

Wrocław, 16.11.2015 r.

dr inż. Wojciech Moroń
Katedra Technologii Energetycznych,
Turbin i Modelowania Procesów Ciepłno-Przepływowych
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Politechnika Wrocławska

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

1. Imię i nazwisko:
Wojciech Moroń

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

Dyplom ukończenia studiów wyższych magisterskich. Tytuł: magister inżynier. Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, kierunek: Mechanika i budowa maszyn, specjalność: Termoenergetyka, 2001.

Stopień naukowy doktora nauk technicznych w zakresie mechaniki, specjalność: spalanie i paliwa, nadany uchwałą Rady Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej z dnia 30 września 2005 roku; tytuł rozprawy doktorskiej: *Charakterystyki spalania mieszanin węglowych*.

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

- Od 11 lutego 2005 roku do 31 stycznia 2006 roku: specjalista w Zakładzie Paliw i Energii Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej.
- Od 1 lutego 2006 roku – do 30 września 2008 roku: asystent naukowo-dydaktyczny w Zakładzie Inżynierii i Technologii Energetycznych Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej.
- Od 1 października 2008 – do obecnie: adiunkt w Katedrze Technologii Energetycznych, Turbin i Modelowania Procesów Ciepłno-Przepływowych, Wydział Mechaniczno-Energetyczny Politechniki Wrocławskiej.

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. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego:

cykl publikacji powiązanych tematycznie: **Spalanie paliw stałych w atmosferze wzbogaconej w tlen.**

b) publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

- H1. **Moroń Wojciech, Rybak Wiesław:** Ignition behavior and flame stability of different ranks coals in oxy fuel atmosphere. Fuel. 2015, vol. 161, s. 174–181. doi:10.1016/j.fuel.2015.08.065. (LF, punktacja MNiSW: **40**, IF: **3,52**)
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu i wykonaniu badań oraz interpretacji większej części uzyskanych wyników badań. Mój udział procentowy szacuję na 95%.
- H2. **Moroń Wojciech, Rybak Wiesław:** NO_x and SO₂ emissions of coals, biomass and their blends under different oxy-fuel atmospheres. Atmospheric Environment. 2015, vol. 116, s. 65-71. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.06.013. (LF, punktacja MNiSW: **35**, IF: **3,281**)
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu i wykonaniu badań oraz interpretacji większej części uzyskanych wyników badań. Mój udział procentowy szacuję na 95%.
- H3. **Moroń Wojciech:** Co-combustion coal and biomass in oxy-fuel atmosphere, Renewable Energy Sources 2014 : [Proceedings of the 5th International Scientific conference OZE 2014, Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014 / ed. Július Cirák, Milan Perný, Miroslava Smítková]. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2014. s. 37-41.
- H4. **Moroń Wojciech, Czajka Krzysztof, Ferens Wiesław, Babul Konrad, Szydelko Arkadiusz, Rybak Wiesław:** NO_x and SO₂ emission during oxy-coal combustion. Chemical and Process Engineering. 2013, vol. 34, nr 3, s. 337-346. (LF, punktacja MNiSW: **15**, IF: **0,653**)
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu i wykonaniu większości badań oraz interpretacji części uzyskanych wyników badań. Mój udział procentowy szacuję na 70%.
- H5. **Czajka Krzysztof, Moroń Wojciech, Ferens Wiesław, Razum Krzysztof, Rybak Wiesław:** Differences in reactivity and burnout of coal and lignite in oxy-fuel atmosphere. Archivum Combustionis. 2013, vol. 33, nr 1, s. 57-65. (Punktacja MNiSW z 2013: **7**)
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu i wykonaniu większości badań oraz interpretacji części uzyskanych wyników badań. Mój udział procentowy szacuję na 65%.
- H6. **Nowak-Woźny Dorota, Moroń Wojciech, Urbanek Bartosz, Rybak Wiesław:** Mineral matter transformation in oxy-fuel coal combustion. Chemical and Process Engineering. 2013, vol. 34, nr 3, s. 393-401. (LF, punktacja MNiSW: **15**, IF: **0,653**)
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu części badań oraz interpretacji części uzyskanych wyników badań. Mój udział procentowy szacuję na 20%.
- H7. **Moroń Wojciech, Babul Konrad, Czajka Krzysztof, Rybak Wiesław:** Ignition of coal particle suspension in oxy-fuel (O₂/CO₂) atmosphere. Archivum Combustionis. 2010, vol. 30, nr 3, s. 155-166. (Punktacja MNiSW z 2010: **6**)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu i wykonaniu większości badań oraz interpretacji części uzyskanych wyników badań. Mój udział procentowy szacuję na 80%

- H8. **Rybak Wiesław, Czajka Krzysztof, Moroń Wojciech, Szydelko Arkadiusz:** Wpływ typu węgla na przebieg procesu spalania w atmosferze O₂/CO₂. W: Spalanie tlenowe dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO₂: Kinetyka i mechanizm spalania tlenowego oraz wychwytu CO₂ / pod red. Wojciecha Nowaka, Wiesława Rybaka i Tomasza Czakierta. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2013. s. 85-115
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu i wykonaniu większości badań oraz interpretacji większości uzyskanych wyników badań, pracach redakcyjnych.. Mój udział procentowy szacuję na 60%.
- H9. **Rybak Wiesław, Nowak-Woźny Dorota, Moroń Wojciech, Urbanek Bartosz, Hrycaj Grzegorz:** Transformacja substancji mineralnej w warunkach spalania tlenowego. W: Spalanie tlenowe dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO₂: Kinetyka i mechanizm spalania tlenowego oraz wychwytu CO₂/ pod red. Wojciecha Nowaka, Wiesława Rybaka i Tomasza Czakierta. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2013. s. 176-194
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu i wykonaniu większości badań oraz interpretacji większości uzyskanych wyników badań, pracach redakcyjnych.. Mój udział procentowy szacuję na 55%.
- H10. **Rybak Wiesław, Moroń Wojciech, Nowak-Woźny Dorota, Babul Konrad, Czajka Krzysztof, Hrycaj Grzegorz, Razum Krzysztof:** Kinetyka i mechanizm spalania tlenowego węgla. W: Spalanie tlenowe dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO₂ / pod red. Wojciecha Nowaka i Tomasza Czakierta. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2012. s. 42-78
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zebraniu większości aktualnego stanu wiedzy badań, interpretacji zebranych badań oraz pracach redakcyjnych. Mój udział procentowy szacuję na 60%.

Łączna ilość punktów (z podziałem na autorów) MNiSW dla cyklu publikacji: 106,35

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

Rosnące światowe zużycie energii i nośników energii oraz zmiany klimatyczne, za które odpowiedzialna jest m.in. energetyka konwencjonalna, wywołują zwiększoną aktywność badawczą w zakresie poszukiwania nowych, bardziej ekologicznych źródeł energii, jak również alternatywnych technologii wykorzystania paliw kopalnych, a w szczególności węgla. Węgiel nadal jest głównym światowym nośnikiem energii, jego zasoby są szacowane na około 100-200 lat eksploatacji. Jest również jednym z najbardziej równomiernie rozłożonych zasobów, co powoduje, że wiele państw upatruje w nim główne źródło energii. Działania związane z ograniczeniem oddziaływania energetyki konwencjonalnej na środowisko naturalne ukierunkowane są na ograniczenie emisji zanieczyszczeń gazowych, ograniczenie emisji zanieczyszczeń stałych, jak również obniżenie emisji gazów cieplarnianych, a w szczególności CO₂.

