



Dr hab. inż. Mariusz Macherzyński, prof. AGH  
Katedra Technologii Paliw  
Wydział Energetyki i Paliw, AGH w Krakowie  
Al. Mickiewicza 30, 30-057 Kraków  
Adres biura: Kawiory 26A, budynek D11, p.202, 30-055 Kraków  
E-mail: macherzy@agh.edu.pl

KRAKÓW 10.01.2024 r.

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**mgr inż. Sergiusza Mandreli zatytułowanej:**

### **Opracowanie modelu matematycznego zjawiska emisji metali ciężkich do powietrza, wody i ziemi w wyniku spalania paliw stałych w obiektach energetycznych**

**Podstawa opracowania recenzji:** pismo nr RIE-BD.512.78.2023 z dnia 06.11.2023 r. od prof. dr. hab. inż. Andrzeja Rusina, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inż. Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej.

#### **1. Informacje wstępne**

Oceny rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Sergiusza Mandreli dokonałem na podstawie przepisów Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 ze zm.).

#### **2. Forma rozprawy**

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Sergiusza Mandreli liczy 153 strony. Na końcu Autor zamieścił spis literatury wykorzystanej do napisania rozprawy (115 pozycji).

Napisana jest w układzie z podziałem na następujące rozdziały:

- 1) Wprowadzenie.
- 2) Badania laboratoryjne materiałów polimerowych.
- 3) Badania pilotowe modułów adsorpcyjnych SPC.
- 4) Badania sorbentów.
- 5) Analiza techniczno ekonomiczna analizowanych technologii
- 6) Podsumowanie

Na końcu umieszczony jest abstrakt w językach polskim i angielskim.

Dysertacja nie zawiera wykazu dorobku naukowego Kandydata. Pan mgr inż. Sergiusz Mandrela jest współautorem 2 prac ujętych w bazie Scopus dotyczących problematyki poruszanej w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.

Praca doktorska została wykonana w Katedrze Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej w Gliwicach pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Wojciecha Adamczyka.

### **3. Opis tematyki i ocena zgodności z dyscypliną naukową**

Spalaniu surowców kopalnych w tym węgla towarzyszą emisje wielu gazów i substancji niebezpiecznych, co powoduje troskę społeczeństw i organów decyzyjnych o jakość środowiska naturalnego. Przez ostatnie 25 lat polski przemysł elektro-energetyczny poczynił bardzo duże starania, aby spełnić wymogi norm środowiskowych podyktowane przez Komisję Europejską dla dużych obiektów energetycznego spalania (LCP). Do 2016 roku około 13-miliardowe inwestycje posłużyły ograniczeniu głównie emisji SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> oraz pyłów lotnych przy jednoczesnej modernizacji i wzroście produktywności bloków energetycznych. W sierpniu 2017 r. zostały opublikowane nowe konkluzje BAT (2017/1442) dla LCP. Na liście substancji poddanych kontroli i dla których ustalono graniczne limity emisji do atmosfery, znalazły się między innymi: NH<sub>3</sub>, HCl, HF, metale ciężkie, w tym rtęć. Dalsze zaskarżenie powyższego aktu prawnego do TSUE oraz wydanie przez KE nowego aktu w grudniu 2021 r. (2021/2326) jeszcze bardziej skomplikowało trudną sytuację polskich elektrowni, które są zobligowane w powyższych dokumentach do zachowania czteroletniego okresu przejściowego na wdrożenie wymaganych praktyk i norm. Ich koszt jest szacowany na kolejne co najmniej 10 mld złotych.

W świetle powyższych faktów praca Pana mgr inż. Sergiusza Mandreli poruszająca tematykę badań i implementacji instalacji usuwających rtęć ze spalin w dużych blokach energetycznych opartych na węglu brunatnym, podejmuje temat ważki i wymagający szybkich rozwiązań i decyzji inwestycyjnych.

Dysertacja podejmuje zagadnienia z pogranicza energetyki węglowej oraz ochrony i inżynierii środowiska. Dotyka tematów związanych z ograniczaniem emisji rtęci do środowiska z dużych obiektów wytwarzających energię elektryczną. Stąd występuje pełna zgodność zaplanowanych i wykonanych przez Doktoranta prac z dyscypliną Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, w ramach której powstała.

