

Dr hab. inż. Rafał KOBYLECKI, prof. PCz  
Politechnika Częstochowska  
Wydział Infrastruktury i Środowiska  
Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych  
ul. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa  
E-mail: [rafal.kobylecki@pcz.pl](mailto:rafal.kobylecki@pcz.pl)

Częstochowa, 2025.02.27

### **Recenzja**

**Rozprawy Doktorskiej mgr inż. Natalii PAWELEC**

#### **PODSTAWA FORMALNA RECENZJI**

Recenzja niniejsza została napisana w odpowiedzi na pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej RIE-BD.512.48.2024 z dnia 2024.11.27 oraz zawartą na jego podstawie z autorem niniejszej recenzji umową o dzieło UMC/4889/2024 na wykonanie recenzji (stopień doktora) do wniosku nr 4213/UMC/RIE0-1/2024.

#### **ZAKRES OCENIANEJ ROZPRAWY**

Będąca przedmiotem niniejszej oceny rozprawa doktorska mgr inż. Natalii PAWELEC nosi tytuł *Analiza wpływu rodzaju spalanego paliwa w kotle ze złożem fluidalnym na parametry pracy filtra workowego*. Praca powstała w ramach realizacji projektu „Doktorat Wdrożeniowy” we współpracy z Sumitomo SHI FW Energia Polska Sp. z o.o..

Przedłożoną do recenzji rozprawę stanowi łącznie 258 stron maszynopisu, w którym 203 strony stanowi część główna ze 162 rysunkami i 21 tabelami, zaś pozostałe nieco ponad 50 stron to załączniki, spis tabel i rysunków oraz zestawienie pozycji literaturowych, a także streszczenia (po polsku i angielsku).

Zakres merytoryczny rozprawy jest aktualny obejmując zagadnienia usuwania wybranych substancji niepożądanych z gazów odlotowych ze spalania paliw stałych z wykorzystaniem filtrów workowych. Zagadnienia te dotyczą szeroko rozumianej energetyki cieplnej, a treść rozprawy ukierunkowana jest zwłaszcza na badania i ocenę wpływu różnych warunków pracy bloków energetycznych z kotłami fluidalnymi na proces usuwania zanieczyszczeń stałych i gazowych. Poruszana i analizowana w pracy tematyka

jest ważna i aktualna, przede wszystkim mając na uwadze coraz niższe dopuszczalne poziomy emisji szeroko rozumianych substancji niepożądanych do środowiska, a obowiązujące i planowane limity emisji skutkują praktyczną koniecznością zabudowy w ciągach spalinowych np. bloków energetycznych wysokosprawnych układów oczyszczania, którymi są filtry workowe, pozwalające na skuteczną i efektywną redukcję emisji zarówno pyłów, jak i – poprzez dozowanie odpowiednich reagentów – również gazów kwaśnych, takich jak np. HCl. Działania w tym zakresie są ważne zwłaszcza w odniesieniu do kotłów spalających tzw. paliwa trudne, takie jak biomasa, czy też odpady.

Uwzględniając powyższe, badania i zakres działań zrealizowanych oraz przeanalizowanych i omówionych w recenzowanej rozprawie cechuje niewątpliwie potencjał użytkowy, a dzięki realizacji kompleksowych badań na rzeczywistych obiektach przemysłowych w dużej skali technicznej uzyskane przez autorkę wyniki mogą mieć bezpośrednie zastosowanie i wykorzystanie w praktyce.

Prawdopodobnie ze względu na bardzo szeroki zakres merytoryczny prac omówionych w recenzowanej rozprawie w zamyśle Autorki konieczne było podzielenie pracy na dwanaście głównych rozdziałów – rozdziałów, które jednak w opinii recenzenta można by połączyć (np. rozdziały 5 i 6), co w konsekwencji ułatwiłoby zrozumienie i lekturę pracy.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi wstęp, w którym Autorka odniosła się krótko do kwestii limitów emisyjnych w Polsce oraz możliwości usuwania wybranych gazów kwaśnych ( $\text{SO}_2$  i HCl) ze spalin z wykorzystaniem pylistych sorbentów stałych, a także ogólnie przedstawiła technologię filtracji oraz zasadę budowy i pracy filtra workowego (worków filtracyjnych).

