

**dr hab. inż. Tomasz CZAKIERT, prof. PCz**  
ul. Wysockiego 17 B, 42-218 Częstochowa  
tel. kom. 608 089 178

**POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA**  
Wydział Infrastruktury i Środowiska  
Instytut Zaawansowanych Technologii Energetycznych  
ul. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa  
tel. 34 3250 945, e-mail: tczakiert@is.pcz.czyst.pl

Częstochowa, 21.07.2017 r.

**Szanowny Pan**  
**Prof. dr hab. inż. Zbigniew GNUTEK**  
Dziekan  
Wydział Mechaniczno-Energetyczny  
Politechnika Wrocławska  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

## **Recenzja**

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza SZYDEŁKO**

#### **1. Wprowadzenie**

Niniejsza recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo Nr W9/PW/901/2017 z dnia 02 czerwca 2017 roku.

#### **2. Zakres rozprawy**

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Arkadiusza Szydełko nosi tytuł „Spalanie i współspalanie paliw alternatywnych”. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Wiesław Rybak. Praca została zrealizowana w ramach: grantu Preludium „Wpływ wybranych dodatków wiążących na proces współspalania paliw alternatywnych w węglem” (2013/11/N/ST8/01906) przyznanego przez Narodowe Centrum Nauki, stypendium „Przedsiębiorczy doktorant – inwestycja w innowacyjny rozwój regionu” współfinansowanego z środków Europejskiego Funduszu Społecznego Unii Europejskiej oraz projektu „Rozwój potencjału dydaktyczno-naukowego młodej kadry akademickiej Politechniki Wrocławskiej” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki. Praca otrzymała również dofinansowanie Dziekana Wydziału

Wydział Mechaniczno-Energetyczny  
26-06-2017  
Wpłynęło dnia .....  
W9/11/56

Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej w ramach przyznanej dotacji statutowej.

Praca liczy ogółem 223 strony, włączając spis literatury w ilości 202 pozycji (w tym 1 pozycję której Doktorant jest współautorem) oraz wykazy użytych skrótów i oznaczeń. Zebrany materiał rozdzielono pomiędzy 9 głównych rozdziałów, poprzedzonych wstępem i zakończonych obszernym podsumowaniem.

W krótkim wstępie Doktorant wskazuje na konieczność poszukiwania nowych alternatywnych źródeł energii, których wykorzystanie ograniczyłoby zużycie paliw kopalnych i towarzyszącej temu działaniu emisji CO<sub>2</sub>. Zasygnalizowany problem stanowi tu zarazem swego rodzaju uzasadnienie dla tematyki badań pojętej w ramach zrealizowanej pracy doktorskiej.

Rozdział 1 dysertacji jest efektem **bardzo rzetelnie przeprowadzonego krytycznego przeglądu literatury przedmiotu**. Autor patrzy tu na odpady komunalne jako na bogate źródło energii, możliwej do odzyskania w procesie ich termicznej konwersji. Jednocześnie jest jednak świadomy szeregu problemów i wyzwań z tym związanych, a możliwe rozwiązania tych kwestii dyskutowane są w dalszej doświadczalnej części pracy. Doktorant nakreśla obowiązujące uwarunkowania prawne dotyczące zasad racjonalnej gospodarki odpadami. Omawia również dostępne metody zagospodarowania odpadów komunalnych, zwracając szczególną uwagę na możliwość formowania z nich tzw. paliwa alternatywnego (SRF – Solid Recovered Fuel). Przegląd aktualnego stanu wiedzy kończy podsumowanie, w którym między wierszami znaleźć można uzasadnienie wyboru podjętej tematyki badawczej. Czytamy bowiem: „*Poziom wiedzy na temat właściwości i zachowania się SRF produkowanego z odpadów pochodzących z terenu Polski jest niewystarczający, co budzi obawy przed stosowaniem tych paliw w energetyce zawodowej*”, i dalej „*W związku z tym, że zachowanie się paliwa alternatywnego SRF podczas spalania i współspalania jest trudne do przewidzenia konieczne jest prowadzenie badań, których celem jest poznawanie właściwości SRF i mechanizmów pojawiających się podczas ich użytkowania*”. Na pochwałę zasługuje tu ponadto wyjątkowo dojrzały jak na rozprawę doktorską język, forma oraz styl wypowiedzi, które wzmacniają przekonanie o dojrzałości naukowej Doktoranta.