### **4. Cel i zakres pracy, część teoretyczna, stosowane urządzenia i metody badawcze**

Głównym celem pracy doktorskiej była **próba wypracowania metodologii powiązanych z wyborem właściwej technologii ograniczenia emisji rtęci z układów oczyszczania spalin bloków energetycznych.**

Cele szczegółowe zakreślone przez autora, to:

- analiza możliwości zastosowania modułów adsorpcyjnych na bazie SPC (Sorbent Polymer Catalyst – technologia GORE®) do usuwania rtęci, wykonana na podstawie badań laboratoryjnych oraz pilotażowych, mająca na uwadze ograniczenie emisji rtęci do powietrza gleby oraz wody,

- opracowanie autorskich procedur badawczych i stanowisk laboratoryjnych do testów usuwania rtęci w modułach adsorpcyjnych SPC,
- wykorzystanie dedykowanych instalacji pilotażowych zabudowanych na odcinku wyprowadzenia spalin z IOS, do testów usuwania rtęci w modułach adsorpcyjnych SPC,
- zebranie danych i opracowanie matematycznego modelu adsorpcji rtęci w badanym materiale polimerowym (SPC),
- przeprowadzenie badań obejmujących wtrysk wybranych sorbentów (w tym komercyjnych mieszanek na bazie węgla aktywowanego) oraz dodatków paliwowych, w celu analizy możliwości usuwania rtęci, przez i za obrotowymi podgrzewaczami powietrza (OPP); prace te mają służyć przede wszystkim rozeznaniu użycia sorbentów w technologiach hybrydowych (wtrysk sorbentu + moduł GORE®),
- wykonanie pomiarów stężenia rtęci w kilku wyznaczonych lokalizacjach instalacji oczyszczania spalin bloku węglowego podczas wtrysku sorbentów,
- opracowanie modelu matematycznego pozwalającego na modelowanie procesu redukcji zawartości rtęci w gazie na węglu aktywnym,
- wykonanie analizy inwestycyjno-ekonomicznej wybranych podejść technologicznych usuwania rtęci ze spalin, ze szczególnym uwzględnieniem podejścia hybrydowego (nastrzyk sorbentu + moduły SPC).

W pracy znajduje się wprowadzenie literaturowe (podrozdział 1.2), które nakreśla tematykę usuwania rtęci ze spalin i jej wagę. Wskazuje także na zastosowanie modeli obliczeniowych bazujących na numerycznej mechanice płynów CFD jako ważnych i właściwie niezbędnych we współczesnym projektowaniu przemysłowym.

Z uwagi na złożoność i wielostanowiskowość przedstawionych prac (laboratorium, dwie instalacje pilotażowe, badania z wtryskiem sorbentów), stosowane przez Doktoranta metody badawcze i urządzenia były opisywane w poszczególnych podrozdziałach. W pomiarach przemysłowych ilość urządzeń i metod wzrastała proporcjonalnie do złożoności obiektu badań. Rtęć - główny obiekt badań – analizowana była w paliwie oraz fazie gazowej, w wielu miejscach ciągu odprowadzania i oczyszczania spalin.

W sferze budowania modeli matematycznych zastosowane zostało środowisko modeli obliczeniowych bazujących na numerycznej mechanice płynów CFD (ang. Computational Fluid Dynamics) i komercyjne oprogramowanie CFD Ansys® Fluent. Symulacje numeryczne zastosowano nie tylko w odniesieniu do usuwania rtęci w modułach SPC, lecz także do analizy procesu wtrysku i adsorpcji rtęci na węglu aktywnym.

Na końcu pracy Autor posłużył się analizą kosztów inwestycyjnych (CAPEX) i ich wpływu na koszty operacyjne (OPEX), dla przyjętych czterech scenariuszy instalacji usuwania rtęci ze spalin.