Sprecyzowanie przez Autorkę celu, zakresu oraz tezy pracy ma miejsce w rozdziale drugim, gdzie tezę pracy sformułowano następująco: „Istnieje wzajemna korelacja pomiędzy maksymalną wartością redukcji obu kwasowych gazów, HCl i  $\text{SO}_2$  dla danego strumienia dozowanego sorbentu. Oznacza to, że wiedząc o jaką wartość jedno z zanieczyszczeń zostało zredukowane z gazów procesowych, można na tej podstawie przewidzieć redukcję drugiego zanieczyszczenia”.

Przedstawienie czterech (wybranych) obiektów badawczych zawarto w rozdziale trzecim, zaś przyjęta metodyka pomiarowa została omówiona w rozdziale czwartym.

Wyniki pomiarów emisji wybranych zanieczyszczeń podczas dozowania sorbentów pylistych (stałych) omówiono w rozdziale piątym, zaś w rozdziale szóstym zestawiono najważniejsze wnioski z badań obiektowych. Ponadto, w rozdziale tym przedstawiono

także charakter korelacji pomiędzy redukcją kwasowych gazów, omówiono zależność pomiędzy nadmiarem stechiometrycznym, a stopniem redukcji emisji oraz dokonano oceny wpływu zastosowanego sorbentu na przebieg reakcji chemicznej usuwania wybranych substancji.

Rozdział siódmy rozprawy poświęcony jest omówieniu metodyki analizy danych dla filtrów workowych, w tym omówieniu procesu filtracji oraz parametrów warstwy filtracyjnej.

Analiza wybranych aspektów pracy filtra workowego, w tym zagadnienia oporów przepływu oraz wymogu zapewnienia równomiernego obciążenia worków filtra przedstawiona jest w rozdziale ósmym.

Rozdział dziewiąty obejmuje omówienie zagadnień z zakresu kinetyki reakcji chemicznej, bilansu masy i energii oraz analizę procesu reakcji chemicznej wiązania składników kwaśnych. Ponadto, dokonano analizy zachowania się cząstki sorbentu w procesie chemicznego wiązania oraz dokonano oszacowania głównego współczynnika szybkości reakcji chemicznej, jak również zidentyfikowano dominujące zjawisko.

Parametry kinetyki reakcji oraz analiza zachowania się ziarna sorbentu w czasie reakcji wiązania składników kwaśnych określone zostały w rozdziale dziesiątym, zaś w rozdziale jedenastym omówiono wybrane aspekty programu obliczeniowego, przygotowanego w ramach realizacji pracy i pozwalającego na dokonywanie analizy pracy układu wtrysku suchego sorbentu do kanały spalin oraz pracy systemu wtrysku sorbentu w konfiguracji z filtrem workowym.

Syntetyczne zestawienie wniosków z realizacji niniejszej pracy zawarto w rozdziale dwunastym „Podsumowanie”, po którym w manuskrypcie umieszczono trzy załączniki (A, B, C), spis tabel, rysunków i literatury, a także streszczenie w języku polskim i angielskim.

## **OCENA PRACY**

Moim zdaniem zakres merytoryczny rozprawy oraz zrealizowane w jej ramach badania są aktualne i niewątpliwie mają charakter użyteczny oraz komercyjny – zarówno w perspektywie krótko-, jak i długoterminowej, zwłaszcza, że uzyskane wyniki dotyczą badań w rzeczywistych warunkach ruchowych i prowadzono je na pracujących obiektach energetycznych o różnych konstrukcjach i spalających różne paliwa (kocioł fluidalny spalający mieszaninę węgla i biomasy, kocioł fluidalny spalający węgiel, kocioł CFB z elektrofiltrem oraz kocioł fluidalny z zabudowanym układem oczyszczania spalin z filtrem workowym).

