazowania biomasy o mocy 1,5 MW<sub>th</sub>. Instalacja ta wyposażona jest w innowacyjny reaktor zgazowania z umieszczoną w jego osi rurą odprowadzającą surowy gaz, bezpośrednio ze strefy zgazowania. Instalacja umożliwia produkcję ciepła i energii elektrycznej (350 kW<sub>el</sub>) [Zał. 3, poz. II B/4, E2/11, F/14, F/31].

Celem jednego z projektów, którego byłem uczestnikiem, było opracowanie nowoczesnej, rynkowo konkurencyjnej i bezpiecznej dla środowiska technologii zgazowania impregnowanych odpadów drzewnych dla produkcji gazu do napędu silników gazowych w układach CHP [Zał. 3, poz. II F/27]. W ramach tego projektu brałem udział w prowadzeniu testów zgazowania odpadowego drewna impregnowanego olejem kreoizotowym w instalacji pilotowej o mocy 60 kW<sub>th</sub>. Ponadto współuczestniczyłem w badaniach skuteczności usuwania zanieczyszczeń pyłowych i organicznych z surowego gazu prowadzonych z wykorzystaniem suchego oraz mokrego układu oczyszczania. Oczyszczony gaz procesowy był spalany w dwupaliwowym silniku tłokowym w celu produkcji w kogeneracji energii elektrycznej oraz ciepła. Podobne badania z wykorzystaniem tej samej instalacji prowadzone były z moim udziałem dla oceny możliwości wykorzystania SRF (solid recovered fuel) w charakterze paliwa zasilającego reaktor zgazowania. Również w tym przypadku osiągnięty został wysoki stopień sprawności procesu, a oczyszczony gaz mógł być spalany w silniku gazowym [Zał. 3, poz. II F/26].

Kolejny projekt w którym uczestniczyłem koncentrował się na opracowaniu uniwersalnej, innowacyjnej technologii zgazowania komunalnych osadów ściekowych wraz z innymi odpadami, umożliwiającej wytwarzanie w kogeneracji energii elektrycznej oraz ciepła. Główny cel tego projektu został osiągnięty, a opracowane rozwiązanie techniczne pozwala na produkcję 0,4 kWh energii elektrycznej z 1 kg s.m. osadów ściekowych [Zał. 3, poz. II F/16].

ad c.) Działania z zakresu energetycznego wykorzystania paliw z odpadów realizowane z moim udziałem obejmowały zarówno prace teoretyczne jak i eksperymentalne. Wśród tych pierwszych można wymienić np. prace mające na celu usystematyzowanie dotychczasowej wiedzy z obszaru prawa i rozwiązań technologicznych dotyczącej wykorzystania odpadów w charakterze paliw oraz opracowanie propozycji kryteriów jakościowych i wytycznych technologicznych dla

produkcji bezpiecznych środowiskowo paliw alternatywnych [Zał. 3, poz. II F/76, F/86, F/88]. Wśród kluczowych teoretycznych prac eksperckich wykonywanych przeze mnie wraz ze współpracownikami mogę wymienić pracę studialną dotyczącą energetycznego wykorzystania wybranych grup odpadów palnych w planowanej do wybudowania instalacji termicznego przekształcania odpadów na terenie jednej z krajowych koksowni [Zał. 3, poz. II F/23] oraz studium potencjału dwóch dużych spółek w obszarze podaży i możliwości zagospodarowania frakcji energetycznej odpadów komunalnych i przemysłowych wraz z wypracowaniem wariantowych koncepcji rozwiązań, określeniem lokalizacji instalacji spalania i analizami opłacalności inwestycji [Zał. 3, poz. II F/9]. Kierowałem również pracą mającą na celu opracowanie koncepcji techniczno-technologicznej współspalania mączki zwierzęcej z węglem w kotłach pyłowych BP-1150 w dużej elektrowni na południu Polski [Zał. 3, poz. II F/9].

