

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
**mgr inż. Błażeja Gaze**

pt.

**„Redukcja ilości zanieczyszczeń pochodzących z konwersji energetycznej odpadów rolniczych”**  
**„Reduction of pollution resulting from the energy conversion of agricultural waste”**

Opinia została opracowana na zlecenie prof. dr hab. inż. Krzysztofa Pulikowskiego, Przewodniczącego Dyscypliny *Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka* Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, pismo nr IDDD0000.4100.5.2021 z dnia 08.02.2021 (wpłynęło w dniu 09.02.2021).

Promotorami rozprawy doktorskiej są: prof. dr hab. inż. Leszek Romański i prof. dr hab. inż. Marek Kułazyński.

Recenzowana rozprawa doktorska została opracowana w języku polskim i obejmuje 167 stron. Na stronie tytułowej pracy podano rok wydania 2021. Praca składa się z następujących części: streszczenia w j. polskim i angielskim, wykazu oznaczeń, wprowadzenia, przeglądu literatury, opisu celu i zakresu pracy, opisu części eksperymentalnej, omówieniu wyników i dyskusji nad nimi, omówieniu wniosków, spisu literatury.

## **I. OCENA ROZPRAWY**

### **Układ rozprawy doktorskiej**

Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

1. **Wprowadzenie**, w którym Autor krótko zasygnalizował zagadnienia problemów energetycznych współczesnego świata oraz wymogów ochrony środowiska. Konkluzja jaka wynikała z tego omówienia wskazała na istotne znaczenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii bazującego na spalaniu paliw w kotłach małej mocy, wyposażonych w systemy redukcji zanieczyszczeń. To właśnie redukcja zanieczyszczeń będzie tematem dalszej części pracy.
2. **Przegląd literatury**. Rozdział ten jest obszerny i został podzielony na liczne podrozdziały. W pierwszym podrozdziale Autor opisał zagadnienia polityki energetycznej w Polsce na tle Unii Europejskiej, w tym stosunku do spalania biomasy, jej udziału i znaczenia, potencjału biomasy w Polsce oraz opisie podstawowych zagadnień spalania biomasy w kotłach małej mocy. Po tej części Autor opisał techniki spalania biomasy, jej współspalania z węglem, zgazowania i pirolizy oraz wykorzystania powstałych popiołów. Główną część rozdziału stanowią opisy emisji zanieczyszczeń powstających podczas procesów spalania biomasy, w tym wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, dioksyn, tlenku węgla, tlenków siarki, metali, pyłów zawieszonych, tlenków azotu. Jako remedium na powstające problemy autor szczegółowo opisał katalizatory, w tym podstawy katalizy, budowę katalizatorów, stosowane materiały oraz problemy eksploatacyjne z nimi związane.
3. **Cel i zakres pracy** W rozdziale tym Autor sformułował podstawowy cel pracy oraz określił szereg celów cząstkowych, w tym: wybór paliw, ich pelletowanie, budowę stanowiska badawczego, modelowanie rozkładu temperatury w komorze paleniskowej kotła oraz weryfikację jego wyników,

przygotowanie katalizatorów, pomiary i analizę składu powstałych spalin, analizę składu spalin w zależności od zastosowanej techniki redukcji zanieczyszczeń, określenie niedopału, sprawności kotła biomasowego oraz wykorzystania popiołów.

4. **Część eksperymentalna** W rozdziale tym opisano metodologię badawczą w zakresie materiałów, paliw i sposobów wykonywania pomiarów, metodologię prowadzenia symulacji numerycznych, metodykę wyznaczania sprawności kotła oraz przydatności popiołu jako elementu nawozowego.
5. **Wyniki i dyskusja** Autor omówił tu badania paliw i nośników paliw, rozkład temperatury wewnątrz kotła, badania skutków zastosowania katalizatorów i pomiary zanieczyszczeń, określenie sprawności kotła oraz parametrów popiołów.
6. **Wnioski** W rozdziale tym Autor wyszczególnił i opisał 12 wniosków dotyczących wpływu składu paliwa, możliwości aplikacyjnych materiału deflektora kotła, wyników badań temperatury wewnątrz komory kotła, wpływu katalizatorów Pt, CuO, TiO<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub> na temperaturę procesu spalania oraz na emisję CO, NO<sub>x</sub>, WWO i LZO do atmosfery, zmniejszenia straty kotłowej oraz niedopału, braku zmiany składu popiołu, atrakcyjności ekonomicznej stosowania zaproponowanego rozwiązania.
7. **Spis literatury** zawierający 193 pozycje.