Zdaniem recenzenta, przedstawiony zakres wykonanych na w/w obiektach prac technologicznych i inżynierskich jest bardzo szeroki, a jego przygotowanie i wykonanie wymagało od Autorki zarówno szerokiej wiedzy inżynierskiej, jak i umiejętności praktycznych oraz interpersonalnych. Wyniki tych działań wskazują niewątpliwie na zdolności Kandydatki do prowadzenia zarówno pracy naukowej, jak i do rozwiązywania problemów praktycznych na „żywych” obiektach energetycznych. Wyniki, zaprezentowane w rozprawie doktorskiej mgr inż. Natalii PAWELEC, są niewątpliwie oryginalne i stanowią praktyczny wkład do rozwoju obecnego stanu wiedzy w obszarze szeroko rozumianej energetyki i ochrony środowiska. Układ rozprawy nie budzi większych uwag, a język oraz użyte sformułowania są w przeważającej części jasne i zrozumiałe.

#### UWAGI KRYTYCZNE DO ROZPRAWY

Podczas lektury nasuwają się również pytania oraz uwagi krytyczne – zdaniem recenzenta są one jednak prawdopodobnie w znacznej mierze konsekwencją przyjętej strategii pozyskiwania oraz publikowania i praktycznego wykorzystania przez Autorkę i firmę Sumitomo SHI FW Energia Polska Sp. z o.o. wyników z badanych obiektów energetycznych. W tym ujęciu, moje główne zarzuty/uwagi dotyczą następujących kwestii:

1. W rozdz. 1.2: brak jest – choćby krótkiego – odniesienia się do charakterystycznych prędkości fluidyzacji ( $u_{mf}$  i  $u_T$ ) jako istotnych parametrów procesu; ponadto użyte w tej części pojęcie „siły grawitacyjne” jest nieprecyzyjne.
2. Moim zdaniem proces poprzecznego mieszania materiału sypkiego, paliwa i gazu w kotłach CFB jest słaby, z kolei cytowanie pracy [10] nie jest wskazane, gdyż jest nieweryfikowalne przez czytelników (publikacja wewnętrzna SHI FW).
3. Cel pracy opisany na str. 22 jest chyba różny do celu wzmiankowanego przez Autorkę na str. 11 oraz na str. 30 – proszę o wyjaśnienie.
4. Brak jest w pracy szczegółów technicznych obiektów A, B, C, D (proponuję stworzyć zestawienie ich podstawowych danych technicznych oraz głównych różnic w formie jednej tabeli). Proszę również o zestawienie parametrów paliw spalanych podczas realizacji testów na obiektach rzeczywistych (wskazana byłaby także informacja o czasie trwania prób przemysłowych oraz o obciążeniu kotłów). Jakiego typu lance stosowano do wtrysku sorbentów i jakie były średnice kanałów?
5. Z jakiego poziomu początkowego i do jakich wartości obniżono stężenie HCl oraz przy jakim udziale Ca/Cl to osiągnięto (str. 39 pracy)?

