

dr hab. inż. Jarosław KRZYWAŃSKI, prof. UJD
ul. M. Skłodowskiej-Curie 5/11, 42-217 Częstochowa
tel. kom. 693 537 236

Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy
im. Jana Długosza w Częstochowie
Wydział Matematyczno-Przyrodniczy
Instytut Techniki i Systemów Bezpieczeństwa
Zakład Zaawansowanych Metod Obliczeniowych
Al. Armii Krajowej 13/15
42-200 Częstochowa
tel. 34 3615970; e-mail: j.krzywanski@ujd.edu.pl

Częstochowa, dn. 26.06.2021 r.

Szanowny Pan
dr hab. inż. Janusz Szmidla, prof. PCz.
KIEROWNIK DYSCYPLINY NAUKOWEJ
INŻYNIERIA MECHANICZNA
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska
al. Armii Krajowej 21
42-201 Częstochowa

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Tomasza MUSIAŁA

**pt. „Badania eksperymentalne właściwości cieplnych
i strukturalnych paliw stałych podczas spalania tlenowego”**

Wprowadzenie

Technologia spalania tlenowego, szczególnie w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej, należy do technologii pro-CCS (ang. carbon capture and storage). Zastąpienie powietrza, doprowadzonego do procesu spalania, mieszkanką dwutlenku węgla powoduje, że skład spalin stanowi głównie CO₂ z pewnym udziałem pary wodnej, tlenu, tlenków siarki, azotu oraz innych związków występujących w ilościach śladowych. Tak więc spaliny opuszczające komorę paleniskową po doczyszczeniu, mogą być bezpośrednio poddane geologicznej sekwestracji lub wtórnie zagospodarowane.

Ta metoda spalania cechuje się jak widać znaczącym potencjałem ograniczenia ilości emitowanego do atmosfery CO₂ z kotłów energetycznych, przy jednocześnie dobrze opanowanych technikach redukcji emisji NO_x i SO₂. Posiadając status tzw. technologii zeroemisyjnej, spalanie tlenowe pozwala na konwersję paliw przy zerowej emisji CO₂ do atmosfery.

Z uwagi na fakt, iż w wyniku dynamicznego rozwoju spalanie tlenowe osiągnęło już swą pełną dojrzałość technologiczną, umożliwiającą jego szerokie wykorzystanie w skali przemysłowej, należy ono do procesów o dużym potencjale aplikacyjnym.

Dalsze badania, w tym badania modelowe, nakierowane na realizację zadań optymalizacyjnych są niezbędne, aby sprostać rosnącym wymaganiom w zakresie ochrony środowiska.

Rozwijanie technik modelowania i optymalizacji nie jest jednak w pełni możliwe bez wsparcia danymi i opisem właściwości cieplnych oraz strukturalnych stosowanych paliw węglowych.

Niniejsza praca jest próbą sprostania tym potrzebom, wpisując się w tę nowoczesną i interesującą problematykę. Biorąc powyższe pod uwagę a przede wszystkim fakt ograniczonej, niewystarczającej liczby opracowań naukowych w tym zakresie, tematykę pracy doktorskiej mgr inż. Tomasza Musiała należy uznać za ważną z punktu widzenia poznawczego, ale też użytecznego.

Zakres rozprawy

Przedłożona do oceny praca doktorska mgr inż. Tomasza Musiała nosi tytuł „Badania eksperymentalne właściwości cieplnych i strukturalnych paliw stałych podczas spalania tlenowego”. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Andrzej Bogusławski, promotorem pomocniczym: dr inż. Monika Kosowska-Golachowska. Praca została zrealizowana w ramach projektu „Badania ewolucji własności cieplnych i strukturalnych paliw stałych w procesie spalania nr 4579/T02/2011/40, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Praca obejmuje łącznie 135 strony, na które składa się 5 rozdziałów, spis literatury w ilości 107 pozycji (w tym 3 pozycje, których Doktorant jest współautorem), oświadczenie oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

W rozdziale 1-szym, stanowiącym wstęp, Autor krótko wprowadza czytelnika w problematykę spalania tlenowego i uzasadnia podjęcie tematu. Podkreśla, że

spalanie tlenowe, stanowi obiecującą technologię spalania paliw stałych, należąca do tzw. czystych technologii węglowych.

Rozdział 2 stanowi przegląd literatury. Zamieszczono w nim bogaty materiał, dotyczący technologii spalania tlenowego, właściwości fizykochemicznych, cieplnych i strukturalnych paliw stałych, współczynnika przewodzenia ciepła, dyfuzyjności cieplnej oraz pojemności cieplnej właściwej.