Oceniam, że układ rozprawy doktorskiej jest poprawny i logiczny. Autor wydzielił wiele podpunktów w ramach każdego z rozdziałów, co nieco utrudnia ogarnięcie całości zakresu pracy w spisie treści.

### Zastosowane piśmiennictwo

Spis literatury zawiera zawierający 193 pozycje literatury obejmuje zarówno pozycje klasyczne, jak również najnowsze publikacje, głównie z renomowanych czasopism międzynarodowych z tematyki energetycznej, z czego 40 pozycji pochodzi z ostatnich 5 lat. Autor cytuje także 2 własne publikacje. Oceniam, że struktura cytowanej literatury jest poprawna i logiczna. Autor wykorzystał zarówno dobrze ugruntowaną już wiedzę z pozycji książkowych jak i wiedzę najnowszą, pochodzącą z badań z ostatnich kilku lat. W ten sposób wykazał się stylem pracy naukowej jaki aktualnie uznawany jest za pożądany. Sposób oznaczenia cytowań źródeł literatury jest poprawny i zgodny ze stylistką stosowaną w naukowej literatury technicznej.

### Cel pracy

Podstawowy cel pracy Autor sformułował następująco, jest nim: opracowanie układu katalitycznego, zbadanie i przeanalizowanie koncepcji selektywnej redukcji katalitycznej tlenków azotu w układzie komory paleniskowej kotła biomasowego małej mocy w perspektywie wymogów normy Ecodesign.

Dla realizacji postawionego celu wyznaczono szereg celów szczegółowych pracy prowadzących do osiągnięcia celu głównego:

- wybór paliw do zasilania stanowiska kotłowego,
- pelletowanie biomasy oraz określenie jej właściwości fizykochemicznych,
- wykonanie odpowiednich mieszanek pelletów,
- budowa stanowiska badawczego,
- modelowe i doświadczalne określenie rozkładu temperatury w komorze paleniskowej kotła,
- wykonanie kilku rodzajów katalizatorów z udziałem jako fazy aktywnej Pt, CuO, TiO<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub>,
- pomiary i analiza składu spalin,
- analiza wpływu rodzaju stosowanego paliwa biomasowego na emisję zanieczyszczeń,
- określenie wpływu katalizatorów na wielkość emisji: CO, NO<sub>x</sub>, PM, LZO, WWA,
- określenie wpływu dodatku mocznika,
- określenie ilości niedopału znajdującego się w popiele dennym,
- wyznaczenie rzeczywistej sprawności kotła w zależności od zastosowanego katalizatora i paliwa,



- określenie przydatności nawozowej popiołów powstałych podczas procesu spalania.

Można uznać, że cel główny pracy został sformułowany poprawnie i jest on kompatybilny z tytułem rozprawy. Cele szczegółowe pracy odpowiadają potrzebom określonym w celu głównym pracy.

### **Metody badawcze**

W pracy naukowej autor wykorzystał kilka metod, w tym na największą uwagę zasługują:

1. prowadzenia pomiarów analitycznych materiału stosowanego na deflektor w celu określenia jego chłonności i porowatości, dzięki czemu można było określić jego przydatność do wykorzystania jako nośnika katalizatorów,
2. prowadzenia analiz numerycznych, za pomocą których był w stanie określić rozkład temperatury występujący na powierzchni deflektora w zależności od wybranych parametrów procesu spalania,
3. prowadzenia pomiarów analitycznych produktów spalania w tym składu spalin oraz składu popiołu, za pomocą czego był w stanie określić sposób oddziaływania procesu spalania na środowisko,
4. prowadzenia analiz obliczeniowych, za pomocą których na podstawie zebrania danych pomiarowych z instalacji energetycznej określał sprawność procesu konwersji energii chemicznej do energii cieplnej.