6. Podpis pod rys. 21 traktuje, że wyniki są „...wyliczone w oparciu o skład paliwa...” – brak jest jednak informacji o tym, jaki to skład? Cenne byłoby również podanie informacji o strumieniu dozowanego kamienia wapiennego, a także informacji o strumieniu spalanego paliwa, osiągniętym wskaźnikach Ca/Cl, Ca/S oraz o mocy kotła.
7. Czy czas testu rzędu 300 min (str. 71) jest wystarczający dla wymiany złoża?
8. Proszę o wyjaśnienie jak rozumieć (str. 83) fragment tekstu: „...Wartości naniesione na wykresie były wyznaczane na podstawie obliczeń, do których założono, że całe złożo znajdujące się w komorze paleniskowej ma skład zgody z ostatnio przebadaną próbką, co jednak z uwagi na częstotliwość poboru próbek paliwa (pobór co 1h) nie było możliwe (brak możliwości na całkowitą wymianę złoża)...”? Czy w ramach realizacji prób na obiekcie robiono bilans wapnia w układzie?
9. Podpisy np. pod rys. 81-82 nie w pełni odpowiadają treści.
10. W jaki sposób (str. 104) zmodyfikowano nastawy dla filtra workowego? Proszę wyjaśnić.
11. Dla jakich ilorazów Ca/Cl oraz Ca/S osiągnięto wyniki zestawione na rys. 89?
12. Dlaczego jedna z funkcji na rys. 90 wykazuje minimum? Brak jest ponadto informacji z jakiego okresu czasu pochodzą te dane? Moje uwagi dot. aproksymacji danych odnoszą się także do wyników na rys. 96-97.
13. Nie podano wyników obliczeń porowatości oraz oporu warstwy (wzmiankowanych na str. 124 – ostatni akapit).
14. Wydaje się (rys. 122), że jeden argument ma przypisane różne wartości – proszę o wyjaśnienie. Brak zaznaczenia etapów o których Autorka pisze w podpisie pod tym rys.
15. Rys. 123 – jak rozumieć należy „efektywność” procesu czyszczenia worków?
16. Deklarowana na str. 153: prędkość spalin 15 m/s wydaje się zbyt duża. Parametr „O” na str. 154 to chyba tzw. obwód zwilżony. Moim zdaniem (str. 160) zamiast wyrażenia „współczynnik przereagowania” należałoby użyć „stopień przereagowania”.
17. W dywagacjach na temat transportu masy (str. 162-163) należałoby moim zdaniem przywołać zwłaszcza prace T. Sherwooda zamiast podanych przez doktorantkę.
18. Należałoby (rozdział 11.1) podać wartości dla danych wejściowych do programu.

Ponadto, w pracy są również pewne niedociągnięcia natury stylistyczno-edycyjnej, np. dotyczące nieprecyzyjnych sformułowań, braków części jednostek w spisie oznaczeń,

braków cytowań literatury, umieszczania określeń będących bezpośrednim tłumaczeniem z języka angielskiego, itp. (np. zamiast określenia „współczynnik dyfuzji efektywnej” powinno się użyć „efektywny współczynnik dyfuzji”, zamiast „główny współczynnik szybkości reakcji” – „całkowity (sumaryczny) współczynnik reakcji”, zamiast „czas przepływu” – „czas pobytu”). Ponadto (spis oznaczeń) zamiast terminu „stężenie” proponuję używać pojęcia „koncentracja”. Inne zwroty budzące uwagi stylistyczne to wyrażenia: „zewnątrzkotłowych metod”, „pozakotłowe”, „w formie uwodnionej”, „pyłowej warstwy” oraz

str. 11: „...niniejsza praca koncentruje się...”, „...Celem pracy jest dogłębna...”,

str. 15: „...kwasowych gazów”,

str. 18: „...stosunkowo wysokie...”,

str. 23: „...usuwanie emisji zapylenia...”,

str. 26: „...matematyce numerycznej...”,

str. 83: „...stosunkowo stabilne...”,

rozdz. 1.4.4: „...wpływ cech cząstek pyłu...” – chyba powinno być „parametrów cząstek”.

## WNIOSEK KOŃCOWY

W podsumowaniu przedstawionej treści recenzji uważam, że przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Natalii PAWELEC pt. *Analiza wpływu rodzaju spalanego paliwa w kotle ze złożem fluidalnym na parametry pracy filtra workowego* zawiera elementy oryginalne, które stanowią wkład do rozwoju nauki w obszarze szeroko rozumianej zarówno inżynierii środowiska, jak i energetyki. Dodatkowo uważam, że treści merytoryczne zawarte w rozprawie cechuje perspektywa ich utylitarnego wykorzystania, co w konsekwencji skutkować powinno korzyściami naukowymi, gospodarczymi i środowiskowymi.

Reasumując, kompozycja oraz zakres merytoryczny recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalii PAWELEC spełnia moim zdaniem podstawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach i tym samym **wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony**.

Częstochowa, 2025.02.27

Podpisał Rafał Kobylecki