

Prof. dr hab. inż. Jan Taler  
Politechnika Krakowska  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Katedra Energetyki  
ul. Warszawska 24  
31-155 Kraków  
Tel: 605 852 997  
e-mail: jtaler@pk.edu.pl

Kraków, 10.08.2021 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Musiała  
pt. „Badania eksperymentalne właściwości cieplnych i strukturalnych paliw  
stałych podczas spalania tlenowego“**

Recenzowana rozprawa o objętości 134 strony napisana jest w języku polskim. Składa się z pięciu rozdziałów oraz spisu literatury cytowanej zawierającego 107 pozycji literaturowych. Na początku rozprawy znajdują się jej streszczenia w języku polskim i angielskim oraz spis treści.

Tematyka pracy obejmuje badania eksperymentalne procesu spalania tlenowego różnych rodzajów węgla. Proces spalania przeprowadzono w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej w powietrzu oraz mieszaninach  $O_2/CO_2$  o różnych udziałach tlenu. Przedmiotem rozprawy jest także analiza właściwości cieplnych i strukturalnych paliw stałych: węgla brunatnego z kopalni Turów, węgla kamiennego z kopalni Sobieski oraz kopalni Ziemowit oraz antracytu. Wykonano pomiary właściwości termofizycznych różnych węgli analizując przebieg temperatury w próbce przy jej impulsowym nagrzewaniu laserem (z ang. Laser Flash Method).

Tematyka rozprawy jest ważna i aktualna i może stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej. Recenzowana rozprawa ma duże znaczenie praktyczne.

### **1. Charakterystyka rozprawy**

Pierwszym rozdziałem rozprawy jest wprowadzenie, w którym to autor podkreśla, że jedną z perspektywicznych technologii jest spalanie węgla w atmosferze tlenu. Technologia spalania w tlenie w połączeniu z wychwytem i składowaniem  $CO_2$  umożliwia łatwą eliminację dwutlenku węgla i tlenków azotu ( $NO_x$ ) ze spalin wylotowych z kotła. Istniejące kotły fluidalne można dostosować do spalania tlenowego poprzez dobudowanie tlenowni, układu recyrkulacji

spalin oraz instalacji do oczyszczania i sprężania dwutlenku węgla. Następnie oczyszczony dwutlenek węgla przesyłany jest do miejsc jego składowania. Budowa wymienionych wyżej dodatkowych instalacji oraz ich eksploatacja przyczynią się jednak do znacznego podwyższenia kosztów wytwarzania 1MWh energii elektrycznej. W dalszej części pierwszego rozdziału Kandydat uzasadnia celowość podjęcia w ramach pracy doktorskiej badań zmian właściwości cieplnych i strukturalnych polskich węgli podczas spalania tlenowego.

Przedmiotem rozdziału drugiego jest przegląd literatury. Rozdział ten o objętości 67 stron jest najobszerniejszy w całej rozprawie. Literaturę cytowaną w rozprawie omówiono szczegółowo w następujących podrozdziałach:

- Technologia spalania tlenowego paliw stałych oraz technologia spalania w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej.
- Właściwości fizykochemiczne, cieplne i strukturalne paliw stałych.
- Współczynnik przewodzenia ciepła obejmujący następujące podrozdziały: metoda pomiaru, metoda sondy cieplnej, metoda impulsowa, metoda gorącej płyty, metoda nieustalonego płaskiego źródła (z ang. Transient plane source method), metoda optyczna (z ang. Optical scanning), dyfuzyjność cieplna oraz pojemność cieplna właściwa.

Kandydat szczegółowo omówił poszczególne pozycje literaturowe, przedstawiając wybrane wyniki badań z niektórych publikacji. Przeanalizował również wady i zalety różnych metod służących do eksperymentalnego wyznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła, dyfuzyjności cieplnej (współczynnika wyrównywania temperatury) oraz ciepła właściwego oceniając ich przydatność do pomiaru właściwości cieplnych węgla.

Cel i zakres pracy przedstawiony został w rozdziale trzecim. Głównym celem rozprawy było eksperymentalne wyznaczenie właściwości cieplnych i strukturalnych polskich wybranych węgli kamiennych, węgla brunatnego oraz antracytu podczas spalania tlenowego. Właściwości cieplne węgli wyznaczone zostały w szerokim przedziale temperatury od 25 do 1000 °C za pomocą nowoczesnej metody impulsu laserowego (Laser Flash Method). Ważnym celem rozprawy jaki postawił sobie Kandydat było eksperymentalne określenie wpływu koncentracji tlenu na proces spalania wytypowanych paliw węglowych w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej.

Badania eksperymentalne stanowią przedmiot rozdziału czwartego. Jest to duży rozdział o objętości 50 stron. W paragrafie 4.1 przedstawiono charakterystyki badanych węgli, w tym: analizę techniczną oraz elementarną, analizę porozymetryczną, analizy struktury powierzchniowej paliw stałych za pomocą mikroskopii elektronowej skaningowej (SEM).