Generalnie, swoją pracę naukową autor oparł na wykorzystaniu pomiarów analitycznych i badań doświadczalnych z pewnym uzupełnieniem ich modelowaniem numerycznym CFD.

### **Omówienie wyników badań**

W pracy autor kolejno omówił wyniki przeprowadzonych badań:

1. Stwierdzono wpływ rodzaju paliwa na wielkość emisji zanieczyszczeń. Wydaje się, że ten wniosek jest znany i nie wnosi nic nowego do nauki. Natomiast oczywiste jest, że autor musiał badania te przeprowadzić w celu wytworzenia własnej pomiarowej bazy odniesienia do dalszych prac.
2. Stwierdzono, że materiał stosowany do produkcji deflektorów może być nośnikiem katalizatorów nanoszonych metodą impregnacji.
3. Wyniki badań modelowych przeprowadzonych metodą CFD potwierdziły, że na powierzchni deflektora występują wymagane dla pracy katalizatorów warunki termiczne.
4. Wykazano, że zastosowanie katalizatorów wywołuje zwiększenie temperatury wewnątrz komory spalania. Największy wpływ w tym zakresie zaobserwowano przy zastosowaniu katalizatora Pt, najmniejszy dla  $TiO_2$  i  $MnO_2$ .
5. Wykazano, że zastosowanie katalizatorów wywołuje spadek emisji CO. Największy wpływ miał tu katalizator  $TiO_2$ , najmniejszy katalizator Pt.
6. Wykazano, że zastosowanie katalizatorów wywołuje redukcję ilości  $NO_x$ . Największy wpływ miał tu katalizator Pt, najmniejszy katalizator  $TiO_2$ .
7. Wykazano, że zastosowanie katalizatorów wywołuje zmniejszenie emisji pyłów zawieszonych. Największy wpływ miał tu katalizator Pt, najmniejszy katalizator  $MnO_2$ .
8. Wykazano, że zastosowanie katalizatorów wywołuje zmniejszenie emisji WWA i LZO. Największy wpływ miał tu katalizator Pt, najmniejszy katalizator  $TiO_2$ .
9. Wykazano, że zastosowanie katalizatorów wywołuje zmniejszenie straty kominowej i niecałkowitego spalania. Wszystkie zastosowane warianty katalizatorów charakteryzowały się zbliżoną efektywnością ich wpływu na zwiększenie sprawności kotła.
10. Wykazano, że zastosowanie katalizatorów wywołuje zmniejszenie ilości niedopału w popiele dennym. Wszystkie badane rozwiązania cechowała podobna efektywność działania.

11. Wykazano, że zastosowanie katalizatorów nie miało wpływu na zmianę składu chemicznego popiołów i mogą one być stosowane jako nawóz.
12. Wykazano, że zastosowanie katalizatorów jest racjonalne ekonomicznie. Okres zwrotu nakładów poniesionych na zakup katalizatora wynosi od 3 do 7 miesięcy, wobec ich żywotności technicznej ok. 5 lat. Najmniejszy czas zwrotu inwestycji występuje przy zastosowaniu katalizatora  $\text{TiO}_2$ , najdłuższy przy zastosowaniu katalizatora Pt.

W mojej ocenie obserwacje autora są trafne i zostały dobrze udokumentowane w treści rozprawy.