Postawione przez Doktoranta ambitne cele i określony bogaty zakres prac eksperymentalnych wynikają bezpośrednio z przeprowadzonego przeglądu literatury i obejmują wszystkie wrażliwe kwestie związane ze spalaniem i współspalaniem paliw alternatywnych formowanych z odpadów komunalnych. **Cele szczegółowe, zarówno poznawcze jak i utylitarne, zostały bardzo wyraźnie sprecyzowane** (Rozdział 2). Uwzględnienie w przeprowadzonej dyskusji aspektów związanych z obecnością chloru w spalinach oraz zagadnień dotyczących transformacji substancji nieorganicznej zasługuje na szczególne uznanie oraz świadczy o głębokim zrozumieniu analizowanego w pracy problemu. Jednoznacznie sformułowana teza posiada jasny przekaz, a jednocześnie koresponduje z tytułem dysertacji.

Część doświadczalną pracy otwiera rozdział 3, w którym skrupulatnie omówiono kolejne kroki realizacji pracy doktorskiej. Wszystkie działania przemyślane są w najdrobniejszym

szczegółe, a cały eksperyment zaplanowany wręcz wzorcowo. W rozdziale tym znaleźć można również przekonujące uzasadnienie dla kryteriów wyboru materiałów wykorzystanych w badaniach. Należy przy tym podkreślić, że przeprowadzenie wybranych oznaczeń i pomiarów wymagało od Doktoranta opracowania kilku autorskich stanowisk badawczych, a w przypadku oznaczenia zawartości biomasy w paliwie alternatywnym również opracowania samej procedury pomiarowej.

W rozdziale 4 zamieszczono wyniki oznaczeń wykonanych w ramach analizy technicznej i elementarnej, na podstawie których wnioskowano o przynależności badanych SRF-ów do danej grupy paliwowej. Dyskusję w tym zakresie podparto przeprowadzoną analizą statystyczną z wykorzystaniem danych pomiarowych pochodzących z innych źródeł. Następnie na podstawie wartości opałowej oraz oznaczonych zawartości chloru i rtęci Doktorant podejmuje próbę klasyfikacji badanych SRF-ów w oparciu o istniejące standardy. Dostrzega przy tym konieczność wprowadzenia dodatkowego, nieuwzględnianego dotychczas, parametru klasyfikacyjnego; mianowicie zawartości frakcji biogenicznej, dla której, z uwagi na wykazane ułomności istniejących sposobów, proponuje własną autorską metodę przeprowadzenia oznaczenia z wykorzystaniem termogravimetru.

W rozdziale 5 Autor dokonuje analizy przebiegu procesu spalania wybranych paliw alternatywnych i ich mieszanek z węglem brunatnym i kamiennym, co odbywa się w rozbiciu na etap wyzwalania części lotnych i etap dopalania pozostałego karbonizatu. Uzyskane przebiegi krzywych TG i DTG pozwalają w tym przypadku na określenie wartości podstawowych parametrów służących opisowi badanego procesu, w tym charakterystycznych temperatur i szybkości obserwowanych zmian. W dalszej części rozdziału Doktorant wykazuje związki pomiędzy tymi parametrami a właściwościami fizykochemicznymi analizowanych paliw. Ostatecznie podejmuje udaną próbę wyznaczenia parametrów kinetycznych występujących w równaniu Arrheniusa definiującym stałą szybkość reakcji, tj. energię aktywacji i współczynnik przedeksponencjalny.