Metodyka pomiarów omówiona została w paragrafie 4.2.2. Analiza wyników badań przeprowadzona została w paragrafie 4.2.3. Ewolucja struktury powierzchniowej paliw węglowych podczas ich spalania w cyrkulującej warstwie fluidalnej w powietrzu oraz mieszaninach tlenu i dwutlenku węgla o różnych składach omówiona została szczegółowo w paragrafie 4.2.4. Pomiary właściwości cieplnych paliw stałych metodą impulsu laserowego (Laser Flash Method) przedstawione zostały w paragrafie 4.3. Aparaturę badawczą oraz metodykę pomiarów omówiono w podpunkcie 4.3.1. Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia pomiarowego LFA 457 firmy Netzsch na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki AGH w Krakowie. Próbkę do badań węgla przygotowane zostały w Katedrze Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej. Pomiary dyfuzyjności cieplnej (współczynnika wyrównywania temperatury), współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego przeprowadzono w przedziale temperatury od 25 do 1000 °C. Zakresy pomiarowe dyfuzyjności cieplnej: 0,01-1000 mm<sup>2</sup>/s oraz współczynnika przewodzenia ciepła: 0,1-2000 W/(m·K) w urządzeniu LFA 457 są bardzo szerokie i umożliwiły wyznaczenie właściwości cieplnych badanych węgli z dużą dokładnością.

Ostatni rozdział pracy stanowią wnioski.

## **2. Charakterystyka najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych przedstawionych w rozprawie**

Ważnym osiągnięciem naukowym mgr inż. Tomasza Musiała jest eksperymentalne wyznaczenie właściwości cieplnych węgli kamiennych z KWK Sobieski i KWK Ziemowit, węgla brunatnego z KWB Turów oraz antracytu. Wyznaczone zostały trzy podstawowe właściwości cieplne: współczynnik przewodzenia ciepła, dyfuzyjność cieplna oraz ciepło właściwe w szerokim zakresie temperatur od 25 do 1000 °C. Kandydat stwierdził, że dyfuzyjność cieplna, współczynnik przewodzenia ciepła oraz ciepło właściwe wzrastają wraz z temperaturą. Szczególnie duży jest względny wzrost współczynnika przewodzenia ciepła wraz z temperaturą. Współczynnik przewodzenia ciepła oraz dyfuzyjność cieplna zwiększają się wraz ze wzrostem udziału węgla pierwiastkowego w węglu oraz gęstości paliwa. Wzrost zawartości części lotnych i popiołu w paliwie oraz wzrost jego porowatości całkowitej przyczyniają się do zmniejszania współczynnika przewodzenia ciepła i dyfuzyjności cieplnej.

Wyniki pomiarów przedstawione w rozprawie mają bardzo duże znaczenie praktyczne, gdyż umożliwią modelowanie procesów cieplnych i spalania węgla z większą dokładnością. Dotychczas brak było właściwości termofizycznych polskich węgli w tak dużym zakresie zmian temperatury.

Znaczącym osiągnięciem Kandydata jest przeprowadzenie pomiarów temperatury środka i powierzchni ziaren węgla oraz pomiary czasu zapłonu, czasu spalania części lotnych, czasu spalania karbonizatu oraz całkowitego czasu spalania ziarna.

Do ważnych osiągnięć Kandydata należy wykonanie jakościowej oceny zmian mikrostruktury powierzchniowej oraz ilościowej oceny zmian struktury wewnętrznej podczas konwencjonalnego spalania ziaren węgla oraz podczas spalania w cyrkulującym złożu fluidalnym. Dzięki temu można było prześledzić zmiany zachodzące na powierzchni i wewnątrz ziarna podczas spalania tlenowego. Największe przemiany zachodziły w czasie spalania części lotnych, co spowodowane było uplastycznieniem części bitumicznych. Ważnymi osiągnięciami naukowo-badawczymi Kandydata w zakresie spalania różnych węgla są następujące odkrycia:

- w mieszaninie o składzie 21%O<sub>2</sub>/79%CO<sub>2</sub> zarejestrowano niższe temperatury środka i powierzchni ziarna podczas procesu spalania oraz najdłuższe czasy: zapłonu, spalania części lotnych oraz całkowitego czasu spalania wszystkich badanych węgla w porównaniu ze spalaniem węgla w mieszaninach o większym udziale tlenu,
- spalanie w atmosferze o udziale tlenu powyżej 30% skutkuje większą porowatością całkowitą wszystkich spalanych paliw węglowych; etap spalania części lotnych miał największy wpływ na wzrost porowatości badanych próbek oraz na wzrost objętości porów,
- podwyższanie koncentracji tlenu w mieszaninie utleniającej podczas spalania tlenowego intensyfikuje proces spalania węgla i powoduje wzrost temperatury w środku i na powierzchni ziarna.

### **3. Uwagi krytyczne**

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Musiała ma charakter eksperymentalny. Brak jest porównania wyników pomiarów z wynikami modelowania matematycznego spalania ziarna węgla, własnymi lub zaczerpniętymi z literatury. Zwiększyłyby to wiarygodność przeprowadzonych pomiarów spalania ziaren różnych paliw węglowych.

### **4. Wniosek końcowy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Musiała spełnia wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Na szczególne podkreślenie zasługuje szeroki zakres przeprowadzonych badań eksperymentalnych spalania ziaren antracytu i węgla kamiennego

z różnych kopalń oraz wyznaczenie właściwości termofizycznych polskich węgli w szerokim przedziale temperatury od 25°C do 1000°C. Z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Tomasza Musiała do publicznej obrony swojej rozprawy i o nadanie mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

J. Taler