Zgodnie z aktualnym stanem wiedzy to właśnie emisja CO₂ jest głównym źródłem globalnego ocieplenia klimatu. Działając na rzecz ochrony środowiska i przeciwdziałania zmianom klimatu Unia Europejska w Strategii *Europa 2020* kreuje zrównoważony wzrost gospodarczy i konstruuje pakiet trzech celów w zakresie zmian klimatu i zrównoważonego wykorzystania energii. Unia zakłada w perspektywie roku 2020 ograniczenie emisji gazów cieplarnianych o 20 % w stosunku do poziomu z 1990 roku, zwiększenie do 20 % udziału energii ze źródeł odnawialnych w ogólnym zużyciu energii oraz dążenie do zwiększenia efektywności wykorzystania energii o 20%. Ograniczenie emisji CO₂ dotyczy m.in. sektora energetycznego, będącego znaczącym emitentem zanieczyszczeń gazowych. Działania ograniczające emisję CO₂ związane są z trzema głównymi kierunkami:

1. wzrostem sprawności po stronie produkcji i konsumpcji energii elektrycznej,
2. wykorzystywaniem odnawialnych źródeł energii, paliw o mniejszej emisji CO₂ i alternatywnych sposobów konwersji paliw konwencjonalnych,
3. wychwytywaniem i magazynowaniem CO₂ z elektrowni węglowych (CCS, ang. *Carbon Capture and Storage*).

W świetle Dyrektywy EU ETS o handlu uprawnieniami do emisji CO₂ już w roku 2020 zakładom energetycznym nie będą przysługiwały żadne pakiety uprawnień darmowych, co wiąże się z tym, że na każdy kilogram wyemitowanego CO₂ będzie należało wykupić uprawnienia do emisji. Obowiązkiem tym mają być objęte wszystkie instalacje powyżej 35MW. Zgodnie z kolejnym dokumentem – dyrektywą CCS o wychwytywaniu i składowaniu dwutlenku węgla, technologie zeroemisyjne stają się priorytetem polityki energetycznej Unii Europejskiej.

Polityka Unii Europejskiej ma kluczowy wpływ na polską politykę energetyczną. Świadczą o tym cele i zadania określone w strategii *Polityka energetyczna Polski do 2030 roku* oraz projekcie nowej strategii *Polityka energetyczna Polski do 2050 roku*, która kładzie nacisk na niezależność energetyczną kraju w oparciu o zasoby węgla. Dążenie do wypełnienia zobowiązań wynikających ze Strategii *Europa 2020* wiąże się z zapotrzebowaniem na nowe technologie związane z wychwytywaniem i składowaniem CO₂, które pozwoliłyby na dalsze wykorzystywanie węgla przy znacznym ograniczeniu emisji CO₂ do atmosfery.

Jednym z rozwiązań technologicznych umożliwiających przyjazne środowisku wykorzystanie węgla jest koncepcja jego spalania w atmosferze wzbogaconej w tlen (OXY-fuel) połączona z sekwestracją CO₂. Jest to zagadnienie nowe, niedostatecznie poznane i opisane naukowo, możliwe do szerokiego wdrożenia w praktyce. Technologia OXY-fuel może więc stanowić odpowiedź na strategiczne wyzwania w zakresie ochrony środowiska i energetyki określone w europejskich i polskich dokumentach. Te wyzwania, poparte zainteresowaniami naukowymi, skłoniły mnie do podjęcia prac naukowo-badawczych dotyczących czystych technologii węglowych, w szczególności spalania paliw stałych w atmosferze wzbogaconej w tlen (OXY-fuel). Wynikiem tych prac jest cykl publikacji powiązanych tematycznie zatytułowany: **Spalanie paliw stałych w atmosferze wzbogaconej w tlen.**

W technologii OXY-fuel proces spalania odbywa się w atmosferze tlenu i dwutlenku węgla. Tlen o czystości powyżej 95%, wymagany do organizacji procesu spalania, pozyskuje się na drodze separacji z powietrza w jednostkach zwanych tlenownikami. Z uwagi na występowanie bardzo wysokiej temperatury, realizacja procesu spalania w czystym tlenie byłaby praktycznie niemożliwa i dlatego rozcieńcza się go spalinami pobieranymi z za kotła. Ze względu na swoją pojemność cieplną recyrkulowane spaliny służą również jako nośnik ciepła w kotle. Znaczącym, oprócz CO₂, składnikiem spalin powstałych w procesie spalania OXY-fuel jest para wodna, którą to wykrapla się i usuwa w celu zapewnienia możliwie największego stężenia CO₂.

Obecny stan wiedzy na temat technologii spalania w atmosferze OXY-fuel jest niewystarczający. Wskazuję na to w rozdziale *Kinetyka i mechanizm spalania tlenowego węgla* (pozycja H10), który stanowi wprowadzenie do głównego toku prezentowanej problematyki. W rozdziale tym dokonałem przeglądu aktualnego stanu wiedzy na temat technologii OXY-fuel. Wykazałem, że technologia ta jest nowa i ma wiele obszarów badawczych, które nie są jeszcze gruntownie poznane. Większość z nią związanych jest na etapie badań w skali laboratoryjnej oraz instalacji pilotażowych o mocy maksymalnie 30MW. W skali laboratoryjnej badane są podstawowe procesy spalania i podejmowana jest próba wyjaśnienia mechanizmów takich, jak: odgazowanie części lotnych, spalanie pozostałości koksowej, transformacja substancji mineralnej, tworzenie się zanieczyszczeń gazowych oraz wymiana ciepła. W rozdziale pokazałem, że prezentowane w literaturze naukowej próby wyjaśnienia tych zjawisk przynoszą niejednoznaczne wyniki, które często pozostają ze sobą w sprzeczności. Stąd uważam, że problem wart jest eksploracji i prowadzenia badań naukowych, które pozwolą na poszerzenie wiedzy dotyczącej technologii spalania w atmosferze OXY-fuel. Analiza literatury naukowej, której główne wyniki zaprezentowałem w rozdziale, pozwoliła mi na określenie obszarów badawczych mojej pracy habilitacyjnej. W prezentowanym jako osiągnięcie habilitacyjne cyklu publikacji prezentuję cztery istotne obszary analizy, dotyczące:

1. procesu odgazowania części lotnych i spalania pozostałości koksowej,
2. procesu zapłonu i stabilności płomienia pyłowo-powietrznego,
3. procesu spalania i emisji zanieczyszczeń gazowych NO_x, SO₂,
4. procesu transformacji substancji mineralnej.

Przeprowadzone w tych obszarach prace laboratoryjne pozwoliły na zebranie dużej ilości danych w obszarach spalania i technik kotłowych, obróbki spalin i wiązania CO₂ oraz redukcji zanieczyszczeń, które umożliwiły poznanie procesu spalania w atmosferze wzbogaconej w tlen, jak również wyjaśnienie mechanizmów spalania. Efekty badań empirycznych wraz z ich

omówieniem zaprezentowałem w pozostałych publikacjach składających się na osiągnięcie habilitacyjne.

Odgazowanie części lotnych i spalanie pozostałości koksowej

Podjęcie badań w tym zakresie wynikało z faktu, że prezentowane w literaturze naukowej prace fragmentarycznie tłumaczą wpływ atmosfery OXY-fuel na proces odgazowania części lotnych oraz dopalenia pozostałości koksowej. Istotnym elementem procesu spalania paliw stałych jest etap odgazowania części lotnych z paliwa. Pomimo, iż etap ten jest znacznie szybszy niż dopalenie pozostałości koksowej (od 0.5 do 2 sekund dla ziarna węgla) to odpowiada on za średnio 60% ubytku masy paliwa. W procesie tym z paliwa uzyskuje się produkty gazowe, smołę oraz koks. Za najważniejsze parametry charakteryzujące odgazowanie uważa się ubytek części lotnych, wartość opałową produktów pirolizy oraz wartość opałową powstałego koksu.