## 5. Omówienie wyników badań wchodzących w skład rozprawy doktorskiej

**Prace badawcze** zostały zaprezentowane w trzech rozdziałach, poświęconych odpowiednio:

1. Badaniom laboratoryjnym materiałów polimerowych SPC.
2. Badaniom pilotowym modułów adsorpcyjnych SPC.

### 3. Badaniom sorbentów w procesie wtrysku i oczyszczania spalin z rtęci.

Rozdział „Analiza techniczno ekonomiczna analizowanych technologii” stanowi końcowe rozwiązanie projektowe - próbę końcowego oszacowania kosztów inwestycyjnych i operacyjnych czterech odmiennych konfiguracji technologicznych dla wybranego bloku energetycznego. **Obiektami badawczym** były wybrane fragmenty ciągu spalin bloku energetycznego Elektrowni Pątnów II, które służyły badaniom skuteczności wtrysku sorbentów i utleniaczy na redukcję zawartości rtęci w spalinach. W innych eksperymentach, w Elektrowniach Pątnów II i Bełchatów, za instalacją mokrego odsiarczania, zamontowano kontenerowe instalacje pilotażowe do badań usuwania rtęci na modułach SPC. Wcześniej prowadzono badania laboratoryjne właściwości materiału adsorpcyjnego SPC na autorskiej instalacji Doktoranta.

W trakcie **badania laboratoryjnych** zweryfikowano dane dotyczące badanych materiałów, które dostarczyła firma GORE oraz uzyskano dodatkowe dane pomiarowe dla materiałów adsorpcyjnych SPC w początkowym i zaawansowanym stopniu nasycenia rtęcią (tak jak w przypadku instalacji pracującej kilka lat). Przebadano wpływ na „redukcję rtęci” (rozumianą w pracy jako  $C_{Hg(g)\_wyjście}/C_{Hg(g)\_wejście} * 100\%$ ) następujących parametrów wprowadzanej mieszaniny gazów: temperatura, zawartość rtęci elementarnej, stężenie rtęci na wejściu, prędkość medium. Badano powtarzalność pomiarów usuwania rtęci dla kolejnych kilkunastu pomiarów na tym samym materiale oraz wpływ nasycenia rtęcią materiału SPC, gdzie przy przekroczeniu wartości 4% materiał zaczynał desorbować rtęć do otaczającego gazu. Analizy wykazały nieznaczny spadek redukcji rtęci od wzrostu temperatury (0,012%/°C) oraz wyraźny negatywny wpływ prędkości liniowej gazu (skrócony czas kontaktu rtęci z materiałem SPC). Z kolei zostało zaproponowane podejście modelowe pozwalające na wyznaczenie efektywności usuwania rtęci na modułach SPC dla instalacji rzeczywistej. Komorą pomiarową zastosowaną na stanowisku laboratoryjnym był prosty kanał o przekroju 20x15 mm i wysokości 300 mm. W niej montowane były płaskie i faliste elementy materiału SPC. Przyjmując, że ogólny współczynnik transportu (k) nie zmienia się, Doktorant założył możliwość przeskalowania wielkości redukcji zawartości rtęci pomiędzy różnymi konfiguracjami modułów polimerowych.

Rzeczywiste elementy SPC, których praca może być zasymulowana przy zastosowaniu zaprezentowanego w dysertacji modelu matematycznego składają się z setek kanałów w pojedynczym module GORE®, a wspomniane moduły instaluje się jako warstwy, których ilość decyduje o końcowej skuteczności procesu usuwania rtęci ze spalin. Wielość kanałów oraz ich nieregularna struktura uniemożliwia pełne odwzorowanie geometrii wypełnienia w modelu. Stąd Doktorant zdecydował się na przedstawienie całego modułu jako strefy porowatej. Model adsorpcji rtęci w materiale polimerowym oparty został o dane uzyskane od producenta modułów i zaimplementowany przy wykorzystaniu tzw. funkcji użytkownika (ang. User Defined Functions – UDF). Wyniki uzyskane zostały przy zaimplementowaniu do modelu m.in.

funkcji spadku ciśnienia zależnej od prędkości liniowej medium, mającej zasadniczy wpływ na wielkość adsorpcji rtęci w module, jak również równań ciągłości dla fazy gazowej, zachowania pędu, energii i masy oraz równania zmiany udziału masowego związku chemicznego. Przeprowadzono test niezależności rozwiązania od siatki numerycznej. Różnice pomiędzy wynikami usuwania rtęci z modelu CFD a danymi od producenta dla pojedynczego kanału nie przekroczyły 0,7% dla różnych kombinacji warunków brzegowych ze średnią wartością równą 0,35%. Przewidziano docelowe zastosowanie modelu numerycznego do przeprowadzenia symulacji redukcji zawartości rtęci w praktyce z potencjalnym jego zastosowaniem do projektowania instalacji dla dowolnego rzeczywistego obiektu.