### **Możliwości praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań**

Na szczególną uwagę zasługują walory aplikacyjne wykonanych badań. Tematyka prowadzonych badań dotyczyła spalania biomasy w kotle EG-PELLET o mocy 15 kW, polskiej produkcji firmy Z.Ś. GREŃ. W standardowym rozwiązaniu konstrukcyjnym, w górnej części komory spalania znajduje się deflektor mający za zadanie zmienić kierunek przepływu spalin oraz ograniczyć straty ciepła z kierunku do góry. W rozwiązaniu zaproponowanym przez autora w miejscu deflektora, oprócz niego zastosować można katalizator nasączony na jego powierzchnię, dzięki czemu zmniejszy się ilość emitowanych zanieczyszczeń gazowych i pyłów, zmniejszy zawartość niedopalonego paliwa w popiele oraz wzrośnie sprawność kotła. Na podstawie uzyskanych pomiarów emisji spalin można powiedzieć, że każde z zaproponowanych rodzajów katalizatora powoduje poprawę pracy kotła. Rozwiązania te są korzystne zarówno w aspekcie energetycznym jak i środowiskowym. Przeprowadzone analizy ekonomiczne wykazały, że stosowanie katalizatora jest także opłacalne ekonomicznie i w najlepszym wypadku zwraca się już po okresie 3 miesięcy, w najgorszym zaś po 5-7 miesiącach eksploatacji kotła. Z tego powodu należy uznać, że praca autora posiada ogromny walor praktyczny.

### **Oryginalność rozwiązania problemu badawczego**

Praca badawcza autora oparta została na trzech filarach:

- procesie spalania w kotłach,
- zastosowania katalizatorów w procesach spalania,
- rodzaju i technologii wykonania katalizatorów.

Procesy spalania paliwa w kotłach są znane technicznie kilkuset lat, zastosowanie katalizatorów zaś od kilkudziesięciu lat. O ile więc każda z tych spraw osobno jest w ogólności znana i opisana została w nauce i technice, to oryginalność pracy autora polega przede wszystkim na wykonaniu badań:

- w zastosowaniu do konkretnego kotła polskiego producenta,
- w zastosowaniu do spalania typowego, lokalnie dostępnego biopaliwa (w postaci pelletu z drewna, słomy i konopi),
- zastosowaniu katalizatorów naniesionych na deflektor, który stanowi istniejący już element konstrukcyjny kotła, nie wymagając jego przebudowywania,
- zastosowaniu niskokosztowej metody produkcji katalizatora, dostępnej technologicznie dla producenta.

W tym rozumieniu, praca autora stanowi dla mnie *oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych*, co spełnia wymagania stawiane przez *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*.

### **Poziom ogólnej wiedzy kandydata**

Kandydat wykazał się dużą wiedzą literaturową w zakresie Dyscypliny *Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka* a w szczególności w zakresie paliw odnawialnych pochodzenia rolniczego i leśnego,

sposobów konwersji ich energii chemicznej do postaci cieplnej, zagadnień spalania paliw oraz ochrony środowiska, które z tego procesu wynikają.

### **Umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**

Doktorant zaprezentował cztery podstawowe umiejętności, które powinien posiadać współczesny naukowiec:

1. umiejętność zdobycia rozeznania w wybranej branży techniki poprzez wykonanie stosownych studiów literaturowych,
2. umiejętność prowadzenia analiz obliczeniowych i/lub numerycznych, za pomocą których jest w stanie określić, obliczyć lub wyznaczyć wybrane parametry procesów podlegających badaniom,
3. umiejętność zaprojektowania, zbudowania i obsługi zaawansowanego stanowiska badawczego do badań eksperymentalnych oraz przeprowadzenia na nim zaplanowanych analiz,
4. umiejętność wyciągnięcia syntetycznych wniosków z przeprowadzonych badań i zaprezentowania ich czytelnikowi opracowania.

Umiejętność przeprowadzenia studiów literaturowych autor udokumentował za pomocą 48 stron rozdz. 2 zawierającego przegląd zagadnień obejmujących podstawy polityki energetycznej, zagadnień spalania biomasy, jej udziału i znaczenia, potencjału biomasy w Polsce, współspalania z węglem, zgazowania i pirolizy, wykorzystania powstałych popiołów, emisji zanieczyszczeń powstających podczas procesów spalania biomasy, zastosowania i pozytywnego wpływu katalizatorów oraz ich zagadnień eksploatacyjnych.