W artykule *Differences in reactivity and burnout of coal and lignite in oxy-fuel atmosphere* (pozycja H5) przedstawione zostały badania procesu odgazowania i spalania paliw w warunkach atmosfery powietrza oraz OXY-fuel. Stwierdzono, że proces odgazowania paliwa w zakresie do ok. 650°C jest podobny zarówno w azocie, jak i dwutlenku węgla. Różnice pojawiają się wraz ze wzrostem temperatury. W odróżnieniu od atmosfery azotu, w atmosferze dwutlenku węgla zarejestrowano znaczny ubytek masy już po osiągnięciu stałej temperatury 900°C. Za miarę reaktywności węgla uznano szybkość ubytku masy paliwa w czasie procesu odgazowania, w funkcji temperatury. Odgazowaniu węgla w atmosferze azotu towarzyszy pojawienie się pojedynczego pików, który odpowiada procesowi odgazowania części lotnych z paliwa. Temperatura początku odgazowania dla analizowanych węgli brunatnych wynosi 250-300°C, dla węgla kamiennych jest wyższa i przekracza 350°C. Reaktywność węgla rośnie, aż do osiągnięcia maksimum w temperaturze 400-420°C dla węgla brunatnych i ok. 460°C dla węgla kamiennych, po czym proces odgazowania ulega wygaszeniu. Ten sam proces odgazowania paliwa, przeprowadzony w atmosferze dwutlenku węgla, charakteryzuje się innym przebiegiem i zachodzi dwuetapowo. Etap pierwszy obejmuje pojawienie się pików odgazowania, który przebiega w sposób porównywalny do odgazowania części lotnych w azocie. Zarówno maksymalna reaktywność, jak i temperatura maksymalnej reaktywności jest porównywalna dla obu atmosfer. Po przekroczeniu temperatury odgięcia, reaktywność paliwa ponownie wzrasta, a ubytek masy przekracza zawartość części lotnych w paliwie oraz pojawia się drugi pik na krzywej reaktywności. Uważa się, że drugi etap odpowiada zgazowaniu pozostałości koksowej i zachodzi na drodze reakcji Boudouarda (reakcja pomiędzy C a CO₂). Charakterystyczna temperatura odgięcia procesu odgazowania w CO₂ w porównaniu do odgazowania w N₂ zależy od typu węgla, dla węgla brunatnych występuje w temperaturach ok. 650°C, dla węgla kamiennych w ponad 720°C.

Po skończonym procesie odgazowania dochodzi do zapłonu i wypalenia pozostałości koksowej. Za jedyny składnik części palnej pozostałości koksowej uważa się czysty węgiel, który w wyniku procesu utleniania przechodzi do CO. Powstały tlenek węgla w fazie gazowej podlega kolejnym transformacjom do CO₂. Przeprowadzone badania procesu spalania pozostałości koksowej wykazały, że obecność atmosfery OXY-fuel zwiększa m.in. temperaturę początku spalania koksu, jak i jego reaktywność. Atmosfera OXY-fuel obniża również temperaturę w jakiej paliwo reaguje z maksymalną reaktywnością, w przypadku koksu węgla kamiennych o około 50°C, natomiast dla węgla brunatnych o około 20°C. Zanotowano wyraźną zależność pomiędzy pochodzeniem koksu a jego zachowaniem się w czasie spalania. Bez

względu na atmosferę spalania, koks pochodzący z węgla brunatnego charakteryzuje się wyższą reaktywnością oraz niższymi temperaturami początku i maksymalnej szybkości odgazowania.

Zagadnienia procesu odgazowania części lotnych i spalania pozostałości koksowej zaprezentowałem również w rozdziale *Wpływ typu węgla na przebieg procesu spalania w atmosferze O₂/CO₂* (pozycja H8). Z przeprowadzonych badań procesu odgazowania z szybkim nagrzewem (badania w 1,5m piecu opadowym) wynika, że w początkowym okresie odgazowania ilość wydzielających się części lotnych z węgla silnie zależy od temperatury i czasu przebywania w strefie komory pieca. Bez względu na stopień uwęglenia, odgazowaniu w atmosferze CO₂ towarzyszył mniejszy ubytek masy niż odgazowaniu w atmosferze N₂ (odgazowanie z wolnym nagrzewem – badania w TGA). Wraz ze wzrostem temperatury zwiększał się stopień odgazowania paliwa dla obu typów węgla, różnice w stopniu odgazowania paliwa w różnych atmosferach zmniejszały się wraz z czasem przebywania cząstek w piecu.

Kolejnym podjętym w pracy zagadnieniem było spalanie pozostałości koksowej zrealizowane dla wolnego (< 50 °C/min) i szybkiego nagrzewania (> 10⁴ °C/min) cząstek. Koksy węgla kamiennych i brunatnych zachowywały się bardzo podobnie, bez względu na atmosferę w jakiej zostały spalane – przeprowadzone badania nie wykazały znaczących różnic w zachowaniu się kokсів. Spalanie koksu w powietrzu w porównaniu do spalania w atmosferze OXY-fuel (zbliżona adiabatyczna temperatura spalania) charakteryzuje się mniejszą reaktywnością i większym poziomem niedopału. Uważa się, że wpływ na to zjawisko ma lepszy dostęp do utleniacza, wynikający z wyższego ciśnienia parcjalnego tlenu. Proces spalania w atmosferze OXY-fuel prowadził do otrzymania mniejszego poziomu niedopału niż dla powietrza.

Przeprowadzenie badań procesu odgazowania części lotnych i spalania pozostałości koksowej dla dwóch szybkości nagrzewu cząstek paliwa pozwoliło na weryfikację parametrów kinetyki tych procesów w zależności od typu atmosfery. Wartości energii aktywacji dla procesu odgazowania części lotnych i spalania pozostałości koksowej, dla niskich i wysokich prędkości nagrzewu, okazały się porównywalne. Energia aktywacji potrzebna do zapoczątkowania procesu spalania koksu jest ponad trzykrotnie większa niż energia potrzebna do zapoczątkowania odgazowania węgla. Z przeprowadzonych obliczeń kinetyki procesu odgazowania części lotnych i spalania pozostałości koksowej wynika, że zmiana atmosfery z powietrza na OXY-fuel nie powoduje gwałtownej zmiany tych parametrów. Oczywiście jest to możliwe tylko w przypadku zachwiania właściwej konfiguracji atmosfery OXY-fuel tj. gdy udział recyrkulowanego CO₂ był na poziomie 70% co powodowało, że adiabatyczna temperatura procesu spalania była porównywalna do temperatury w powietrzu. Takie zachowanie się węgla jest bardzo pożądane ze względu na to, że ułatwia to proces modelowania matematycznego tych zjawisk. Zbliżone parametry kinetyczne tych procesów pozwalają na zachowanie dotychczasowych rozwiązań komór spalania bez konieczności wykonywania znaczących zmian konstrukcyjnych. Powoduje to, że technologia OXY-fuel może być zaadoptowana bezpośrednio do jednostek już istniejących, pracujących w reżimie powietrznym (tzw. *retrofitting* lub *Flexi-burnTM*). Przystawienie takiej jednostki na reżim pracy OXY-fuel jest proste, wymaga tylko budowy tlenowni (ASU – *ang. Air Separation Units*), układu recyrkulacji spalin oraz stacji wychwytu i kompresji CO₂. Komora spalania nie wymaga znaczących modernizacji, co ułatwia prowadzenie takiej jednostki w różnych konfiguracjach np.: rozruch kotła w układzie atmosfery powietrza – praca ciągła w atmosferze OXY-fuel, praca

tylko w atmosferze OXY-fuel lub w przypadku awarii ASU powrót do warunków spalania w powietrzu).

Zapłon i stabilność płomienia pyłowo-powietrznego

Jakość zapłonu pyłu węglowego oraz stabilność płomienia pyłowo-węglowego może mieć decydujący wpływ na jakość pracy kotła, jego sprawność oraz uciążliwość dla środowiska. Projektowanie palenisk i palników do kotłów energetycznych, ich eksploatacja oraz poprawne i bezpieczne prowadzenie procesu spalania wymaga znajomości mechanizmu zapłonu i parametrów go opisujących. Również w przypadku zmiany atmosfery spalania cząstek węgla niezbędna jest wiedza o zachowaniu się mieszaniny pyłowo-powietrznej w czasie jej zapłonu.