W rozdziale 6 Doktorant dotyka niezwykle istotnych zagadnień związanych z bezpieczeństwem składowania, transportu i ogólnie rzecz ujmując dalszego energetycznego wykorzystania paliw alternatywnych formowanych z odpadów komunalnych. Poszukuje tu rozmaitych korelacji pozwalających wiązać wybrane parametry charakteryzujące samozapłon, zapłon i wybuchowość z właściwościami fizykochemicznymi badanych paliw. Niepełna wiedza w tym zakresie jaką obecnie dysponujemy wydaje się skądinąd być niezbędna do właściwego zaprojektowania oraz późniejszego użytkowania kolejnych elementów i urządzeń wchodzących w skład instalacji kotłowych.

Kolejny rozdział 7 poświęcono problemom związanym z obecnością chloru w procesie spalania. Z punktu widzenia realizowanego tematu badawczego, zagadnienie to nabiera szczególnego znaczenia, jako że termiczna konwersja paliw alternatywnych formowanych z odpadów komunalnych stwarza podwyższone ryzyko występowania korozji chlorkowej. W przeprowadzonych badaniach Doktorant zauważa jednak, że współspalanie osadów ściekowych z SRF pozwala ograniczyć negatywne skutki oddziaływania związków chloru, stając się jednocześnie interesującym sposobem zagospodarowania samych osadów ściekowych.

Bardzo obszerny fragment pracy (47 stron) stanowi prezentacja wyników opatrzonej solidną dyskusją w zakresie transformacji jakiej podlega w procesie spalania nietalna i niepalna substancja nieorganiczna zawarta w badanych SRF-ach formowanych z odpadów komunalnych. W swojej analizie (rozdział 8) Autor koncentruje się na składnikach i parametrach, które potencjalnie powinny decydować o temperaturach topliwości popiołu oraz tendencjach do żużlowania i popielenia powierzchni ogrzewalnych. Podobnie jak miało to miejsce wcześniej, tak i w tym przypadku, Doktorant proponuje wprowadzenie nowego wskaźnika umożliwiającego ocenę zagrożeń wynikających z powstawania fazy stopionej, który uwzględni zawartość wszystkich kluczowych tlenków popiołów powstających podczas spalania paliw alternatywnych wytwarzanych z odpadów komunalnych.

Ostatni rozdział 9 traktuje łącznie o dwóch zasadniczych normowanych zanieczyszczeniach gazowych –  $\text{NO}_x$  i  $\text{SO}_2$ . Autor prezentuje tu wyniki swoich badań, przeprowadzonych w szerokim zakresie zmienności jednego z kluczowych parametrów realizacji procesu spalania, tj. nadmiaru tlenu. Przedstawione przez Doktoranta dane w zasadzie rozwiewają wcześniejsze obawy co do podwyższonych wartości emisji  $\text{NO}_x$  i  $\text{SO}_2$  podczas współspalania paliw alternatywnych SRF tak z węglem kamiennym jak i brunatnym. W dalszych badaniach należałoby jednak przyrzeć się bardziej uważnie roli jaką może odgrywać osad ściekowy, np. przy innych udziałach w mieszance paliwowej lub w innych warunkach temperaturowych.

Rozprawę doktorską kończy trzystronicowe podsumowanie zawierające najważniejsze wnioski z przeprowadzonych w ramach zrealizowanej pracy badań eksperymentalnych.

### 3. Ocena rozprawy

Podjęty przez Doktoranta w ramach przedstawionej rozprawy temat badawczy łączy w sobie dwa niezwykle istotne zagadnienia o dużym znaczeniu praktycznym, mianowicie energetyczne wykorzystanie paliw alternatywnych wytwarzanych z odpadów komunalnych, które staje się jednocześnie sposobem na ich zagospodarowanie. Świadczy to o znajomości bieżących wyzwań i problemów, a tym samym trafności wyboru przedmiotu badań naukowych.

