

RECENZJA

pracy doktorskiej mgra inż. Konrada Babula

„Zapłon pyłu węglowego i paliw alternatywnych w atmosferze wzbogaconej w tlen”

1. Podstawa realizacji recenzji

Niniejszą recenzję opracowałem na podstawie pisma Dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej nr W9/PW/554/2018 z dnia 26 marca br. informującego o powołaniu mnie, na podstawie uchwały Rady Wydziału z dnia 21 marca br., na recenzenta rozprawy doktorskiej mgra inż. Konrada Babula.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa została wykonana na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej w Katedrze Technologii Energetycznych, Turbin i Modelowania Procesów Ciepłno-Przepływowych pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Wiesława Rybaka.

Rozprawa podejmuje tematykę zapłonu mieszanek pyłowych w modyfikowanej atmosferze utleniającej wykorzystywanej w technologii oxy-fuel. Technologia ta stosowana jest komercyjnie w przemyśle stalowniczym do spalania paliwa gazowego, była również - i jest nadal - przedmiotem badań z wykorzystaniem sproszkowanych paliw stałych, niemniej jednak nie doszło do jej komercyjnego zastosowania w dużej skali. Znane są wyniki badań spalania w technologii oxy-fuel w skali laboratoryjnej a także w skali 0,3-3,0 MWt [Scheffknecht i in.: Oxy-fuel coal combustion—A review of the current state-of-the-art. International Journal of Greenhouse Gas Control, 5(1), 2011], nie znalazły one jednak przełożenia na projekty w dużej skali, których kilka w ostatnich latach w sposób spektakularny odwołano (np. w 2015 r. blok 426 MWel w elektrowni Drax w Wielkiej Brytanii). Powodem porzucenia planów inwestycyjnych jest, obok zmniejszającego się strumienia dotacji dla ogólnie rozumianych instalacji CCS, niska rentowność inwestycji przy nieznanych przyszłych cenach uprawnień do emisji CO₂.

Badania oxy-fuel przeprowadzone do tej pory koncentrowały się głównie na wpływie atmosfery wzbogaconej w tlen na czas i stopień wypalenia paliwa, wydzielanie części lotnych, wskazywano również na wpływ warunków oxy na zapłon paliwa i jego możliwe opóźnienie. Badania te absolutnie nie wyczerpały wszystkich aspektów związanych z tą techniką. Jako niezidentyfikowane braki w

wiedzy wskazuje się np. zachowanie korozyjne materiałów w atmosferze modyfikowanej, a w zakresie bliższym recenzowanej pracy – weryfikację konstrukcji palników pyłowych, zachowanie się pierwiastków i związków śladowych oraz budowę modeli obliczeniowych, w tym modeli zapłonu. Autor jest świadomy stanu wiedzy w zakresie spalania i zapłonu paliw w atmosferach wzbogaconych w tlen i w rozdziale 3 rzetelnie, interesująco i wyczerpująco przedstawia wyniki badań w tym zakresie wskazując równocześnie na niejednoznaczności i braki, które legły u podstaw decyzji o podjęciu tematyki rozprawy doktorskiej.

W konsekwencji w rozprawie Autor skupia się więc na owych brakach w stanie wiedzy formułując następującą, dosyć ogólną tezę: „zmiana atmosfery powietrza na atmosferę wzbogaconą w tlen (O_2/CO_2) ma wpływ na zapłon i stabilność płomienia pyłowego”. W tym celu poddaje analizie takie zjawiska jak wpływ zmiany atmosfery na zapłon mieszanki paliwo/utleniacz, zmianę rozkładu temperatury w płomieniu, szybkość propagacji płomienia, temperaturę adiabatyczną spalania, liczbę wiru, strumień pędu mieszaniny gazów, itp. w wyniku zastąpienia N_2 przez O_2/CO_2 .

Tytuł rozprawy dobrze oddaje zawartość pracy.

Praca jest obszerna zarówno w części opisowej (przegląd literatury i opis stanu wiedzy), jak i w części eksperymentalnej, niemniej jednak jest spójna, zwięzła i brak w niej często spotykanych w pracach doktorskich rozwlekłych rozdziałów opisowych.

W pracy przedstawiono spis ważniejszych oznaczeń, a spis literatury jest bardzo szeroki.

3. Szczegółowe omówienie pracy

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 201 stron, składa się z 11 rozdziałów i zawiera wykaz literatury składający się ze 250 pozycji.

Praca podzielona jest na wstęp literaturowy, część eksperymentalną w małej skali, część eksperymentalną w dużej skali oraz część obliczeniową, a także podsumowanie i dyskusję.

W rozdziałach 1 – 3 tworzących część opisową, zamieszczono obszerny wstęp literaturowy dobrze wprowadzający czytelnika w problem zapłonu paliw stałych w mieszaninach paliwo/powietrze oraz w atmosferach modyfikowanych. Ponadto zamieszczono obszerne porównanie metodyki pomiarowej stosowanej dotychczas do pomiaru zapłonu paliw stałych.