Podobna do wspomnianej wyżej i wykonywana pod moim kierownictwem praca polegała na opracowaniu koncepcji programu pilotażowego współspalania osadów ściekowych w grupie elektrociepłowni na wybrzeżu. Po opracowaniu tego programu zostały zrealizowane pierwsze w Polsce testy współspalania wysuszonych osadów ściekowych z węglem w kotle pyłowym OP-230 [Zał. 3, poz. II B/11, F/80]. Poprzedzone były one wykonaniem testów suszenia osadów ściekowych i wyprodukowaniem ok. 30 Mg wysuszonych osadów ściekowych w mobilnej instalacji z hybrydowym reaktorem fluidalnym [Zał. 3, poz. II F/77]. Podczas testów współspalania osadów ściekowych uzyskane zostały korzystne wyniki pomiarów wielkości emisji oraz dobre rezultaty w zakresie zawartości części palnych w żużlach i popiołach. Problem stwarzało dotrzymanie warunku co najmniej dwusekundowego czasu przebywania spalin w strefie temperatur powyżej 850°C, po ostatecznym doprowadzeniu powietrza [Zał. 3, poz. II E2/48-E2/51].

Ważną kwestią determinującą zainteresowanie krajowej energetyki wprowadzeniem do użytkowania paliw z odpadów była (i nadal jest) kwestia zawartości frakcji biodegradowalnej w potencjalnych paliwach mogących znaleźć zastosowanie w procesach współspalania z węglem. Kwestia ta jest wciąż kluczowa dla bilansowania energii odnawialnej wytwarzanej z wykorzystaniem paliw z odpadów [Zał. 3, poz. II E2/45]. Współuczestniczyłem w pracach badawczych mających na celu opracowanie metodyki określania zawartości frakcji biodegradowalnej w paliwach z odpadów, w oparciu o metodykę selektywnego rozpuszczania przyjętą za standard przez Europejski Komitet Normalizacyjny [Zał. 3, poz. II E2/37, E2/43, E2/47]. Według opracowanej procedury w laboratorium analitycznym mojej jednostki macierzystej wykonane zostało dotychczas ponad sto oznaczeń zawartości frakcji biodegradowalnej w różnych próbkach paliw z odpadów.

Jednym z ostatnich projektów z omawianego obszaru tematycznego (kierowałem pracami realizowanymi w mojej macierzystej jednostce) był projekt mający na celu opracowanie innowacyjnej technologii wytwarzania paliwa alternatywnego z odpadów komunalnych przeznaczonego dla elektrowni i elektrociepłowni [Zał. 3, poz. II F/15]. Paliwo wytwarzane według opracowanej technologii miało formę peletów i charakteryzowało się łatwością transportu i magazynowania oraz bardzo małym pyleniem. Jego gęstość, jak również podstawowe parametry energetyczne takie jak wartość opałowa i zawartość popiołu, były zbliżone do klasycznego paliwa węglowego. Proces współspalania tego paliwa z węglem kamiennym w kotle WR-25 przy udziale odpadu w mieszance na poziomie 10%<sub>mas.</sub> przebiegał stabilnie, bez utrudnień technologicznych w dozowaniu mieszanki oraz odbiorze ubocznych produktów współspalania.

ad d.) Ściśle powiązaniem z innymi obszarami moich zainteresowań zawodowych (przede wszystkim zgazowaniem i koksownictwem) jest zagadnienie oczyszczania i konwersji gazów procesowych. Kierowałem pracami wykonywanymi w mojej jednostce w ramach projektu badawczego zamawianego, a celem tych prac było określenie możliwości pozyskiwania oraz maksymalizacja wydajności produkcji wodoru z gazu koksowniczego. W ramach tych działań współuczestniczyłem w zaprojektowaniu, wybudowaniu i uruchomieniu prototypowej, kontenerowej instalacji termicznej konwersji surowego gazu koksowniczego w innowacyjnym reaktorze z inertną membraną ceramiczną. Instalacja ta została podłączona do rurociągu surowego gazu koksowniczego w jednej z krajowych koksowni i posłużyła wykonaniu serii eksperymentów konwersji zanieczyszczeń smołowych w gazie, celem jego przygotowania do membranowej separacji wodoru. Dodatkowo opracowany został numeryczny model konwersji węglowodorów w nowym reaktorze, a zgodność uzyskiwanych wyników modelowania z wynikami eksperymentów przemysłowych była zadowalająca [Zał. 3, poz. II F/62].