W artykule *Ignition behavior and flame stability of different ranks coals in oxy fuel atmosphere* (pozycja H1) przedstawione zostały analizy dotyczące jakości i różnic w zapłonie węgla w atmosferze powietrza i OXY-fuel. Zrealizowane badania dotyczyły zarówno zapłonu pojedynczej cząstki, jak również chmury pyłowo-powietrznej. Poznanie parametrów zapłonu jest ważnym elementem badawczym dostarczającym informacji niezbędnych do właściwego zaprojektowania elementów kotła, jak i prowadzenia poprawnych obliczeń modelowych. Wyznaczane parametry zapłonu, tj. temperatura zapłonu i czas indukcji zapłonu zmieniały się w zależności od stopnia uwęglenia węgla. Zapłon węgla kamiennych jest bardziej utrudniony niż węgla brunatnych, co oznacza, że aby w płomieniu pyłowym polepszyć dla danego paliwa parametry zapłonu należy zastosować m.in. wyższe stężenia tlenu, wyższe koncentracje pyłu, drobniejszy przemiał pyłu czy wyższe temperatury otoczenia.

Badania zapłonu pojedynczej cząstki wykazały, że czasy zapłonu ziaren węgla brunatnego miały niższe wartości niż czasy zapłonu dla ziaren węgla kamiennego. Wynikało to z większej reaktywności badanych węgla brunatnych w porównaniu do węgla kamiennych. Dla wszystkich badanych węgla, niezależnie od rodzaju atmosfery gazowej i stężenia tlenu, zarówno czasy indukcji zapłonu, czasy spalania części lotnych, czasy spalania pozostałości koksowej, jak i całkowite czasy spalania cząstki, zwiększały się wraz ze zwiększaniem się rozmiaru ziaren. Natomiast w przypadku temperatury zapłonu pojedynczej cząstki stwierdzono, że wraz ze zwiększaniem się udziału tlenu w mieszaninie O_2/CO_2 temperatura zapłonu cząstki węgla maleje. Rejestrowane obniżenie temperatury zapłonu dla węgla kamiennych i brunatnych było na poziomie 105-115°C. Analizując uzyskane wyniki należy stwierdzić, że warunkami najbardziej zbliżonymi do warunków zapłonu w atmosferze powietrza jest atmosfera OXY-fuel z udziałem tlenu w zakresie 20-25% w przypadku węgla kamiennych oraz 25-30% w przypadku węgla brunatnych.

W warunkach zapłonu chmury pyłowej, kiedy występuje wzajemne oddziaływanie między ziarnami, wartości czasów zapłonu zależały od stopnia uwęglenia paliwa. Najniższe wartości czasów zapłonu miały węgle brunatne, najtrudniej zapalały się węgle kamienne. Obniżenie stężenia tlenu w mieszaninie gazowej z 30% do 5% powodowało wzrost czasów zapłonu chmury pyłowo-powietrznej. Rodzaj gazu z którym mieszano tlen miał zasadniczy wpływ na mierzone wartości charakterystyk zapłonu. Dla wszystkich badanych węgla czasy indukcji zapłonu chmury pyłowej oznaczone w atmosferze powietrza były krótsze od tych mierzonych w atmosferze OXY-fuel. Z przedstawionych badań wynika, że zmiana atmosfery powietrznej na atmosferę O_2/CO_2 dla stężeń tlenu w mieszaninie gazowej poniżej 30% będzie powodowała pogorszenie zapłonu.

W realizowanych badaniach analizowano również wpływ spalania paliw alternatywnych w atmosferze OXY-fuel. W warunkach polskich proces współspalania biomasy jest jednym z głównych kierunków spełnienia zobowiązań wobec UE w zakresie pozyskiwania co najmniej 20% energii ze źródeł odnawialnych.

W artykule *Co-combustion coal and biomass in oxy-fuel atmosphere* (pozycja H3) jednym z podejmowanych zagadnień jest proces zapłonu mieszaniny węgiel – paliwo alternatywne w warunkach atmosfery OXY-fuel. Zrealizowane badania w atmosferze powietrza i OXY-fuel paliw wyjściowych i ich mieszanin wykazały, że dodatek paliwa alternatywnego powoduje zmianę charakterystyki zapłonu mieszaniny niezależnie od badanej atmosfery. Kierunek zmian zależy od parametrów paliwa alternatywnego, jeżeli charakterystyka zapłonu paliwa alternatywnego ma niższe parametry od węgla dodatek taki powoduje obniżenie parametrów zapłonu chmury pyłowo-powietrznej. W przypadku wyższych parametrów zapłonu paliwa alternatywnego jego dodatek podwyższa parametry zapłonu mieszaniny. Jednocześnie analizując charakter tych zmian można zauważyć, że nie są one addytywne w stosunku do udziału paliwa alternatywnego w mieszaninie. Atmosfera OXY-fuel sprzyja stabilności zapłonu chmury pyłowo-powietrznej, zachowanie się mieszaniny staje się bardziej przewidywalne na podstawie udziałów i własności paliw wyjściowych w porównaniu do atmosfery powietrza.

Badania stabilności płomienia pyłowo-powietrznego przedstawione zostały w artykule *Ignition behavior and flame stability of different ranks coals in oxy fuel atmosphere* (pozycja H1). Wynika z nich, że warunki stabilnego zapłonu w laminarnym strumieniu mieszaniny pyłowo-powietrznej były osiągane w temperaturze pieca równej 536°C dla węgla kamiennego i 520°C dla węgla brunatnego. Obecność atmosfery OXY-fuel z 30% stężeniem tlenu powodowała niewielkie obniżenie tej temperatury – o 1-12°C. Przedstawione wyniki badań potwierdziły wcześniejsze obserwacje zebrane w czasie badań zapłonu przez innych autorów (zaprezentowane w rozdziale *Kinetyka i mechanizm spalania tlenowego węgla*, pozycja H10), że dla stabilności i kształtu płomienia oraz parametrów zapłonu podstawowe znaczenie ma właściwa pojemność cieplna i gęstość głównych gazów (N₂ i CO₂) tworzących mieszaninę z tlenem. Pojemność cieplna atmosfery OXY-fuel jest o 38% większa niż pojemność cieplna mieszaniny tlenu i azotu. CO₂ ma wyższą pojemność cieplną, dlatego więcej ciepła jest potrzebne do podwyższenia temperatury, kiedy węgiel utlenia się w czasie zapłonu. Aby więc uzyskać podobne, jak w powietrzu, czasy zapłonu należy zwiększyć stężenie tlenu i rozdrobnienie paliwa.

W artykule *Ignition of coal particle suspension in oxy-fuel (O₂/CO₂) atmosphere* (pozycja H7) prezentują analizy dotyczące wpływu stężenia tlenu w atmosferze na proces zapłonu chmury pyłowo-powietrznej, przeprowadzone 1,5m pionowym reaktorze. Badania wykazały, że wraz ze zmniejszaniem się stężenia tlenu w atmosferze zapłon paliwa jest utrudniony, zwiększa się czas opóźnienia zapłonu. Rejestrowana temperatura zapłonu paliwa dla stężenia 5% była o 100°C wyższa niż dla stężenia 30% w przypadku wszystkich badanych paliw. Również stopień uwęglenia paliwa ma wpływ na jakość zapłonu. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem stopnia uwęglenia paliwa (wyrażonym jako stosunek FR, *ang. Fuel Ratio*) rośnie temperatura zapłonu.

Drugim ważnym elementem badań było rozpoznanie jakie parametry procesu spalania mają wpływ na temperaturę zapłonu mieszaniny pyłowo-powietrznej. Zrealizowane pomiary TGA wykazały, że wraz ze zmniejszaniem się zawartości O₂ w mieszaninie CO₂/O₂ zwiększa się

temperatura zapłonu próbki. Temperaturę tą oznaczano jako miejsce odgięcia się krzywej spalania od krzywej odgazowania w danej atmosferze. Maksymalna szybkość ubytku masy jest rejestrowana dla niższych temperatur, gdy stężenie O_2 wynosi 30% (temperatura około 200-250°C), a wraz ze zmniejszaniem ilości utleniacza temperatura maksymalnej szybkości ubytku masy wzrasta do wartości około 500-550°C. Oznacza to, że wydzielające się części lotne mają łatwiejszy dostęp do utleniacza i mieszanina pyłowo-powietrzna szybciej osiąga warunki zapłonu, przez co proces spalania jest inicjowany w niższych temperaturach, co potwierdzają również badania przeprowadzone w pierwszym etapie (dla 1,5m pionowego reaktora).