Przedstawioną pracę naukową w całości oceniam bardzo wysoko. Na etapie jej lektury nasuwały się jednak pewne uwagi, pytania i komentarze, które w kolejności chronologicznej zostały spisane poniżej.

1. Tabelę 1.1 dobrze byłoby uzupełnić o jednostki, by mogła funkcjonować niezależnie od poniżej zamieszczonego tekstu.
2. Przeredagowania wymaga pierwsza część drugiego akapitu na stronie 10.
3. Należałoby zweryfikować współczynniki stechiometryczne w równaniach 1.1, 1.6 i 1.7.
4. Podpis rysunku 3.1 nie do końca oddaje jego zawartość.
5. Tabelę 3.2, wiersz dotyczący emisji  $\text{NO}_x$  i  $\text{SO}_2$ , konsekwentnie należałoby uzupełnić o zastosowaną aparaturę pomiarową.

6. Obszar wykreślony dla SRF-ów mógłby zostać zawężony do wartości  $O/C \approx 0,7$ ; jednocześnie nie pokrywa się on z obszarem wyznaczonym dla makulatury, jak możemy przeczytać w tekście poniżej rysunku 4.4.
7. Udziały poszczególnych frakcji morfologicznych w badanych paliwach (SRF1 i SRF2) w Tabelach 4.9-4.10 i zbiorczej Tabeli 4.15 są różne. Należałoby zwrócić uwagę na te rozbieżności.
8. W rozdz. 5/ podrozdział 5.1, Doktorant nie analizuje „mechanizmu” spalania czy odgazowania *sensu stricto* – na co wskazywać mogłyby nadane tym rozdziałom tytuły, a jedynie ogranicza się do określenia wartości podstawowych parametrów ( $T_P$ ,  $T_{MAX}$ ,  $T_K$ ,  $R_{MAX}$ ) umożliwiających ogólny opis badanego procesu. Dlatego w tym przypadku skłaniałbym się raczej w kierunku stwierdzenia „badanie przebiegu procesu” aniżeli „badanie mechanizmu” – które w moim przekonaniu użyte jest nieco na wyrost.
9. Na rysunku 5.3 jest: „atmosfera  $O_2$ ”, a zgodnie z zamieszczonym w tekście opisem powinno być: „atmosfera powietrza”. Ponadto, graficzny obraz procedury badawczej (prędkości nagrzewania i czasy „kąpieli”) nieco różni się z jej opisem zamieszczonym poniżej rysunku.
10. Na rysunku 5.5b oraz 5.6b zaobserwować można, że spalanie pozostałości koksowej węgla kamiennego i jego mieszanek w przyjętych warunkach realizacji procesu nie dobiega do końca, co Doktorant tłumaczy ograniczeniem wynikającym z „maksymalnej temperatury ( $900^\circ C$ ) stosowania tygli ceramicznych wykorzystanych w badaniach”. W obu przypadkach widać jednocześnie, że szybkość ubytku masy w zakresie od ok.  $600^\circ C$  do  $900^\circ C$  utrzymuje się na stałym poziomie. Tym samym, pokusić się można o stwierdzenie, że zmniejszenie zadanej szybkości nagrzewania, które spowoduje wydłużenie czasu pobytu próbki, w konsekwencji powinno doprowadzić do całkowitego wypalenia karbonizatu. Czy Doktorant zgadza się z takim stwierdzeniem? – proszę o zajęcie stanowiska w tej sprawie.
11. Na stronie 89 użyto niezgrabnego sformułowania „parametry pracy technologii stopniowego spalania”.
12. Na rysunku 6.4a i 6.4b oznaczenia krzywych nie odpowiadają zamieszczonemu opisowi. Na jakiej podstawie stwierdzono zapłon mieszanki 90%wk+10%SRF1 w temperaturze  $320^\circ C$  (Rys. 6.4b), skoro oba kryteria ( $T_{warstwy} < 450^\circ C$  oraz  $T_{warstwy} - T_{płyty\ grzejelej} < 250^\circ C$ ) nie zostały w tym przypadku spełnione? – proszę o odpowiedź na to pytanie.
13. W pierwszym paragrafie na stronie 125 czytamy: „Czas opóźnienia zapłonu ( $t_{z750}$ ) paliwa alternatywnego SRF2 był natomiast 5-krotnie dłuższy niż węgla brunatnego, co spowodowało 2-krotne wydłużenie czasu opóźnienia zapłonu ( $t_{z750}$ ) mieszaniny węgla brunatnego z 5% udziałem paliwa alternatywnego SRF2 w porównaniu do wartości czasu opóźnienia zapłonu ( $t_{z750}$ ) węgla brunatnego”. Stwierdzenie to nie do końca pokrywa się z danymi zamieszczonymi w Tabeli 6.7.
14. Rysunek 7.9 i zamieszczony poniżej dwuzdaniowy komentarz wymaga uzupełnienia. Na rysunku, zgodnie z podpisem, brakuje danych uzyskanych dla czystego paliwa SRF i

