

Prof. dr hab. Tomasz Kowalewski
IPPT PAN, Warszawa
Zakład Mechaniki i Fizyki Płynów

Warszawa, 13.11.2013

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr. Kamila Kwiatkowskiego „*Dynamika procesu zgazowania i spalania otrzymanego gazu*”, wykonana na zlecenie Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Charakterystyka pracy

Praca doktorska mgr. Kwiatkowskiego została wykonana pod opieką promotora dr hab. Konrada Bajera oraz promotora pomocniczego dr Marka Dudyńskiego na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Tematyka pracy dotyczy procesów termicznej utylizacji biomasy, ze szczególnym uwzględnieniem procesów związanych z rozkładem termicznym (pirolizą), zgazowaniem i wykorzystaniem otrzymanego gazu jako nośnika energetycznego.

Praca ma charakter aplikacyjny, w części doświadczalnej wskazując na możliwości wykorzystania współczesnych metod eksperymentalnych dla przeprowadzenia ilościowej analizy badanych procesów spalania, a w części numerycznej przedstawia możliwości wykorzystania komercyjnego kodu Ansys-Fluent i otwartego kodu uniwersyteckiego OpenFoam do opisu przebiegających procesów spalania i optymalizacji badanego systemu laboratoryjnego i przemysłowego.

Analiza fizyki procesów spalania jest wbrew pozorom zagadnieniem bardzo złożonym i nawet w przypadku najprostszych układów dwuskładnikowych (np. wodór - tlen), dla precyzyjnego opisu wymaga uwzględnienia całej sekwencji reakcji chemicznych przebiegających kaskadowo. Spalanie produktów rozkładu substancji stałych o tak złożonej i mało powtarzalnej strukturze chemicznej jak biomasa jest związane z niemal tysiącem cząstkowych reakcji chemicznej i ich pełny fizyczny opis pozostaje nadal dalekim od możliwości realizacji wyzwaniem naukowym. Z tego też powodu w literaturze dominują uproszczone modele empiryczne uzyskane w rezultacie mozolnych prac eksperymentalnych i przybliżonej, na ogół jednowymiarowej analizy teoretycznej. Autor przedstawionej pracy doktorskiej stara się pokazać jakiego typu nowe dane ilościowe mogą być pozyskane przy głębszej analizie eksperymentalnej takich procesów, jak wykorzystać zarówno dane pomiarowe

uzyskane dla elementarnych badań laboratoryjnych (reaktor TGA), jak i dane z instalacji przemysłowych (Olsztyn i Szepietowo).

Dane z reaktora TGA, z natury bardzo uproszczonego stanowiska laboratoryjnego znajdującego się w Szkole Głównej Służb Pożarniczych, wykorzystano do kalibracji modelu numerycznego i oszacowania wpływu efektu fragmentacji próbki poddanej procesowi pirolizy. Badania te stanowią element walidacji modelu numerycznego, tzn. stwierdzenia czy mimo poczynionego z konieczności uproszczenia fizyki zjawiska pirolizy rezultaty symulacji numerycznych w akceptowalnym zakresie reprodukuja przebieg procesu rejestrowanego w laboratorium. W wyniku badań Autora stwierdzono m.in., że skuteczne modelowanie procesu zgazowania termicznie dużej cząstki drewna wymaga uwzględnienia jej fragmentacji (rozpadu cząstki), która następuje zaraz po rozpoczęciu procesu.

Znacznie poważniejszym wyzwaniem jest zbadanie funkcjonującej instalacji przemysłowej i próba wprowadzenia modelu numerycznego reprodukującego podstawowe cechy przebiegających tam procesów. Zbudowanie takiego modelu, jeśli potwierdzi się jego wiarygodność, ma niekwestionowane znaczenie praktyczne. Analizując metodami numerycznej mechaniki płynów (CFD) procesy przebiegające w rzeczywistej geometrii instalacji, w warunkach jakie są typowe dla stosowanej biomasy, zachowując dopuszczalne regulacjami prawnymi zmiany parametrów, możliwe stało się znalezienie optymalnej procedury gwarantującej zarówno odpowiednio niski poziom szkodliwych gazów jak i dodatni zysk energetyczny instalacji. Niewątpliwie jest to najważniejsza ale i najtrudniejsza w realizacji część omawianej pracy doktorskiej.

Z uwagi na bardzo szeroki zakres przeprowadzonych badań charakter przedstawionej pracy odbiega znacznie od typowych prac doktorskich. Obok dość szczegółowego wprowadzenia przybliżającego najistotniejsze charakterystyki fizyczne i chemiczne istotne dla analizy procesów zgazowania materiałów stałych, elementarnych informacji dotyczących numerycznego modelowania przepływów, oraz bogatego spisu literaturowego, w pracy znajdujemy ponad sto stron ilustrujących rezultaty badań laboratoryjnych i przeprowadzonych symulacji. Należy zauważyć, że w większości są to rezultaty Autora już opublikowane w punktowanych czasopismach naukowych.