Z przeprowadzonych badań wynika niejednoznaczny mechanizm zapłonu pojedynczej cząstki węglowej i wpływu na niego atmosfery wzbogaconej w tlen. Dla ziaren węgla kamiennego wartości czasów indukcji zapłonu w atmosferze powietrza i w mieszaninie gazów 20% O_2 /80% CO_2 były podobne. Ze wzrostem wartości stężenia tlenu do 30% O_2 /70% CO_2 wartości czasów zapłonu obniżyły się. Dla ziaren węgla brunatnego czasy zapłonu w atmosferze powietrza miały większe wartości niż w atmosferze 20% O_2 /80% CO_2 i 30% O_2 /70% CO_2 . Stwierdzono duży wpływ ilości zawartości tlenu na temperaturę zapłonu pojedynczej cząstki. Przeprowadzone badania TGA wykazały, że temperatura zapłonu mieszaniny pyłowo-powietrznej jest rejestrowana w momencie maksymalnego ubytku masy próbki na krzywej spalania w danej atmosferze. Oznacza to, że wydzielające się w czasie ogrzewania części lotne zapalają się, i są w pewnym momencie czynnikiem wspomagającym zapłon pozostałości koksowej paliwa. Potwierdza to dotychczasową wiedzę o procesie zapłonu paliw, a w przypadku atmosfery CO_2/O_2 zaobserwowano podobne zależności pomiędzy procesem odgazowania części lotnych a zapłonem mieszaniny pyłowo-powietrznej. Zastosowanie paliwa alternatywnego w czasie spalania w atmosferze OXY-fuel może przynieść wymierny efekt w postaci obniżenia lub podwyższenia temperatury zapłonu chmury pyłowo-powietrznej. Kierunek zmian zachowania się mieszaniny jest podyktowany jakością zastosowanego dodatku oraz jego udziałem w mieszaninie paliwowej. Podsumowując należy stwierdzić, że również w obszarze zapłonu paliwa i stabilności płomienia pyłowego można znaleźć takie warunki pracy instalacji OXY-fuel, które są bardzo zbliżone do warunków spalania w atmosferze powietrza. Potwierdza to wcześniejsze spostrzeżenia i stwierdzenia, że istnieje możliwość łatwego zaadoptowania instalacji już istniejących do spalania w warunkach atmosfery OXY-fuel bez znaczących zmian konstrukcyjnych komory spalania.

Spalanie, emisja zanieczyszczeń gazowych NO_x , SO_2

Proces spalania paliw stałych jest nierozłącznie związany z emisją zanieczyszczeń stałych i gazowych. Wartości tych emisji podlegają ścisłej kontroli i rozliczeniu finansowemu, dlatego aby móc poprawnie zaprojektować instalację pracującą w reżimie spalania OXY-fuel należy poznać mechanizmy, które wpływają na emisję zanieczyszczeń gazowych, a w szczególności emisję NO_x i SO_2 . W artykule *NO_x and SO_2 emission during oxy-coal combustion* (pozycja H4) przedstawione zostały analizy dotyczące jednostopniowego oraz dwustopniowego spalania paliw w atmosferze OXY-fuel. Aby móc właściwie analizować uzyskane wyniki emisji zanieczyszczeń gazowych należy zwrócić uwagę na fakt, że ilość spalin generowana ze spalania tego samego paliwa w atmosferze OXY-fuel jest o około 20% mniejsza w porównaniu do atmosfery powietrza (szczegółowe informacje przedstawione zostały w artykule *NO_x and SO_2 emissions of coals, biomass and their blends under different oxy-fuel atmospheres*, pozycja H2). Nie uwzględniając tego faktu poziom emisji NO_x , SO_2 wyrażony w standardowych jednostkach mg/m^3 jest wyższy w atmosferze OXY-fuel. Zmiana poziomu odniesienia emisji z m^3 na np.

ilość energii doprowadzoną z 1kg paliwa wyrażoną w GJ pokazuje, że emisja w atmosferze OXY-fuel jest niższa o około 5-30% w zależności od typu spalane go węgla w porównaniu do atmosfery powietrza. Jeżeli dodatkowo proces spalania zostanie przeprowadzony dwustopniowo to redukcja związków azotowych zwiększa się o około 15-20% w zależności od typu spalane go węgla. Obserwowanym jednocześnie efektem dla atmosfery OXY-fuel jest znaczące obniżenie poziomu niedopału w lotnym popiele – o około 30-40% w zależności od typu spalane go węgla. Natomiast w przypadku emisji SO₂ zarówno w przypadku atmosfery powietrza jak i atmosfery OXY-fuel stwierdzono, że jest ona wprost proporcjonalna do zawartości siarki paliwowej. Oznacza to, że jednym z najprostszych sposobów obniżenia emisji SO₂ jest stosowanie paliw o niskiej zawartości siarki.

Powyższe stwierdzenia znajdują bezpośrednie odzwierciedlenie w idei współspalania paliw kopalnych i alternatywnych, a w szczególności biomasy. W artykule *Co-combustion coal and biomass in oxy-fuel atmosphere* (pozycja H3) podejmuję zagadnienie procesu emisji zanieczyszczeń gazowych NO_x i SO₂ w czasie współspalania. Przeprowadzone pomiary laboratoryjne wykazały, że dodatek paliwa alternatywnego powodował obniżenie emisji związków azotu. Takie zachowanie się mieszaniny wydaje się być zgodne z teorią spalania paliw stałych, w której dodatek paliwa o mniejszej zawartości azotu paliwowego oraz większej zawartości części lotnych powoduje obniżenie się emisji NO_x. Zwiększona ilość wydzielanych i spalanych części lotnych sprzyja tworzeniu się bogatych w różne związki stref redukcyjnych, które umożliwiają konwersje związków azotowych do azotu cząsteczkowego. W przypadku emisji związków siarki dodatek paliwa o śladowej zawartości siarki powoduje, że wielkość emisji SO₂ mieszaniny obniża się wraz ze wzrostem udziału paliwa alternatywnego w mieszaninie. Obniżenie emisji jest proporcjonalne do udziału paliwa alternatywnego.

Trzecim badanym elementem procesu emisji NO_x i SO₂ w atmosferze OXY-fuel był typ recyrkulowanych gazów spalinowych do komory spalania. Również w tym przypadku oprócz typu recyrkulowanych spalin rozważano wpływ procesu współspalania paliw alternatywnych. Wyniki tych prac przedstawione zostały w artykule *NO_x and SO₂ emissions of coals, biomass and their blends under different oxy-fuel atmospheres* (pozycja H2). Celem badań było porównanie procesu spalania i współspalania w atmosferze powietrza oraz OXY-fuel realizowanego w dwóch wariantach: recyrkulacji spalin suchych lub mokrych oraz wpływu tak powstałych warunków spalania na emisję zanieczyszczeń gazowych NO_x oraz SO₂. Obecnie w technologii OXY-fuel wyróżnia się dwa podstawowe układy recyrkulacji spalin. W pierwszym przypadku strumień spalin zawracany jest bezpośrednio z za kotła. Pozwala to na zastosowanie znacznie krótszych kanałów do recyrkulacji, a dodatkowo pozwala zmniejszyć objętość elektrofiltra o około 65%. Niestety strumień popiołu zawracanego do komory paleniskowej jest znaczący, co przyspiesza erozję kotła, a także łopatek wentylatora. Drugim, zalecanym układem, jest układ z recyrkulacją spalin pobieranych z za elektrofiltra. Dzięki temu rozwiązaniu unikamy nadmiernej erozji elementów kotła i wentylatora. Niestety rozwiązanie to wymaga zastosowania znacznie dłuższych niż w pierwszym układzie kanałów do transportu zawracanych spalin, a recyrkulowane spaliny zawierają wilgoć i inne zanieczyszczenia gazowe. Badania emisji zanieczyszczeń gazowych NO_x, SO₂ zrealizowane zostały dla dwóch atmosfer tj. O₂/CO₂ oraz O₂/CO₂/H₂O, dwóch węgla (kamienny oraz brunatny), dwóch biomas (pelet słoma oraz pelet drewno) oraz ich mieszanin o udziale biomasy 10, 20 i 30%. Dla paliw alternatywnych emisja związków azotu NO_x jest niższa w porównaniu do węgla zarówno w atmosferze powietrza, jak i OXY-fuel. W przypadku emisji związków azotu stwierdzono, że emisja w atmosferze OXY-fuel jest zależna głównie od zawartości azotu paliwowego, a