W rozdziale 4 jasno przedstawiono tezę i cele badawcze, a także metodykę oraz program badań podzielony na 3 etapy, tak aby uzyskać konkretne wyniki eksperymentalne i wyciągnąć wnioski końcowe.

Rozdział 5 zawiera analizę właściwości badanych paliw i atmosfery utleniającej w technologii oxy-fuel. Autor analizuje szerokie spektrum paliw obejmujące węgle kamienne, brunatne, jeden węgiel

antracytowy oraz kilka popularnych biomas, takich jak zrębki i pelety drzewne a także słoma pszenna i żytnia. Wybór paliw do badań należy uznać za w pełni zasadny, ze względu na ich szerokie wykorzystanie w przemyśle. W rozdziale tym Autor analizuje także wpływ stężenia tlenu w technologii oxy-fuel na wartość adiabatycznej temperatury spalania oraz opisuje opracowany przez siebie model bilansu masowego substratów i produktów spalania paliw stałych w technologii oxy-fuel. Modelowanie służy głównie do oszacowania wymaganego stężenia tlenu dla spalania w atmosferze modyfikowanej dla konkretnego paliwa na podstawie założenia równości adiabatycznej temperatury spalania w atmosferze powietrza i w warunkach oxy-fuel. Powyższą równość należy uznać za uzasadnione kryterium prowadzenia procesu oxy-fuel, tak aby nie zaburzyć procesów wymiany ciepła. Autor zauważa, że dla zapłonu paliwa w atmosferze modyfikowanej istotny jest nie tylko udział recyrkulowanych spalin, ale i ich temperatura oraz warunki mieszania ze świeżym strumieniem tlenu.

W rozdziałach 6 i 7 Autor analizuje zapłon pojedynczej cząstki w warunkach oxy-fuel. W tym celu badaniom na stanowisku pieca opadowego poddaje „monofrakcje” rozdrobnionych (sproszkowanych) paliw uzyskane z sit 90-100 μm . Można zauważyć duże doświadczenie Doktoranta w prowadzeniu badań eksperymentalnych wyrażające się np. w przeprowadzaniu prób zerowych w atmosferze inertej w celu sprawdzenia szczelności komory reakcyjnej. Uzyskanie szczelności jest szczególnie istotne dla badań spalania w atmosferze modyfikowanej. Niestety, ze względu na rozmiary stanowiska obserwowano zachowanie cząstek w czasie ok. 300 ms co dalekie jest od czasów przebywania cząstek w pyłowych komorach spalania i być może miało również wpływ na wybór tej a nie innej monofrakcji paliwa. Niemniej jednak skutecznie wyznaczono wartości minimalnych temperatur zapłonu dla wszystkich wytypowanych do badań paliw oraz dla stężeń tlenu w zakresie od 15 do 40% w atmosferze O_2/CO_2 . Uzyskane wyniki odpowiadają podobnym badaniom przeprowadzonym w innych ośrodkach. Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdzają tezę pracy – zamiana N_2 na CO_2 w atmosferze utleniającej prowadzi do wzrostu (zmiany) minimalnej temperatury zapłonu co można skompensować wzbogaceniem atmosfery w tlen, tak aby uzyskać zbliżone do spalania w powietrzu warunki zapłonu.

Rozdziały 8 i 9 w całości dotyczą badań eksperymentalnych odpowiednio czasu zapłonu chmury pyłowej i prędkości propagacji płomienia mieszanki pyłowo-gazowej. Odnosi się wrażenie, że w obu przypadkach Autor posłużył się stanowiskami laboratoryjnymi, do których miał dostęp, poprawnie i skutecznie wykorzystał je do badań związanych ze spalaniem w atmosferze modyfikowanej, lecz ani nie projektował procedur badawczych, ani ich nie modyfikował. W konsekwencji uzyskał oczekiwane, poprawne wyniki, których jednak nie analizuje zbyt głęboko i traktuje je skrótowo.

Zupełnie inaczej Autor podszedł do badań stabilności zapłonu i propagacji płomienia pyłowego na udostępnionym mu (BTU Cottbus) stanowisku z palnikiem wirowym o mocy 400 kWt a przedstawionych w rozdziale 10. Dostęp do stanowiska w takiej skali to rzadkość przy czym unikalną cechą stanowiska jest jego przystosowanie do badań palników dedykowanych technologii oxy-fuel. W

szczegółności stanowisko umożliwia określenie metodami optycznymi długości płomienia pyłowego dla zmiennych cech geometrycznych badanego palnika, takich jak kąt ustawienia łopatek zawirowywacza lub procesowych, takich jak rozdział powietrza wtórnego czy wartość współczynnika nadmiaru powietrza. Nie jest jasne dlaczego w przedstawionych badaniach przy użyciu stanowiska o mocy 400 kWt ograniczono się do konwencjonalnego spalania powietrznego. Autor szczegółowo poddaje ocenie kryterialnej wzajemną interakcję pomiędzy parametrami pracy palnika wirowego a długością płomienia, niemniej jednak czyni tak dla spalania w powietrzu. Dopiero w podrozdziale 10.5.3.4 Autor analizuje wpływ własności mieszaniny gazów O_2/CO_2 na dynamikę przepływu przez palnik wirowy. Tym samym wykorzystuje wyniki uzyskane przy spalaniu powietrznym za pomocą palnika o mocy 400 kWt do oszacowania wpływu wielkości zmian poszczególnych parametrów przepływowych mieszaniny gazów względem powietrza na charakterystykę pracy palnika i stabilność oraz własności formowanego płomienia pyłowego.