czystego osadu ściekowego (być może kluczowych dla sprawy). W tekście natomiast brakuje odwołania literaturowego do przytaczanych „obserwacji Nelsona”. W końcu, zależności na które wskazuje Doktorant nie są (przynajmniej dla mnie) do końca oczywiste; czytamy mianowicie: „... osad ściekowy (...) jest zdolny do zatrzymywania chlorków w popiele ...” - na rys. 7.9 widać jednak, że zwiększenie udziału OŚ z 25% do 50% w mieszance z SRF2 oraz podobnie z 50% do 75% w mieszance z SRF1 powoduje obniżenie efektywności wiązania chlorków; i dalej: „Zastosowanie 25% OŚ pozwoliło na obniżenie poziomu emitowanych chlorków o ok. 40% ...” na rysunku efektywność wiązania wynosi ok. 20% w przypadku SRF1 i ok. 50% w przypadku SRF2 – proszę Doktoranta o wyjaśnienia w tym zakresie.

15. W Tabeli 8.3 pominięto tlenki Mn, P, Ti i Sr, do których Autor odwołuje się w dalszej analizie.
16. W podrozdziale 8.1.2 zagubiono również rysunek 8.5.
17. Nagłówki Tabel 8.4 i 8.5 nie do końca odpowiadają ich zawartości.
18. Z zamieszczonego w rozdziale 9 opisu prowadzenia badań nie do końca wiadomo jaka była temperatura realizacji eksperymentu oraz czy (poza NO) NO<sub>2</sub> był również mierzony i uwzględniony w ilości prezentowanych NO<sub>x</sub>. – tu również proszę o krótkie wyjaśnienie.
19. Autor powinien unikać przedstawiania tych samych danych w różnej formie graficznej - tabela i rysunek, co w tej rozprawie ma bardzo często miejsce.

Za kluczowe osiągnięcie Doktoranta w przedstawionej dysertacji naukowej uważam potwierdzenie zasadności oraz możliwości realizacji współspalania paliw alternatywnych wytwarzanych z odpadów komunalnych z węglem kamiennym i brunatnym, w sposób bezpieczny zarówno dla instalacji kotłowej jak i środowiska naturalnego.

#### 4. Wniosek końcowy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie bardzo ważnego problemu naukowego, jakim jest ocena zasadności oraz możliwości realizacji współspalania paliw alternatywnych wytwarzanych z odpadów komunalnych z węglem kamiennym i brunatnym, w sposób bezpieczny zarówno dla instalacji kotłowej jak i środowiska naturalnego. Jednocześnie, Doktorant wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej energetyka oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W mojej ocenie, rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania stawiane przez obowiązującą Ustawę o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki. Biorąc pod uwagę całość zrealizowanych prac oraz kluczowe osiągnięcie Doktoranta uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Arkadiusza Szydełko „Spalanie i współspalanie paliw alternatywnych” mieści się w dyscyplinie naukowej energetyka.

**W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej.**