W ramach **badania pilotowych modułów adsorpcyjnych SPC** zaprojektowano oraz zbudowano dwie instalacje pilotażowe umieszczone na bypass-ie przy kanałach wylotowych absorberów IOS w Elektrowni Pątnów II i Bełchatów. Jednym z założeń dla prowadzonych tam pomiarów było sprawdzenie w skali ułamkowo-technicznej możliwości usuwania rtęci poniżej  $1-7 \mu\text{g}/\text{Nm}^3_{\text{USR}}$  oraz  $\text{SO}_2$  poniżej  $130 \text{mg}/\text{Nm}^3_{\text{USR}}$ . Założono pomiary ciągłe, bezobsługowe, przez okres odpowiednio około 30 i 60 dni, przy pomiarze dodatkowych składników spalin jak  $\text{SO}_3$ ,  $\text{O}_2$ , zawilgocenie i rtęć mierzona metodą znormalizowaną PN-EN 13211 oraz rtęć w paliwie (EPA 7473:2007). Zrealizowane pomiary ciągłe udowodniły zmniejszenia emisji rtęci ze spalin poprzez zastosowanie 6 (Pątnów II) i 12 (Bełchatów) warstw modułów materiału polimerowego. Dla potrzeb porównania obu instalacji wykonano dodatkowe pomiary rtęci w przekroju za 6-ma warstwami modułów w Elektrowni Bełchatów. Wartości redukcji na tych przekrojach w obu elektrowniach były porównywalne (rzędu 72-77%). Ekstrapolacja funkcji usuwania rtęci w instalacji pilotowej w Pątnowie II za 12 warstwą daje wynik stężenia rtęci na poziomie  $0,5 \mu\text{g}/\text{Nm}^3_{\text{USR}}$ , a wyniki uzyskane w Bełchatowie również były poniżej  $0,85 \mu\text{g}/\text{Nm}^3_{\text{USR}}$ . Wykonano analizę zmiany masy modułów na instalacji w Elektrowni Pątnów II, która skłoniła Doktoranta do wniosku, że w zadanych warunkach moduły miałyby przeżywalność 6-8 lat. Wprowadzenie na tym etapie wcześniej wypracowanego modelu matematycznego pozwoliło otrzymać współczynniki korygujące do wykorzystania przy modelowaniu pełnowymiarowych instalacji redukcji emisji rtęci w spalinach.

W rozdziale „**Badanie sorbentów**” Doktorant wytypował 8 sorbentów do badań redukcji emisji rtęci. Układ pomiarowy miał swój początek w spalinach surowych przed OPP w wytypowanym bloku energetycznym Elektrowni Pątnów II, gdzie przy użyciu własnej konstrukcji mobilnego układu dozowania sorbentów sypkich podawano je do spalin w zakresie 80–370 kg/h. Zaplanowano 6 przekrojów pomiarowych, gdzie mierzono wiele wielkości fizykochemicznych i składników spalin, a w 5 z nich, umieszczonych za wtryskiem sorbentu, istniała możliwość ciągłego pomiaru stężenia rtęci gazowej w spalinach. Na podstawie uzyskanych wyników wielogodzinnych testów poprzedzonych pomiarami bazowego stężenia rtęci w spalinach surowych, ostatecznie tylko dwa materiały sypkie: komercyjne, impregnowane węgle B-PAC+ (redukcja rtęci rzędu 85-90% dla dawki  $120 \text{kg}/\text{MNm}^3$ ) i z mniejszym skutkiem Darco Hg-LH Extra SR, nadawały się do usuwania większych zawartości rtęci w spalinach z węgla brunatnego. Uzyskane wyniki dla różnych konfiguracji ilości podawanych sorbentów pozwoliły na obliczenie funkcji łączącej masę użytego sorbentu ( $m_s$ ) na  $\text{MNm}^3$  i zadaną lub uzyskaną różnicę stężeń rtęci w spalinach ( $d\text{Hg}$ ).

Dla B-PAC+ funkcja przyjęła postać  $m_s=10,5e^{0,2dHg}$ , a dla sorbentu Darco  $m_s=37,7e^{0,1dHg}$ . W określonych przypadkach można również rozpatrywać użycie sorbentu Sorbacal 35 przy potrzebie docelowego obniżenia stężenia rtęci w spalinach maksymalnie do 7-8  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3_{6\%O_2}$ , do czego potrzeba zużyć 120-200 kg sorbentu na  $\text{MNm}^3$ .