dodatek biomasy może ją obniżać lub zwiększać, jeżeli sumaryczna ilość azotu paliwowego mieszaniny jest mniejsza bądź większa od zawartości azotu w węglu. Zachowanie takie wynika z faktu, że w atmosferze OXY-fuel (mieszanina O_2/CO_2) jedyny azot w układzie spalania pochodzi właśnie z paliwa. Równocześnie należy pamiętać, że w warunkach rzeczywistych na takie zachowanie się paliwa/mieszany będzie wpływać również czystość tlenu podawanego do spalania oraz szczelność układu kotłowego. W przypadku recyrkulacji mokrych spalin zaobserwowano obniżenie emisji NO_x , które może być spowodowane tym, że w przypadku atmosfery OXY-fuel w obecności pary wodnej powstają strefy bogate w pośrednie związki azotu, które sprzyjają redukcji NO. Wynika to również z mniejszej konwersji azotu paliwowego do NO w atmosferze OXY-fuel + para wodna, jednak należy pamiętać, że zwiększanie ilości tlenu w układzie może znacząco zmniejszać ten efekt. Niezależnie od typu biomasy badania pokazują znacznie silniejsze uwalnianie substancji lotnych w porównaniu do węgla. W fazie gazowej lotny azot paliwowy z biomasy tworzy głównie NH_3 w przeciwieństwie do HCN tworzonego przez azot paliwowy z węgla, co może mieć pozytywny wpływ na emisję NO, gdy nie są stosowane techniki niskoemisyjnego spalania. W przypadku emisji SO_2 w czasie współspalania mieszanin w atmosferze OXY-fuel potwierdzono wcześniejsze obserwacje dokonane w czasie spalania węgla. Nie stwierdzono znaczącego wpływu obecności pary wodnej na emisję SO_2 , była ona proporcjonalna do ilości siarki wprowadzanej do układu spalania. W odniesieniu do biomas, które praktycznie nie zawierają siarki paliwowej emisja SO_2 w przypadku spalania mieszaniny węgiel+biomasa jest odwrotnie proporcjonalna do zawartości biomasy w mieszaninie.

Elementem niezbędnym do właściwego modelowania matematycznego procesu spalania paliw jest poznanie parametrów kinetyki odgazowania związków azotowych i siarki oraz ich rozdziału na części lotne i koks. Badania takie przedstawione zostały w artykule *NO_x and SO₂ emission during oxy-coal combustion* (pozycja H4). Wynika z nich, że szybkość wydzielania się związków azotowych i ich rozdział na części lotne oraz koks w przypadku atmosfery OXY-fuel jest porównywalna ze spalaniem w atmosferze powietrza (parametr Q na poziomie około 1,16-1,20). Proces odgazowania przebiega dwuetapowo, z szybkim wydzielaniem się części lotnych w pierwszej fazie oraz wolnym, wynikającym z rozkładu pozostałości koksowej w fazie drugiej. Zaobserwowano nieznaczny wpływ atmosfery OXY-fuel na te procesy, polegający na zintensyfikowaniu tych zjawisk o około 5-10% w przypadku węgla kamiennych oraz 10-20% w przypadku węgla brunatnych. Przeprowadzono również obliczenia modelowe procesu odgazowania związków azotu i siarki wyznaczając stałe kinetyczne tych procesów. Analiza uzyskanych parametrów potwierdziła wcześniejsze obserwacje, że atmosfera OXY-fuel sprzyja szybszemu wydzielaniu się części lotnych oraz związków azotowych. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskane zostały niższe wartości energii aktywacji procesu wydzielania się związków azotowych i związków siarki. Stwierdzenia takie znalazły również odzwierciedlenie w rozdziale związków azotowych na części lotne i koks. W przypadku atmosfery OXY-fuel więcej związków azotowych uwalnianych było wraz z częściami lotnymi dla węgla kamiennych. Natomiast w przypadku węgla brunatnych więcej związków azotowych pozostawało w koksie.

Podsumowując, należy stwierdzić, że brak jest znaczących różnic w procesie kinetyki wydzielania się związków azotowych w czasie spalania w atmosferze OXY-fuel i powietrza. Atmosfera OXY-fuel sprzyja intensyfikacji pewnych zachowań w czasie spalania, zwiększa się szybkość wydzielania części lotnych, poprawia kinetykę tego procesu, co w połączeniu z zastosowaniem np. wielostopniowego spalania, recyrkulacji spalin może powodować znaczącą

redukcję NO_x , SO_2 . Również z tych badań wynika, że atmosfera OXY-fuel może być zaadoptowana do rozwiązań już istniejących lub wdrożona w nowobudowanych jednostkach węglowych. Proces spalania i emisji zanieczyszczeń gazowych w warunkach atmosfery OXY-fuel charakteryzuje się parametrami bardzo zbliżonymi do spalania w atmosferze powietrza (przy zachowaniu właściwego udziału tlenu w mieszaninie O_2/CO_2), jednakże gwarantuje uzyskanie wyższych efektów spalania tj.: obniżenie emisji NO_x , obniżenie niedopału w lotnym popiele, wyższą stabilność zapłonu i płomienia pyłowo-powietrznego. Efekty te uzyskiwane są tylko przez zmianę atmosfery, w której prowadzony jest proces spalania paliw stałych, bez konieczności reorganizacji procesu spalania i wprowadzania znaczących zmian konstrukcyjnych w dotychczasowych rozwiązaniach technicznych komór spalania.