Umiejętność prowadzenia analiz numerycznych autor opisał w rozdziale 4.2, gdzie wykorzystał modelowanie numeryczne CFD w programie WELSIM za pomocą którego wykonał symulacje zjawisk cieplno-przepływowych, w tym rozkładu temperatury wewnątrz kotła (model 3D wykonano w programie Solid Edge). Analizy otrzymanych wyników obliczeń opisano w rozdziale 5.3, gdzie wykazano, że w górnej części komory spalania powstają warunki korzystne do zastosowania katalizatorów.

Umiejętnością prowadzenia badań eksperymentalnych autor wykazał się w rozdziale 4.1, w którym najpierw opisał liczne stanowiska analityczne do wyznaczania parametrów paliw i gazowych produktów ich spalania, jak również otrzymywanego popiołu. W rozdziale 4.1.6 autor opisał stanowisko badawcze składające się z kotła EG-PELLET polskiej produkcji firmy Z.Ś. GREŃ wyposażonego w płaszcz wodny, podajnik ślimakowy paliwa, komorę spalania z palnikiem retortowym oraz deflektorem, na którym montowano następnie katalizatory wg koncepcji autora, otoczeniem instalacyjnym kotła oraz aparaturą kontrolno-pomiarową. Prace doświadczalne zakończyły się otrzymaniem licznych wyników pomiarowych, których metodologia obliczeniowa została opisana w rozdziale 4.5.

Umiejętność wyciągnięcia syntetycznych wniosków z przeprowadzonych badań autor udowodnił w rozdziałach 5.3.3 w zakresie rozkładu temperatury procesu spalania, rozdziale 5.5 w zakresie efektywności przygotowanych katalizatorów, rozdziale 5.5 w zakresie określenia sprawności kotła, w rozdziale 5.6 w zakresie parametrów i właściwości popiołów w rozdziale 5.7 w zakresie efektów ekonomicznych zaproponowanych rozwiązań. Szczegółowe i rozmieszczone w wielu podrozdziałach wyniki zestawiono w rozdziale 6, gdzie zostały one syntetycznie pogrupowane w 12 punktach dotyczących wpływu składu paliwa, możliwości aplikacyjnych materiału deflektora kotła, wyników badań temperatury wewnątrz komory kotła, wpływu katalizatorów na temperaturę procesu spalania oraz na emisję CO, NO<sub>x</sub>, WWA i LZO do atmosfery, zmniejszenia straty kotłowej oraz niedopału, braku zmiany składu popiołu, atrakcyjności ekonomicznej stosowania zaproponowanego rozwiązania.

### **Uwagi krytyczne**

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się następujące uwagi krytyczne:



1. Autor wykonywał swoje badania na katalizatorach świeżo naniesionych na materiał deflektora. Opisał także, że czas eksploatacji tak przygotowanych (spreparowanych) katalizatorów ocenia na okres 5 lat. Nie określono jednak jak czas eksploatacji katalizatora wpływa na jego efektywność pracy. Przykładowo, gdyby opisana efektywność poprawy parametrów pracy spadała o połowę po okresie 2 miesięcy eksploatacji wyniki analiz ekonomicznych należałoby wykonywać z uwzględnieniem zjawiska tak silnej degeneracji katalizatora.
2. Pomimo przeprowadzenia wielu pomiarów autor nie podaje zakresu niepewności pomiarowych, choć wiele z nich nie byłoby trudnych do określenia bo zostały podane przez producentów urządzeń. Uwzględnienie tych niepewności na rysunkach 42-79 mogłyby skłaniać czytelnika do zgoda innych wniosków, niestety aktualnie trudno sobie wyrobić opinię na ten temat.
3. Autor w swoich analizach i badaniach eksperymentalnych eksploatował kocioł ze stałym obciążeniem, przez co w jego wnętrzu występowało w miarę ustalone pole temperatur. Nie wiadomo jednak co byłoby w trakcie pracy kotła z obciążeniem zmiennym. Nieustalone pole temperatur mogłoby skutkować obniżeniem temperatury pracy deflektora, a co za tym idzie niepełną pracą katalizatora. Autor w pracy nie skomentował takiej sytuacji.