Wspomniane wyżej badania poprzedzone były zaprojektowaniem, wybudowaniem i uruchomieniem instalacji laboratoryjnej wyposażonej w reaktor z inertną membraną ceramiczną. Instalacja ta posłużyła wstępnym badaniom konwersji syntetycznie przygotowanych mieszanek gazowych symulujących rzeczywisty gaz koksowniczy. W badaniach tych potwierdziłem możliwość sterowania procesem konwersji węglowodorów poprzez zmiany ilości tlenu podawanego przez ceramiczną membranę do strumienia konwertowanego gazu [Zał. 3, poz. II F/53]. Uzyskane wyniki były wytycznymi dla prowadzenia wspomnianych wyżej eksperymentów przemysłowych. W tej samej instalacji prowadziłem badania konwersji termicznej i katalitycznej węglowodorów zawartych w gazie o składzie zbliżonym do gazu ze zgazowania słomy rzepakowej. Opracowany model

matematyczny konwersji takiego gazu wskazywał na silne przereagowanie wodoru i metanu, co tylko częściowo potwierdzały dane z badań eksperymentalnych. Lepszą zgodność wyników modelowania z wynikami eksperymentów w układzie testowym uzyskałem w przypadku termicznej konwersji benzenu, wykorzystanego jako związek wzorcowy [Zał. 3, poz. II E2/24].

Współuczestniczyłem również w badaniach, których celem była ocena skuteczności wykorzystania reaktora plazmowego do usuwania zanieczyszczeń smołowych z gazu wytwarzanego w procesie zgazowania biomasy. Do badań procesu oczyszczania gazu został wykorzystany reaktor typu GlidArc (aparatus wykorzystujący technikę tzw. pełzającej plazmy niskotemperaturowej) [Zał. 3, poz. II F/34]. Gaz poddawany oczyszczaniu generowany był w instalacji do zgazowania biomasy ze złożem stałym. Podczas badań mierzona była zawartość substancji smolistych w gazie za reaktorem zgazowującym oraz w gazie za reaktorem plazmowym dla określenia skuteczności ich konwersji. Przeprowadzone z moim udziałem eksperymenty usuwania substancji smolistych z gazu procesowego za pomocą reaktora plazmowego wykazały znaczącą redukcję zawartości związków organicznych w gazie (65–85%). Skuteczność konwersji malała wraz ze wzrostem ilości doprowadzanego tlenu, przy równoczesnym spadku temperatury katalizatora niklowego [Zał. 3, poz. II F/33, E2/25].