Transformacja substancji mineralnej

Ubočnym procesem spalania paliw stałych jest popiół, który w procesie spalania węgla jest niepożądanym balastem doprowadzanym do układu spalania wraz z paliwem. W wyniku procesu spalania popiół zawarty w paliwie ulega uwolnieniu i transformacji pod wpływem czynników takich jak wysoka temperatura czy atmosfera gazowa. W rozdziale *Transformacja substancji mineralnej w warunkach spalania tlenowego* (pozycja H9) przedstawione zostały analizy zachowania się substancji mineralnej w atmosferze OXY-fuel. Do głównych zagrożeń eksploatacyjnych zaliczyć należy proces żużlowania i popielenia, który jest wynikiem reakcji chemicznych i przemian fizycznych zachodzących w paliwie oraz produktach jego spalania. W przypadku spalania węgla w atmosferze powietrza kryterium konstrukcyjnym z punktu widzenia zachowania się substancji mineralnej w komorze spalania jest temperatura mięknięcia popiołu (temperatura kuli ST), która służy jako kryterium temperaturowe spalin opuszczających komorę spalania. Obniżenie temperatury spalin poniżej tej wartości powinno zapewnić zmniejszenie ryzyka żużlowania i szlakowania powierzchni ogrzewalnych drugiego ciągu kotła. Zwiększony udział tlenu w atmosferze OXY-fuel może powodować niekorzystne oddziaływanie na własności popiołu. Przeprowadzone badania wykazały, że popiół powstający w atmosferze OXY-fuel jest bardziej drobnoziarnisty niż popiół tworzący się w atmosferze powietrza. Mniejsze ziarna popiołu, zderzając się ze ścianami i powierzchniami ogrzewalnymi kotłów, łatwiej osadzają się na powierzchni i tworzą bardziej zwartą warstwę osadu. Analiza wskaźników tlenkowych węgla wykazała, że węgle kamienne, w odróżnieniu od węgla brunatnych, mają tendencję do tworzenia niskotopliwych eutektyk. Jednak wyznaczony na ich podstawie wskaźnik żużlowania przyjmuje niską wartość, co przemawia za słabą skłonnością popiołu do żużlowania. W opozycji do wyników standardowych, określających temperaturę spiekania popiołu stoją metody niestandardowe (tj. metoda wytrzymałościowa i ciśnieniowa określania temperatury spiekania popiołu), które wykazały, że temperatury te są znacznie niższe w atmosferze OXY-fuel niż w powietrzu. Obniżenie temperatur może sprzyjać nasileniu się zjawisk żużlowania i popielenia, szczególnie w przypadku układów z recyrkulacją spalin nieodpylonych. Jednak dalsze szczegółowe analizy popiołów takie jak CCSEM (ang. *Computer-Controlled Scanning Electron Microscopy*) i XRD (ang. *X-ray Diffraction*) w atmosferze OXY-fuel nie wykazały odmiennych właściwości popiołów. Popioły węgla pochodzących ze spalania w atmosferze powietrza i OXY-fuel są zbliżone, różnice w składzie ilościowym i jakościowym popiołu nie są tak duże, aby mogły wywołać nasilenie się zjawisk żużlowania i popielenia.

Analizując układ spalania w atmosferze OXY-fuel należy stwierdzić, że jakość recyrkulowanych spalin może wpływać na intensyfikację zagrożeń ze strony popiołu w kotle.

Recykulacja spalin nieodpopielonych może pogłębiać zjawisko korozji, a w szczególnych przypadkach użytkowania paliw o niskiej jakości popiołu intensyfikować zjawiska żużlowania i popielenia. Pamiętać jednak należy o składzie gazowym recykulowanych spalin, w których może pojawić się SO_3 . Wzrost stężenia SO_3 w wyniku recykulacji spalin (3-4 razy) pociąga za sobą zwiększenie zagrożenia procesem żużlowania i popielenia. Niekorzystne działanie siarki wiąże się z jej oddziaływaniem z zewnętrzną warstwą cząstek popiołu bogatych w Ca i Fe, co w konsekwencji prowadzi do tworzenia się mostków pomiędzy poszczególnymi ziarnami. Aglomeracja ziaren wskutek tego mechanizmu wydaje się być bardzo prawdopodobna w dłuższej perspektywie czasowej. Z drugiej strony recykulowane spaliny obniżają temperatura płomienia, zwiększają emisyjność spalin oraz cząstek paliwa, co w połączeniu z występowaniem zmniejszonej prędkości pojedynczych cząstek paliwa obniża to zagrożenie.

Problem szybkości tworzenia się osadów na powierzchniach ogrzewalnych został przedstawiony w artykule *Mineral matter transformation in oxy-fuel coal combustion* (pozycja H6). Próbkę osadów zbierano na ceramicznych sondach w odległości 34, 76 oraz 118 cm od powierzchni palnika w dwóch typach atmosfery tj. powietrzu i OXY-fuel z 30% udziałem tlenu. Pierwszym etapem badań było określenie wpływu zmienionej atmosfery na szybkość tworzenia się osadów popiołu. Przedstawione badania i analizy niestandardowe popiołu wykazały, że szybkość tworzenia się osadów jest większa o około 4-5% w atmosferze OXY-fuel dla węgla kamiennych i brunatnych. Jest to prawdopodobnie spowodowane mniejszym uziarnieniem popiołu oraz faktem, że dominującym składnikiem drobnoziarnistego popiołu są związki potasu (tj. glinokrzemiany potasowe, montmorylonit), które tworzą niskotopliwe eutektyki oraz siarki (piryt). Analiza SEM-EDS (ang. *Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive Spectroscopy*) warstwy osadów wykazała, że w pierwszej kolejności na sondach osadzały się związki tj. glinokrzemiany, hematyt, związki tytanu, a także związki sodu i potasu. Również w przypadku badań szybkości osadzania się popiołu nie stwierdzono znaczących, niekorzystnych zachowań się popiołu pochodzącego ze spalania różnego typu węgla w atmosferze OXY-fuel.

Rezultatem prowadzonych przeze mnie badań zachowania się paliw stałych w czasie spalania w atmosferze wzbogaconej w tlen jest, w moim przekonaniu, wszechstronne, całościowe ujęcie problemu procesu spalania w kotłach pyłowych. Za szczególnie ważne, z perspektywy wkładu w rozwój dyscypliny naukowej, uważam dokonanie poszerzonej analizy naukowej kluczowych zagadnień dotyczących procesu spalania w atmosferze OXY-fuel, takich jak: zapłon, odgazowanie części lotnych i spalanie pozostałości koksowej, emisja zanieczyszczeń gazowych oraz zachowanie się substancji mineralnej, co pozwoliło mi wyjaśnić mechanizmy spalania w atmosferze OXY-fuel. Moje badania dotyczyły zarówno warunków spalania w atmosferze powietrza, jak i atmosferze wzbogaconej w tlen, co umożliwiło mi porównanie przebiegu tych procesów, wskazanie różnic i podobieństw oraz ich wpływu na możliwość wykorzystania technologii OXY-fuel w praktyce. Podjęta tematyka badań jest nowa, aktualna, wpisuje się w światowy trend poszukiwania nowych sposobów wykorzystania węgla w energetyce. Z perspektywy nauk technicznych istotny jest fakt, że prezentowane przeze mnie wyniki analiz i wnioski mają walor teoretyczny, poznawczy, ale także możliwość praktycznego wykorzystania. Zaprezentowane w publikacjach naukowych badania wpisują się w obszary badawcze wspierane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Realizowane prace były wykonywane w ramach Projektu Strategicznego PS/E/2/66420/10 *Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii spalania tlenowego dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO_2* .

Przeprowadzone badania wykazały, że jest możliwe prowadzenie procesu spalania węgla i uzyskanie stabilnych warunków jego spalania w atmosferze wzbogaconej w tlen, jak również wskazały na potencjalne zagrożenia, jakie mogą się pojawić. Efekty moich prac mogą być wykorzystywane zarówno przez przedstawicieli nauki, jak i praktyki – przemysłu. Wykonane badania i dokonane na ich podstawie analizy stanowią ważny głos w naukowej dyskusji dotyczącej mechanizmów spalania w atmosferze OXY-fuel, uzupełniają i poszerzają informacje prezentowane w literaturze naukowej przez inne ośrodki badawcze. Stanowią również ważny zbiór informacji dla krajowych i zagranicznych podmiotów zainteresowanych wdrażaniem w praktyce instalacji pracujących w atmosferze wzbogaconej w tlen. Mogą z nich korzystać biura projektowe realizujące nowe inwestycje energetyczne czy operatorzy dotychczasowych bloków prowadzący prace modernizacyjne. Wyniki badań mogą także służyć innym ośrodkom badawczym jako informacje wyjściowe do projektowania instalacji na dużą skalę laboratoryjną.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych:

W mojej pracy naukowej tematyka wykorzystania paliw w energetyce zawodowej stanowi kluczowy obszar badawczy. Zainteresowania możliwościami i sposobem zagospodarowania paliw w energetyce towarzyszyły mi od czasów studenckich. W 2001 roku ukończyłem studia wyższe na Politechnice Wrocławskiej na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn i obroniłem pracę magisterską *Problemy techniczne z uruchomianiem i eksploatacją cyrkulacyjnych kotłów fluidalnych*, napisaną pod kierunkiem prof. dr. hab. Wiesława Rybaka. W 2005 roku obroniłem, pod kierunkiem prof. dr. hab. Wiesława Rybaka, pracę doktorską *Charakterystyki spalania mieszanin węglowych*. Podczas studiów doktoranckich zająłem się jednym z istotnych problemów użytkowania paliw stałych tj. możliwościami wykorzystania mieszanin węglowych jako sposobem modernizacji elektrowni bez konieczności zmian konstrukcyjnych kotła.