Analiza wpływu dodatków soli NaBr i  $\text{CaBr}_2$  okazała się dość skomplikowana ze względu na fakt, że dozowanie odbywało się bezpośrednio na taśmociąg zasobników węglowych i występowało trudne do przewidzenia opóźnienie czasowe pomiędzy podaniem soli z mauzera, a widocznym efektem w postaci obniżenia stężenia rtęci. Sytuację pogarsza niemożność dobrego określenia zmiennego stężenia bazowego rtęci. Jednakże przy zastosowaniu ścisłych 3-godzinnych okienek czasowych nawęglania na przemian paliwem czystym i zroszonym dodatkiem oraz przyjętym czasie odpowiedzi układu badawczego (około 6 h), Doktorant wykonał pomiary 24-godzinne i analizę wyników, które jednak nie przyniosły spodziewanych wyników (rtęć w gazie poniżej 7,0  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3_{\text{USR}}$ ) przy strumieniu obu dodatków w zakresie 11-16 kg/100 Mg węgla.

Dla badań nad rozwiązaniami hybrydowymi (6 warstw modułów SPC + wtrysk danej ilości sorbentu), Doktorant sformułował pojęcie „efektywności technologii hybrydowej”, która uwzględnia także usuwanie rtęci metodami pośrednimi (w odpylaczu czy adsorberze IOS). Doktorant dochodzi do ważnego wniosku, że ograniczenie ilości warstw modułów SPC do max. 2 - 3 oraz dobranie odpowiednich dawek sorbentów, pozwoli na osiągnięcie wymaganych limitów emisyjnych przy uwzględnieniu akceptowalnych kosztów operacyjnych instalacji. Dla trzech wymienionych wcześniej sorbentów przeprowadzono pomiary redukcji emisji Hg w odniesieniu do wstrzykniętej dawki w technologii hybrydowej. Uzyskano asymptotyczne krzywe ukazujące strumieni wtryskiwanego sorbentu, których przekroczenie nie poprawia już wyniku efektywności technologii hybrydowej.

W końcowej części tego rozdziału Pan mgr inż. Sergiusz Mandrela przeanalizował cztery modele adsorpcji rtęci na ziarnach węgla aktywnego. Ponowne zastosowanie CFD do układu gaz-sorbent pozwoliło na uzyskanie znacznie większej ilości szczegółów niż bilans ilości substancji czy bilans energii przeprowadzane globalnie. Symulacja procesu wtrysku i adsorpcji na węglu aktywnym pozwala na uzyskanie szczegółowych informacji o przepływie spalin, ruchu cząstek węgla, przestrzennym rozkładzie rtęci w kanale spalinowym, a także rozkładach prędkości, ciśnienia i temperatury. Modelowanie numeryczne zastosowane w tym przypadku pozwala na przeprowadzenie analizy wpływu parametrów geometrycznych (kształt i wymiary kanału), przepływowych (kierunek, wartość, rozkład przestrzenny wektorów prędkości, temperatura spalin) czy wreszcie parametrów węgla aktywnego (średnica, rozkład średnic, porowatość cząstek, ilość i sposób ich rozpylania) na usuwanie rtęci ze środowiska gazu procesowego. Takie modelowanie może być jeszcze bardziej skomplikowane ze względu na wskazane przez Autora procesy kolizji, aglomeracji, pękania, ścierania, erozji czy formowania się wirów. W celu wizualizacji rozkładu stężenia oraz modelowania procesu redukcji rtęci Doktorant zdecydował się na wykonanie symulacji numerycznych z wykorzystaniem pakietu Ansys® Fluent. Zaimplementowany został model redukcji drugiego rzędu. Do modelowania wtrysku węgla aktywowanego oraz procesu adsorpcji/desorpcji wykorzystano model Euler-Lagrange'a DPM (ang. Discrete Phase Model) - modelowanie przepływu spalin następowało w układzie Eulera podczas gdy ruch cząstek modelowany był poprzez całkowanie równania ruchu cząstki. Ostatecznie, oddziaływania pomiędzy cząsteczkami zostały pominięte ze względu na udział objętościowy fazy stałej poniżej 2%. Dla kanału testowego 10 m o przekroju 1x1 m został