ad e). Ważną tematyką moich działań badawczo-rozwojowych są również węglowe paliwa niskoemisyjne. Z ramienia jednostki w której jestem zatrudniony, kierowałem pracami badawczymi dotyczącymi innowacyjnego, niskoemisyjnego paliwa bezdymnego (błękitnego węgla). W pierwszej fazie projektu optymalizowane były parametry fizykochemiczne paliwa niskoemisyjnego, a następnie określone zostały efekty ekologiczne zastąpienia węgla kamiennego nowoopracowanym innowacyjnym paliwem. Testy te przeprowadzane były w przy wykorzystaniu urządzeń grzewczych powszechnie stosowanych w sektorze ogrzewnictwa indywidualnego w Polsce (badania wielkolaboratoryjne). W drugiej fazie projektu realizowane były prace spalania niskoemisyjnego paliwa (błękitnego węgla) u użytkowników indywidualnych w Zabrzu (sezon grzewczy 2014/15). Użytkownikom dostarczono 12 Mg paliwa niskoemisyjnego, a w ramach prac badawczych kontrolowany był poziom redukcji emisji z indywidualnych kotłów c.o., pieców kaflowych i piecokuchni. W trzeciej fazie projektu wytworzone w instalacji produkcyjnej 2000 Mg ton błękitnego węgla rozdysponowano w sezonie grzewczym 2015/16 wśród około 1800 gospodarstw domowych w miejscowościach: Roszków (woj. śląskie), Jedlina-Zdrój (woj. dolnośląskie), Zabrze (osiedle Zandka), Kraków (dzielnica Swoszowice) oraz Żywiec (dzielnice Sporysz i Oczków). Uzyskany podczas testów spalania paliwa niskoemisyjnego sumaryczny efekt ekologiczny w tych miejscowościach, polegający

na obniżeniu emisji zanieczyszczeń do atmosfery (po zastąpieniu 2 tys. Mg węgla kamiennego tym samym wolumenem błękitnego węgla), był następujący: obniżenie emisji pyłu o około 50 Mg, obniżenie emisji zanieczyszczeń organicznych (TOC) o około 20 Mg, obniżenie emisji wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) o około 0,3 Mg, w tym benzo(a)pirenu o około 0,02 Mg [Zał. 3, poz. II B/2, E2/1, E2/3, F/11].

Aktualnie kieruję projektem mającym na celu opracowanie technologii wytwarzania ekologicznych, niskoemisyjnych pelletów na bazie drobnoziarnistych sortymentów węglowych przeznaczonych dla ogrzewnictwa indywidualnego. Zgodnie z obowiązującymi i przewidywanymi regulacjami prawnymi muły i flotokoncentraty węglowe są lub będą wykluczone z rynku paliw w postaci nieprzetworzonej. Projektowane paliwo będzie paliwem kompozytowym, składającym się z komponentów węglowych i biomasowych oraz stosownego lepiszcza. Na bieżącym etapie w oparciu o przeprowadzone rozeznanie rynkowe oraz analizy właściwości wytypowanych do badań węgla, biomasy, lepiszczy i spoiw, określony został zestaw surowców do dalszych badań technologicznych [Zał. 3, poz. II F/1].

Mój dorobek naukowy obejmuje 260 prac, w tym 41 opracowanych przed uzyskaniem stopnia doktora [Zał. 3, poz. E1/36-E1/38, E2/58-72, F/90-F110, M/21, M/22] oraz 219 po uzyskaniu stopnia doktora [Zał. 3, poz. II A/1-A/18, E1/1-E1/35, E2/1-E2/57, F/1-F/89, M/1-M20]. Brałem udział w 8 projektach badawczo-naukowych finansowanych w ramach programów międzynarodowych, z czego w 5 po uzyskaniu stopnia doktora. W większości z tych projektów brałem udział jako wykonawca [Zał. 3, poz. II J/1, J/6, J/8, J/16, J/18, J/19, J/22], a w jednym z nich byłem kierownikiem [Zał. 3, poz. III F/2]. Współuczestniczyłem również w realizacji 17 projektów badawczo-naukowych (w charakterze wykonawcy, kierownika części prac realizowanych przez moją macierzystą jednostkę lub kierownika), finansowanych w ramach programów krajowych – 4 przed uzyskaniem stopnia doktora [Zał. 3, poz. II J/17, J/20, J/21, J/23] i 13 po uzyskaniu tego stopnia [Zał. 3, poz. II J/2-J/5, J/7, J/9-J/15, Zał. 3, poz. III F/1]. Brałem również udział w charakterze wykonawcy lub kierownika projektu w wielu projektach finansowanych ze środków statutowych zatrudniającego mnie Instytutu – 7 przed uzyskaniem stopnia doktora [Zał. 3, poz. II F/97, F/100, F/101, F/103, F/104, F/106, F/107] i 16 po uzyskaniu tego stopnia [Zał. 3, poz. II F/36-F/40, F/44, F/52-F/56, F/71, F/72, F/87-F/89]. Byłem także wykonawcą i współwykonawcą kilkudziesięciu ekspertyz i opracowań o charakterze eksperckim – 2 przed uzyskaniem stopnia doktora [Zał. 3, poz. III M/21, M/22] oraz 20 po jego uzyskaniu [Zał. 3, poz. III M/1-M/20]. Wykonałem ponadto 7 recenzji wniosków projektowych w międzynarodowych programach naukowych [Zał. 3, poz. III O/2, O/3]