W rozdziale 11 zawarto wnioski wynikające z realizacji pracy doktorskiej. Wszystkie wypunktowano jako 30 kolejnych zagadnień wynikających ze zrealizowanej pracy.

Podsumowując rozprawa z jednej strony zawiera bardzo interesujące poznawczo wyniki, część laboratoryjna jest bardzo rozbudowana i dobrze opisana a prezentowane wyniki nie budzą zastrzeżeń, z drugiej Autor wykazuje biegłość w obliczeniowych technikach analitycznych dotyczących zagadnień spalania.

4. Szczegółowe uwagi krytyczne

Poniżej przedstawiam pytania i uwagi krytyczne do pracy.

Praca napisana jest starannym językiem, niemniej jednak zauważam jeden brak o charakterze edycyjnym:

- Str. 91, trzeci akapit – brak zakończenia.

Uwagi o charakterze merytorycznym:

- Niejasny jest powód wyboru sposobu wyznaczania adiabatycznej temperatury spalania (AFT). W opisie na str. 53 oraz na schemacie blokowym Rys. 5.3 zaznaczono, że jest ona wyznaczana programem FactSage™, podczas gdy zwyczajowo wyznacza się ją analitycznie z bilansu komory spalania. Interesujące byłoby porównanie wartości uzyskanych za pomocą obu metod.
- Rys 6.3 oraz 6.4 – obrazy mikroskopowe „monofrakcji” są wyjątkowo kiepskiej jakości. Ze względu na fakt, że cząstki rozdrobnionej biomasy w istocie nie stanowią „monofrakcji”, co Autor zauważa w opisie kształtu cząstek, istotna byłaby analiza na ile odmienny kształt cząstek biomasy (określony dokładniejszym obrazowaniem mikroskopowym) wpływa na prowadzone badania.

- Rys. 6.5 – rozkłady wielkości cząstek lepiej przedstawiać w skali logarytmicznej w postaci prostych w układzie Rosin-Rammlera. Kąt nachylenia prostych, tzw. liczba polidispersji, jest wtedy dobrym wskaźnikiem „monofrakcyjności” analizowanego pyłu.
- Jakie kryterium uznano za istotne przy wyborze granulacji sproszkowanych paliw do badań na stanowiskach gorących? Z jakiego kryterium wynika stosunkowo drobny przemiał paliw biomasowych? W rzeczywistych zastosowaniach pyłu biomasy unika się jej drobnego przemiału, a średnice cząstek o wielkości 1 mm są dopuszczalne i często spotykane.
- W opisie badań prowadzonych na unikalnym stanowisku o mocy 400 kWt brak zwyczajowych informacji dotyczących jakości spalania, takich jak części palne w pozostałościach po spalaniu, udział CO w spalinach, skład spalin łącznie z udziałem wielkości objętych limitami emisyjnymi, itp. Wielkości te zapewne były mierzone i świadczyłyby o poprawności budowy badanego palnika.
- Badania z użyciem stanowiska o mocy 400 kWt byłyby także o wiele cenniejsze gdyby prowadzono je w technologii oxy-fuel. Czy była taka możliwość?

Sugeruję, aby Doktorant odpowiedział na powyższe pytania podczas publicznej obrony.

5. Wniosek końcowy

O znaczeniu pracy świadczy przede wszystkim sposób realizacji badań oraz osiągnięte, wartościowe poznawczo wyniki. W części eksperymentalnej analizowano wyniki zapłonu w małej skali laboratoryjnej pojedynczej cząstki paliwa, a także dokonano interpretacji zapłonu pojedynczej cząstki paliwa w oparciu o badania TGA. Wyniki zestawiono z zapłonem chmury pyłowej. Ponadto wykonano badania prędkości propagacji płomienia mieszanki pyłowo-gazowej, a także badania palnika w skali półtechnicznej na stanowisku 0,4 MWt. Nie bez znaczenia jest praktyczna stosowalność niektórych wyników, szczególnie dotyczących budowy palnika pyłowego.

W podsumowaniu mogę stwierdzić, że uzyskane przez pana mgr inż. Konrada Babulę wyniki stanowią oryginalne i wartościowe rozwiązanie trudnego problemu badawczego. Doktorant wykazał umiejętność prowadzenia pracy badawczej na wysokim poziomie. Potrafi dokonać krytycznej analizy wyników a na ich podstawie formułować rzetelne wnioski.

W związku z powyższym uznaję, że praca doktorska spełnia ustawowo określone wymagania i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ze względu na ładunek cennych informacji zawartych w pracy, pogłębioną analizę problemu oraz uzyskane wyniki, wnioskuję o jej wyróżnienie.