Powyższe uwagi krytyczne nie ujmują merytorycznej wartości pracy autora, należy je traktować jako potencjalne obszary dalszych prac badawczych.

Edytorska strona rozprawy spełnia ogólne wymogi stawiane w branży technicznej. Wnikliwe wejrzenie w zawartość pracy wykazało jednak drobne niestaranności:

1. w tekście pracy spotkać można dość liczne literówki (średnio jedna na 4 strony) wynikające z zapewne zbyt pośpiesznej edycji pracy. Nie umniejszają one wartości merytorycznej pracy.
2. Na rys. 23 zabrakło opisu części nr 6 (zapewne wylot spalin) oraz oznaczenia samego deflektora, tak istotnego przecież dla prowadzonych przez autora badań. Deflektor oznaczony został jednak na rys. 24.
3. Sposób prezentacji wyników badań pomiarowych przedstawiony na wykresach słupkowych rysunkach 42-68 i 70-79 w mojej ocenie nie jest korzystny:
  - a) autor zestawia tu ze sobą kilkanaście słupków, których barwy trudno jest w tej ilości odróżnić, przez co skorzystanie z legendy wg koloru jest nieużyteczne. Autor poprawnie zestawia ze sobą dane zachowując strukturalność podziału, tzn. grupuje po trzy dane, zestawiając wersje bez katalizatora i z katalizatorami Pt, TiO<sub>2</sub>, CuO, MnO<sub>2</sub> (np. na rys. 75 jest razem 3\*5=15 danych). Pomimo strukturalności danych, sama grafika wykresów nie oddaje jednak tej zamierzonej struktury. Lepszym wariantem byłoby przedstawianie po 3 zgrupowane słupki z komentarzem tekstowym nad każdą grupą "bez katal.", "Pt", "TiO<sub>2</sub>", "CuO", "MnO<sub>2</sub>", przy lekkim odsunięciu od siebie każdej grupy 3 słupków i przy zachowaniu tego samego układu koloru słupków w ramach grupy np. niebieski, ceglasty, zielony oznaczających odpowiednio: drewno, słoma, konopie.
  - b) prezentowanie danych na osi pionowej warto byłoby zastąpić przyrostem/spadkiem (temperatury, sprawności, emisji itp). W obecnej wersji wykresów trudno jest wzrokowo określić czy wartości przyrosły czy spadły, natomiast nie byłoby to kłopotliwe w przypadku prezentowania samego przyrostu/spadku.

## II. INFORMACJE O NIEPRAWIDŁOWOŚCIACH

W pracy nie stwierdzono nieprawidłowości merytorycznych, w tym rozumieniu pracę można uznać za poprawną.

### III. PODSUMOWANIE

Rozprawę przedłożoną do recenzji stanowi obszerna praca pisemna. Do rozprawy dołączono wymagane streszczenia w języku polskim i angielskim. Przedmiotem rozprawy jest *oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych*, w tym przypadku wykorzystanie katalizatorów w komorze spalania biomasy w kotle małej mocy. Kandydat wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną mieszczącą się tematycznie w dyscyplinie *Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka*. Sposób prowadzenia dociekań, widoczny w:

- sposobie prowadzenia analiz numerycznych i obliczeniowych,
- sposobie prowadzenia badań doświadczalnych,
- analizie otrzymanych wyników,

wskazuje na pożądaną w świecie naukowym umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

Rozprawa doktorska mgr inż. Błażeja Gaze spełnia wymagania art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (tekst jedn. Dz.U. z 2020 poz. 85 ze zm.) stanowiąc oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych, dlatego wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