wyprowadzony model adsorpcji poprzez wykorzystanie danych literaturowych oraz funkcje użytkownika. Działanie modelu oraz jego wrażliwość na dane wejściowe została sprawdzona poprzez serię numerycznych symulacji testowych (6 przypadków). Wyznaczono strumienie sorbentu dla danych warunków oraz przeprowadzono weryfikacyjne symulacje numeryczne (3 przypadki). Doktorant sprawdził korelację modelu numerycznego instalacji dozowania sorbentu B-PAC+ ( $85,44 \text{ kg/MNm}^3$ ) z rzeczywistymi wynikami otrzymanymi podczas pomiarów obiektowych w Elektrowni Pątnów II. Analizowano przypadek redukcji emisji rtęci pomiędzy wtryskiem i wlotem do elektrofiltru. Wynosiła ona 56% (obniżenie stężenia rtęci o  $13,2 \mu\text{g/Nm}^3_{\text{USR}}$ ), a wyniki symulacji i rzeczywiste różniły się o 2,9% ( $0,28 \mu\text{g/Nm}^3_{\text{USR}}$ ).

Rozdział „**Analiza techniczno ekonomiczna analizowanych technologii**” stanowi końcowe rozwiązanie projektowe - próbę końcowego oszacowania kosztów inwestycyjnych i operacyjnych różnych rozwiązań technologicznych dla wybranego bloku energetycznego. Projekt opiera się na uzyskanych wcześniej wynikach badań laboratoryjnych, przemysłowych i następujących po nich symulacjach oraz przyjętych założeniach projektowych dla czterech wariantów usuwania rtęci:

- dedykowana instalacja magazynowania i wtrysku sorbentu (węgla aktywnego) – średnie koszty inwestycyjne i spodziewane wysokie koszty operacyjne,
- dedykowana instalacja magazynowania, dystrybucji i natrysku soli bromu - pomimo niskich kosztów inwestycyjnych ostatecznie wariant zarzucony z powodu niepewności związanych ze skutecznością metody, a co najważniejsze z powodu spodziewanych bardzo wysokich kosztów związanych z korozją wielu instalacji bloku energetycznego i jego przestojami,
- zabudowa modułów SPC wraz z modernizacją IOS – wysokie, ponad 3,5 razy większe od węgla aktywnego koszty inwestycyjne,
- rozwiązanie hybrydowe (zmniejszona ilość modułów SPC + interwencyjny wtrysk sorbentu przy podwyższonych stężeniach rtęci) – przy mniejszej ilości warstw modułów SPC (2-3) obiekt nie osiągnie oczekiwanej redukcji emisji Hg, jednak emisja zostanie znacząco obniżona, co pozwoli na zastosowanie wtrysku węgla w dużo mniejszych ilościach. Doktorant przeprowadził analizę układu hybrydowego składającego się z trzech warstw modułów SPC i zautomatyzowanej stacji wtrysku sorbentu, która działałaby tylko na wypadek niebezpieczeństwa przekroczenia limitu emisyjnego Hg. Oznaczałoby to skrócenie czasu pracy wtrysku węgla aktywnego do 80 h w miesiącu.

## 6. Najważniejsze osiągnięcia naukowe rozprawy doktorskiej

Do najważniejszych osiągnięć pracy doktorskiej Pana mgr inż. Sergiusza Mandreli zaliczam:

- a) Opracowanie autorskiej instalacji do badań procesu adsorpcji rtęci na modułach SPC w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, w tym opracowanie metodyki nasycania próbek polimerowych rtęcią i zaprojektowanie dodatkowej komory nawilżającej mieszaninę gazów bogatych w pary rtęci.