oraz 42 recenzje wniosków projektowych w programach krajowych [Zał. 3, poz. III O/1, O/4].

Liczbowe podsumowanie moich głównych, wymienionych powyżej osiągnięć naukowo-badawczych, prezentuje poniższa tabela.

**Tabela. Podsumowanie głównych osiągnięć naukowo-badawczych.**

Lp.	Prace	Liczba prac		
		przed doktoratem	po doktoracie	razem
1	Publikacje naukowe w czasopiśmie znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JRC)	0	18	18
2	Monografie i rozdziały w monografiach	3	35	38
3	Publikacje naukowe w czasopiśmie innych niż znajdujące się w bazie Journal Citation Reports (JCR)	15	57	72
4	Dokumentacja prac badawczych i ekspertyz	23	109	132
Ogółem		41	219	260
5	Udział w projektach badawczo-naukowych finansowanych w ramach programów międzynarodowych	3	5	8
6	Udział w projektach badawczo-naukowych finansowanych w ramach programów krajowych	4	14	18
7	Udział w projektach badawczo-naukowych finansowanych ze środków statutowych	7	16	23
8	Recenzje projektów badawczych w programach międzynarodowych	0	7	7
9	Recenzje projektów badawczych w programach krajowych	0	42	42
Ogółem		14	84	98

Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports (JCR): **19,51**

Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS): **117**

**(115 bez autocytowań)**

Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS): **5**

Brałem aktywny udział w wielu międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowo-badawczych, wygłaszając 7 referatów przed uzyskaniem stopnia doktora [Zał. 3, poz. II L/48-L/54] i 47 po jego uzyskaniu [Zał. 3, poz. II L/1-L/47]. Uczestniczyłem także w 9 konferencjach, na których prezentowałem wyniki badań własnych i moich współpracowników w formie posteru [Zał. 3, poz. III B/1-B/9]. Byłem także współorganizatorem 7 seminariów i konferencji [Zał. 3, poz. III C/2-C/5, C/7, C/9, C/10], a także członkiem komitetu naukowego i organizacyjnego 2 [Zał. 3, poz. III C/6, C/8] i członkiem rady naukowo-programowej 1 konferencji [Zał. 3, poz. III C/1].

Jestem członkiem komitetu naukowego czasopisma Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska, Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Przemysłu Hutniczego (SITPH) oraz Komitetu Technicznego 216 ds. Odpadów Polskiego Komitetu Normalizacyjnego. Uczestniczę także w charakterze członka w pracach zespołu ds. Krajowych Inteligentnych Specjalizacji - KIS 4; Wysokosprawne, niskoemisyjne i zintegrowane układy wytwarzania, magazynowania, przesyłu i dystrybucji energii, Technicznej Grupy Roboczej ds. rewizji BREF z zakresu spalania odpadów oraz grupy ekspertów Instytutu Ochrony Środowiska – PIB ds. Weryfikacji Technologii Środowiskowych (ETV).

Wykonałem 6 recenzji publikacji zagranicznych oraz 42 recenzje publikacji krajowych.

Zostałem odznaczony Brązowym Krzyżem Zasługi, Brązowym Medalem za Długoletnią Służbę oraz Odznaką honorową za „Zasługi dla Wynalazczości”.