Cel i zakres pracy Doktorant zawarł w rozdziale 3. Jak wcześniej zaznaczono, brak publikacji w literaturze specjalistycznej w obszarze tematycznym objętym pracą, na temat zmian właściwości cieplnych i strukturalnych polskich węgla podczas spalania tlenowego, jak również wyznaczenie własności cieplnych paliw stałych przy użyciu nowoczesnej metody Laser Flash, stały się inspiracją do podjęcia badań przedstawionych w pracy. Dla tak postawionego celu głównego pracy, sformułowano cele szczegółowe oraz zakres pracy.

W rozdziale 4, zatytułowanym „Badania eksperymentalne” Autor przedstawił charakterystykę analizowanych paliw, badania procesu spalania paliw w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej oraz pomiary właściwości cieplnych paliw stałych metodą Laser Flash. Zakresem analiz objęto węgiel brunatny z KWB Turów, węgiel kamienny z KWK Sobieski, typ 31.2, węgiel kamienny z KWK Ziemowit, typ 31.2 oraz antracyt.

Pracę zamyka rozdział 5 zawierający wnioski końcowe, korespondujące z postawionym celem i zakresem pracy.

Ocena rozprawy

1. Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest interesująca i ważna. Wpisuje się w najnowsze światowe trendy badawcze. Praca podzielona jest na logicznie rozdziały, wynikające z jej układu.
2. Przeprowadzone badania są wartościowe nie tylko z punktu poznawczego, ale też ze względów użytkowych. Uzyskane unikatowe wyniki badań mogą zostać wykorzystane w zagadnieniach modelowania procesów spalania i wymiany ciepła, zachodzących w kotłach energetycznych podczas spalania polskich paliw węglowych, w atmosferach powietrznych i tlenowych, w warunkach cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej.

Na uwagę zasługuje dodatkowo fakt, iż opracowanie wyników wymagało od Autora dobrego opanowania zagadnień teoretycznych i praktycznych,

związanych zarówno z techniką pomiarową, jak i wykorzystaniem możliwości nowoczesnej aparatury pomiarowej LFA 475 firmy Netzsch-

3. Bogaty materiał zgromadzony, zestawiony i omówiony w przeglądzie literaturowym stanowi dodatkową cenną wartość pracy, również przyczyniając się do podniesienia jej walorów aplikacyjnych.

Uwagi krytyczne i dyskusyjne

- Omawiając strukturę źródeł energii, wykorzystywanych w produkcji energii elektrycznej (str. 8), Autor powołał się na dane literaturowe z 2005 r ([9]) i 2012 ([10]). Należałoby w tym miejscu odnieść się do bieżących statystyk. Proszę o wyjaśnienie, jakie miejsce wśród innych źródeł energii zajmuje obecnie węgiel w światowej produkcji energii elektrycznej.
- Na str. 26 Autor pisze: „Wraz ze wzrostem koncentracji CO₂ zauważono wzrost stężenia SO₂ przy podawaniu kamienia wapiennego w takich ilościach jak podczas spalania w powietrzu. Stężenie NO_x nieznacznie malało podczas spalania tlenowego, natomiast CO wzrastało pięciokrotnie.” Zabrakło w tym miejscu paru zdań komentarza i wyjaśnienia charakterystycznych dla spalania tlenowego w atmosferach O₂/CO₂ złożonych mechanizmów związanych z odsiarczaniem spalin. Na skutek bowiem podwyższonego ciśnienia cząstkowego CO₂ nie zachodzi proces kalcynacji. Wiązanie siarki paliwowej przebiega bezpośrednio z pominięciem etapu termicznej dekompozycji kamienia wapiennego. Jednocześnie podwyższone stężenia CO powodują częściową dekompozycję powstającego CaSO₄ z wydzieleniem CO₂ i SO₂, [T. Czakiert, Tlenowe spalanie węgla w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2013] co zauważono w treści w pracy.
- W pracy zabrakło spisu oznaczeń,
- Część rysunków została zaczerpnięta bezpośrednio z cytowanych prac, przez co ich format miejscami nie jest spójny.
- Na str. 54 Autor pisze: „Wyższa zawartość wilgoci w próbce wykonanej z modrzewia powodowała wzrost wartości współczynnika przewodzenia ciepła w każdej temperaturze, co widoczne jest na rysunku 2.38. Natomiast wzrost temperatury pomiaru wilgotnych próbek powodował liniowy wzrost wartości

współczynnika przewodzenia ciepła.”, co nie odpowiada krzywym pokazanym na rys. 2.3 (str. 55).