- b) Zaprojektowanie i budowa dwóch instalacji pilotażowych umieszczonych w lokalizacjach: Elektrownia Pątnów II i Elektrownia Bełchatów, w celu sprawdzenia efektywności modułów adsorpcyjnych (redukcja emisji rtęci i SO<sub>2</sub>) pracujących w skali ułamkowej-technicznej (przepływ spalin około 6000 Nm<sup>3</sup>/h).
- c) Zaprojektowanie i skonstruowanie mobilnego układu dozowania sorbentów stałych o zabudowie kontenerowej z możliwością rozdzielania materiału na 6 punktów wtrysku. Zaplanowanie, koordynacja i przeprowadzenie bardzo skomplikowanych pomiarów usuwania rtęci ze spalin za pomocą sorbentów w warunkach przemysłowych.
- d) Wyniki badań laboratoryjnych wraz z danymi producenta modułów SPC wykorzystał Doktorant do opracowania modelu matematycznego pozwalającego na modelowanie procesu redukcji emisji rtęci na materiale SPC i w dalszej kolejności na modułach GORE®. Model usuwania rtęci został zaimplementowany do środowiska obliczeniowego Ansys FLUENT za pomocą autorskich funkcji użytkownika. Wypracowane przez Doktoranta obliczenia numeryczne pozwalają na analizę możliwości redukcji emisji rtęci z wykorzystaniem różnych konfiguracji modułów GORE® dla wybranych lub projektowanych obiektów przemysłowych, czyli możliwa stała się analiza badanych w pracy procesów adsorpcji rtęci w pełnowymiarowych obiektach energetycznych już na etapie ofertowania. Opracowano również i zwalidowano model numeryczny procesu adsorpcji rtęci na ziarnach węgla aktywnego, który może być wykorzystywany do projektów w skali przemysłowej oraz optymalizacji istniejących systemów usuwania rtęci na sorbentach sypkich.
- e) Dzięki zgromadzonym danym z badań, pomiarów, symulacji numerycznych oraz posiadanemu niewątpliwie doświadczeniu w pracach inwestycyjnych na obiektach energetyki węglowej, Doktorant przeanalizował i zaproponował optymalne rozwiązanie hybrydowe dla metody usuwania rtęci ze spalin z węgla brunatnego. Koszty operacyjne związane ze zmniejszeniem zużycia węgla aktywnego w zaproponowanym rozwiązaniu spadły o 90%.

## **7. Uwagi/pytania/wątpliwości, które nasuwają się podczas czytania dysertacji**

### **Zagadnienia nadające się wg recenzenta do szerszego omówienia przez Doktoranta:**

- a) W moim przekonaniu tytuł dysertacji i niektóre cele z nim powiązane nie odzwierciedlają dokładnie wykonanych prac. Możemy sobie wyobrazić, że modelowanie matematyczne na przykładzie rtęci posłuży modelowaniu usuwania innych lotnych metali lub ich związków ze spalin, ale należy spodziewać się jakiegoś odniesienia do tej tematyki w niniejszej pracy. Z kolei praca nie porusza bezpośrednio zjawisk przedostawania się Hg do wód i gleb, co uzasadniałoby pojawienie się tych sformułowań w samym tytule.
- b) Praca nie posiada typowego wstępu teoretycznego, w którym mogłyby się znaleźć fragmenty tekstów samej rozprawy doktorskiej, jak chociażby nie oparty na własnych



badaniach podrozdział 4.4 (Model redukcji rtęci sorbentem), ale także brakujące wg mnie wprowadzenie do środowiska ANSYS czy uporządkowanie w podrozdział generalnych zasad rządzących się wprowadzaniem do modelu funkcji użytkownika. To ostatnie utrudniało np. zrozumienie przekazu autora na str.109-110. W pracy brakuje także spisu skrótów i pojęć branżowych z dziedziny energetyki węglowej i modelowania matematycznego (podam jeden przykład: „ujemne źródło”).