Nie wszystkie moje publikacje z zakresu użytkowania paliw stałych w atmosferze wzbogaconej w tlen zostały włączone do osiągnięcia habilitacyjnego. Szczególną uwagę chciałbym zwrócić na cykl książek *Spalanie tlenowe dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO₂*, wydanych w ramach realizowanego projektu strategicznego PS/E/2/66420/10 *Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii spalania tlenowego dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO₂*. W każdej publikacji byłem współautorem co najmniej jednego z rozdziałów. Są to pionierskie na rynku polskim wydawnictwa dotyczące spalania w atmosferze wzbogaconej w tlen. Cykl ten prezentuje najważniejsze wyniki prac naukowo-badawczych konsorcjum naukowego. W publikacjach tych poruszane są problemy zarówno sposobów pozyskania tlenu do spalania, procesu spalania w kotłach pyłowych i fluidalnych, ale również zagadnienia możliwości wychwytu i składowania CO₂. Książki te stanowią bardzo cenny wkład w rozwój badań nad spalaniem paliw w atmosferze wzbogaconej w tlen.

Do swoich osiągnięć naukowo-badawczych zaliczam również przygotowanie koncepcji naukowej oraz współredakcję monografii *Zeszyty Energetyczne*, T. 1, *Problemy współczesnej energetyki*.

Czynnie angażuję się w działalność konferencyjną uznając, iż organizacja i udział w konferencjach naukowych szczególnie przyczynia się do wymiany myśli naukowej oraz rozwoju badań.

Brałem aktywny udział w wielu projektach badawczych realizowanych z partnerami z przemysłu, byłem współwykonawcą projektów badawczych wdrażanych we współpracy z *Electricite de France*, *Polską Grupą Energetyczną*, *Prometgas*, *ATON HT*, *Mostostal Wrocław*. Uczestniczyłem w realizacji kilkunastu projektów badawczych realizowanych we współpracy z energetyką zawodową m.in. z *Elektrownią Opole*, *Elektrownią Bełchatów*, *Elektrownią Turów* oraz elektrociepłowniami zrzeszonymi w koncernie *EDF Polska (Kogeneracja S.A., EC Rybnik, EC Kraków, EC Wybrzeże)*.

W ramach prac badawczych realizowanych w Zakładzie Inżynierii i Technologii Energetycznych, a później w Katedrze Technologii Energetycznych, Turbin i Modelowania Matematycznego, brałem aktywny udział w projektowaniu i budowie wielu stanowisk badawczych i dydaktycznych. Uruchomiłem między innymi następujące stanowiska badawcze: stanowisko do badania temperatury spiekania popiołu metodą wytrzymałościową i ciśnieniową, 20 litrową kulę do badania wybuchowości pyłów, układ wyciągu spalin dla 3 metrowego pionowego pieca opadowego, stanowisko do badania samozapłonu paliw w warstwie i złożu oraz stanowiska dydaktyczne: stanowisko do badania własności mechanicznych materiałów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, stanowisko do badania własności olei i smarów, a także

stanowisko do badania własności izolacyjnych materiałów konstrukcyjnych. Zrealizowałem również wiele modernizacji istniejących już stanowisk planując zakupy nowego sprzętu laboratoryjnego.

Jestem czynnie zaangażowany w działalność organizacyjną na rzecz Wydziału Mechaniczno-Energetycznego. Pełniłem funkcję kierownika *Laboratorium spalania, zgazowania i pirolizy paliw stałych, biopaliw i odpadów*, brałem udział w procesie rozbudowy laboratorium, zakupie nowej aparatury badawczej, w tym w pracach komisji przetargowych. Jestem pełnomocnikiem Dziekana do spraw współpracy z firmą Volvo. Uczestniczyłem również w pracach związanych z promocją Wydziału, prezentacjach laboratoriów realizujących program kształcenia w zakresie odnawialnych źródeł energii. Brałem udział w projektach dotyczących infrastruktury budynku A-4, np. przygotowywałem dokumentację techniczną dotyczącą oznakowania rampy budynku A-4, byłem także pełnomocnikiem Dyrektora Instytutu I-20 do spraw remontu hali budynku A-4. Jako pełnomocnik wykazywałem się dużym zaangażowaniem i pracowitością, uczestniczyłem w prowadzonych pracach projektowych, koordynowałem i przygotowywałem spotkania z projektantami, firmami oferującymi rozwiązania dla infrastruktury badawczej.

Od roku 2011 współpracuję z Urzędem Marszałkowskim Województwa Dolnośląskiego w ramach programów Przedsiębiorczy Doktorant oraz Grant Plus, w których byłem recenzentem zgłaszanych wniosków badawczych. W tym samym roku rozpocząłem współpracę z Dolnośląską Instytucją Pośredniczącą, prowadziłem szkolenia z zakresu pozyskiwania energii z odnawialnych źródeł dla pracowników DIP, byłem recenzentem merytorycznym w ramach: *Priorytetu 5 „Regionalna infrastruktura energetyczna przyjazna środowisku (Energetyka)”* Regionalnego Programu Operacyjnego dla Województwa Dolnośląskiego 2007-2013.

Od roku 2012 współpracuję z Narodowym Centrum Badań i Rozwoju oraz Narodowym Centrum Nauki, jako recenzent merytoryczny wniosków w ramach: *Polish-Norwegian Research Programme, INNOTECH III, GEKON II, Projektów Badań Rozwojowych, Programu Badań Stosowanych*.

Moje zainteresowania naukowo-badawcze wiążę również z pracą dydaktyczną. Brałem aktywny udział w pracach związanych z wdrożeniem Krajowych Ram Kwalifikacji dla specjalności Odnawialne Źródła Energi na kierunku Energetyka, pełnię funkcję sekretarza specjalności tej specjalności. W ramach obowiązków dydaktycznych prowadzę zajęcia w formie wykładów, ćwiczeń, laboratoriów i seminariów. Dla studentów niestacjonarnych realizowałem wykład i ćwiczenia z *Informatyki*, a obecnie prowadzę wykłady: *Technologie informacyjne, Technologie węglowe nowej generacji* oraz *Kotły i siłownie małej mocy* (wykład + ćwiczenia). Dla studentów studiów stacjonarnych magisterskich i inżynierskich prowadzę następujące zajęcia: laboratoria: *PKM+CAD I, CAD I, CAD II, Solid Edge, Materiały konstrukcyjne i eksploatacyjne, Zespołowe przedsięwzięcie inżynierskie*, ćwiczenia: *Kotły i siłownie małej moc, Technologie i systemy energetycznego wykorzystania biomasy*. W roku akademickim 2005/2006 wygrałem wydziałowy konkurs na prowadzenie kursu autorskiego (wykład + ćwiczenia) z przedmiotu *Systemy energetyczne z wykorzystaniem OZE i energii odpadowej*. Zajęcia te zostały uruchomione w roku akademickim 2007/2008 i odbywają się regularnie. Jestem również promotorem prac dyplomowych stopnia inżynierskiego i magisterskiego w tematyce realizowanej przez Katedrę. Biorę udział w obradach komisji egzaminacyjnych dla kierunku Energetyka. Na Podyplomowych Studiach „*Energetyka odnawialna*” realizuję wykład *Gospodarowanie odpadami i wykorzystanie ich potencjału energetycznego*.

W listopadzie 2006 roku zostałem wyróżniony nagrodą Dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego za całokształt działalności naukowo-dydaktycznej. Moja praca naukowo-

dydaktyczna jest również zauważania przez władze uczelni, w latach 2011, 2012, 2013, 2014 otrzymałem Nagrody Rektora Politechniki Wrocławskiej za wyróżniający wkład w działalność uczelni.

16.11.2015
W. M. Kowalski