- Nie sposób też zgodzić się z zapisem ze str. 56 dotyczącym „Jak można zauważyć na rysunku 2.39 oraz w tabelach 2.15 i 2.16, większa porowatość oraz gęstość drewna powodowała wzrost współczynnika przewodzenia ciepła”, w zakresie dotyczącym porowatości podanych w ww. tabelach.
- Analizując wyniki pomiarów porowatości paliw stałych z tabeli 4.2, na str. 77, Autor pisze: „Można zauważyć, iż węgiel brunatny posiadał najwyższe wartości porowatości całkowitej, objętości właściwej porów oraz powierzchni właściwej porów.” Tymczasem szczegółowa analiza danych w tabeli 4.2 wykazuje, że najwyższą powierzchnią właściwą porów cechuje się węgiel kamienny Sobieski 31.2.
- Na str. 78, z pewnością błędnie podano atmosferę 60%O₂/40%CO₂ zamiast 40%O₂/60%CO₂.
- Tytuł podrozdziału 4.2: „Badania procesu spalania tlenowego paliw stałych w powietrzu oraz w mieszaninach O₂/CO₂ w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej” jest niefortunny; nie mamy spalania tlenowego w powietrzu.
Lepszym rozwiązaniem byłoby następujące jego brzmienie:
„Badania procesu spalania paliw stałych w powietrzu oraz w mieszaninach O₂/CO₂ w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej”.
- Interpretując czasy spalania części lotnych, na str. 86 Autor zapisał: „Nie licząc antracytu, węgiel kamienny z kopalni Sobieski posiadał najniższą zawartość części lotnych, przez co obserwowano najkrótsze czasy spalania części lotnych dla tego paliwa.”
Tymczasem, z analizy danych w tabeli na str.76 wynika, że najniższą zawartością części lotnych, poza antracytem, cechuje się węgiel kamienny z kopalni Ziemowit.

Uwagi szczegółowe

- Na rysunku 2.44 (str. 63) brakuje legendy.
- Strona 86, jest: „Na wykresach 4.12÷2.15”, powinno być: „Na wykresach 4.12÷2.14”,
- Na stronie 90 jest:

„Niższa temperatura maksymalna powierzchni 1050°C utrzymywała się dłużej do niemal 500 s procesu, natomiast środek próbki nie przekroczył temperatury 1000°C”,

powinno być:

„Niższa temperatura maksymalna środka 1050°C utrzymywała się dłużej do niemal 500 s procesu, natomiast powierzchnia próbki nie przekroczyła temperatury 1000°C.

- Na str. 93 Autor pisze; „W wyższych koncentracjach tlenu tj. 30 i 40% w trakcie odgazowania, ziarna przechodziły przez fazę mięknięcia wykazując przy tym właściwości plastyczne po czym ulegały zastygnięciu, co można zaobserwować na zdjęciach: Ziemowit 60s, Ziemowit 30s”. Nie przywołano tu numeru rysunku.
- Na wykresach z rysunków 4.30 – 4.33, 4.36 – 4.40, 4.43 – 4.46 powinny być użyte różne znaczniki, przede wszystkim dla rozróżnienia poszczególnych rodzajów węgla kamiennego.
- Na rys. 4.44 w legendzie należałoby zastosować ten sam format cytowania źródeł jak w całej pracy, tj. w nawiasie kwadratowym, zamiast za pomocą odnośników.
- str. 55, Tabela 2.16, jest E powinno być ϵ ,
- str. 68 jest: „na rys. 2.53”, powinno być „na rys. 2.49”.

Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Tomasza Musiała pt.: „pt. „Badania eksperymentalne właściwości cieplnych i strukturalnych paliw stałych podczas spalania tlenowego” zawiera sformułowanie ważnych zadań badawczych, ich rozwiązanie i dyskusję wyników.

Za kluczowe osiągnięcie Doktoranta, przedstawione w recenzowanej dysertacji uważam zbadanie własności cieplnych i strukturalnych analizowanych polskich węgli. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną a praca stanowi przemyślaną całość. Zaprezentowane w pracy dane posiadają duży potencjał aplikacyjny, a omawianą tematykę cechuje aktualność i zgodność z najnowszymi trendami w nauce.

W opinii końcowej chcę także podkreślić złożoność badanych zjawisk oraz związaną z tym konieczność przeprowadzenia żmudnych i pracochłonnych badań eksperymentalnych.

Uważam, że opiniowana praca mgr inż. Tomasza Musiała spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach i zasługuje na pozytywną opinię.

Wobec powyższego stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a central horizontal stroke, positioned in the lower right quadrant of the page.