- c) Doktorant we wprowadzeniu do pomiarów na instalacjach pilotażowych oraz podczas wtrysku sorbentu, planuje pomiar szeregu składników gazu w kilku punktach (przykładowo O<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, wilgotność oraz wiele parametrów wynikających z rys. 4.10), po czym nie prezentuje uzyskanych już wyników pomiarowych. Trzy wyniki stężenia SO<sub>2</sub> dla eksperymentów w pilotach (tab. 3.2 i tab. 3.3) rozmiągają się z opisem w tekście mówiącym, że został nieprzekroczony limit emisyjny 130 mg/Nm<sup>3</sup>. Jaki był czas uśredniania wyników z tab. 3.2 i 3.3? Czy analiza zmiany masy modułów (podrozdział 3.2.1) nie powinna uwzględniać nasycenia modułów również innymi substancjami, w tym SO<sub>2</sub>?
- d) Pomiarы rtęci zaplanowane zostały w wielu punktach i przy pomocy kilku metod manualnych i zautomatyzowanych (w niektórych punktach 2-3 metody jednocześnie). Autor nie przeprowadził analizy spójności uzyskiwanych wyników stężeń rtęci dla różnych metodyk i w różnych punktach (np. za instalacją pilotażową stężenia Hg przy badaniach B-PAC+ są niższe niż te w kominie – dlaczego?). Generalnie jako wyniki zostały przedstawione analizy rtęci on-line. Zabrakło stosownego wprowadzenia do stosowanych metod pomiarowych rtęci, trudno było rozszyfrować, jakie analizatory rtęci były w użyciu. Problem jest złożony i dotyczy bardzo niskich zawartości Hg w spalinach i zasługiwał moim zdaniem na większą uwagę.
- e) Czy dobrze rozumiem, iż model wykazał, że większe uziarnienie sorbentu wpływa na wyższy stopień redukcji rtęci i dlaczego? Skąd pozyskano dane wejściowe dla sorbentu B-PAC+ w modelowaniu obiektu rzeczywistego (rozdział 4.11), skoro w implementacji modelu stosowano dane dla sorbentu Darco? W tab. 4.6 przy Case4 jest najwyższy udział Hg na wylocie i najwyższy stopień redukcji, czy nie został omyłkowo wstawiony zły wykładnik potęgowy?

#### **Pomniejsze uwagi i komentarze:**

- a) Autor używa często sformułowań „koncentracja Hg” i „redukcja Hg”. Te pojęcia są przez większość odbiorców zrozumiałe, ale puryści językowi będą wskazywać, że koncentracja kojarzy się w pierwszej kolejności z techniką wojskową, psychologią albo zjawiskiem nagromadzenia się, a redukcja jest kalką z języka angielskiego i może w niektórych polskich kontekstach oznaczać zmianę stopnia utlenienia Hg. Dla jasności przekazu zachęcam do stosowania prostych zamienników jak chociażby „stężenie Hg” i „usuwanie (stopień lub skuteczność usuwania) Hg”. Również w pracy pojawia się dla rtęci w środowisku spalin kotłowych błędne określenie „rtęć metaliczna”, a powinno być „rtęć elementarna” – jest

teoretycznie możliwe występowanie śladów rtęci metalicznej w gazie, ale w gorących spalinach są to pary (pojedyncze atomy jak w przypadku gazów szlachetnych).

- b) Praca zawiera błędy edytorskie takie jak opisy czy podpisy w języku angielskim (np. rys.4.2), używanie kropki jako znacznika dziesiętnego, brak rys. 4.36 (tylko podpis), s.40 (powołanie się na nieistniejącą tab. 4), s.49 (trudny do analizowania ze względu na małą czcionkę schemat na rys.3.4), zdarzające się braki opisu krzywych (np. rys. 4.24-4.26 bez skali czasowej na osi X), nieprawidłowe podpisy (np. pod rys 3.10), tab. 4.1 (zastanawiający rozrzut kaloryczności węgla oraz nieprawidłowe przeliczenie kJ z kcal), brak nawiasów przy zapisie funkcji wykładniczej „exp” (str. 98-99), tab. 4.3 (nazwy dwóch różnych dodatków paliwowych są takie same). Jak interpretować równanie 4.25?
- c) s.51 (tab. 3.1) - średnie stężenie Hg w węglu zostało wyliczone na podstawie 5 wyników, z czego jeden był na granicy odrzucenia w teście Dixona na błąd grubo i zawyżał średnią. Nie istniała techniczna możliwość uzyskania wyniku średniego na podstawie większej ilości próbek?

**Przedstawione komentarze, pytania i uwagi nie umniejszają wartości naukowej rozprawy doktorskiej.**

#### **7. Wniosek końcowy**

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Sergiusza Mandreli odpowiada wymogom i warunkom określonym w Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 ze zm.).

Napisana przez Pana mgr inż. Sergiusza Mandrelę praca doktorska świadczy, że posiada On szeroką wiedzę teoretyczną i wysokospecjalistyczną wiedzę techniczną oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i badawczej w zakresie inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki. Dysertacja zawiera elementy nowości naukowej, a także jest gotowym rozwiązaniem aplikacyjnym w kluczowej dziedzinie gospodarki. Przedstawiono w niej zaawansowane i specjalistyczne rozwiązania inżynierskie i projektowe problemu naukowego. Wobec powyższego wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z wyrazami szacunku