Przeprowadzone badania obejmują kilkaset serii pomiarowych zrealizowanych na czterech różnych stanowiskach badawczych przy aktywnej roli Autora pracy. Praca ma obok znaczenia poznawczego duży potencjał edukacyjny i powinna zdaniem recenzenta zostać po odpowiedniej modyfikacji edytorskiej wydana w formie monografii. Niewiele jest na polskim rynku wydawniczym tak wszechstronnych analiz procesów zgazowywania i w

konsekwencji wykorzystania, jako źródła energii odpadów biologicznych. Prezentowane podejście jest tym cenniejsze, że dalekie od propagandowych uproszczeń typowych dla prac inżynierskich z zakresu nowych źródeł energii. Widać tutaj dociekliwość fizyka z precyzją poszukującego możliwości zrozumienia, a później możliwie dokładnego zaimplementowania w modelu numerycznym schematu przebiegu analizowanego procesu.

Ocena pracy

Jest to oryginalna i wartościowa praca, napisana zwięźle i przejrzysto, zilustrowana licznymi wykresami i rysunkami. Zaproponowane i zaimplementowane metody analizy procesów towarzyszących zgazowywaniu biomasy stanowią istotny wkład do problematyki naukowej związanej z energetyką odnawialną i wykorzystaniem biomasy w celach energetycznych.

Najistotniejsze unikalne osiągnięcia Autora to:

1. Zdefiniowanie reżimów spalania gorących, niskokalorycznych gazów powstających w procesie zgazowania biomasy.
2. Przedstawienie modelu dynamiki procesu spalania gazu ze zgazowania biomasy w przemysłowej komorze spalania i opracowanie modelu numerycznego pozwalającego na analizę przepływu i ilościową charakterystykę produktów spalania.
3. Opracowanie teoretycznego modelu pirolizy biomasy i jego zastosowanie w komercyjnym kodzie numerycznym Ansys-Fluent i kodzie OpenFoam.
4. Zbudowanie kodu numerycznego i przeprowadzenie pełnowymiarowej analizy procesu zgazowania produktu odpadowego farmy drobiowej dla istniejącej instalacji przemysłowej w Olsztynie.

Kandydat opracował dwa modele matematyczne procesu zgazowania biomasy, wprowadził ich numeryczną implementację w dwóch kodach typu CFD: komercyjnym kodzie ANSYS-Fluent i w otwartym kodzie OpenFoam. Opracowane narzędzia numeryczne umożliwiają symulację procesu zgazowania biomasy dla dużych instalacji przemysłowych. Wyniki przeprowadzonych przez kandydata symulacji numerycznych procesu spalania w przemysłowej komorze spalania oraz wyniki pomiarów w instalacji przemysłowej zgodnie pokazują, że we wszystkich analizowanych przypadkach możliwe jest osiągnięcie stabilnego procesu spalania i niskiej emisji tlenu azotu. Rezultaty symulacji numerycznych pozostają zasadniczo w zgodzie z bezpośrednimi obserwacjami i pomiarami w instalacji przemysłowej, choć z uwagi na złożoność procesu trudno tutaj mówić o pełnej zgodności ilościowej. Tym niemniej otrzymany model dynamiki spalania ma istotne znaczenie dla projektowania komory spalania, pozwolił m.in. ustalić optymalne położenie zaworów wtrysku roztworu mocznika. W rezultacie

doprowadziło to do skutecznej modyfikacji działającej komory spalania, umożliwiając znaczne obniżenie emisji tlenków azotu.

Ogólna ocena pracy przez recenzenta jest bardzo pozytywna. Praca porusza ważny problem i przedstawia oryginalne i wartościowe rezultaty. Opracowana metodologia analizy przepływów w komorze spalania biomasy może mieć szeroki zakres zastosowań, co należy uznać za zaletę pracy. Można jedynie stwierdzić, że przedstawiony materiał jest tak szeroki, że mógłby wystarczyć dla kilku doktorantów.

Praktycznie trudno znaleźć mankamenty pracy, kilka literówek i niezręcznych sformułowań typu '*analiza profilów*', '*jest mniejsza niż*', nie jest warte wzmianki. Natomiast wymaga jednak pewnej troski dokładniejsze opisanie parametrów wielu zamieszczonych wykresów. Zupełnie nie jest jasne na przykład używanie opisu osi jako „Mixture fraction” (rys. 4.4 - 4.9) bez dodatku jakiego składnika to dotyczy oraz, że jest to jak można się domyśleć unormowany ułamek molowy. Podobnie pojawiające się w opisach rysunków 4.10 – 4.11 wyrażenie „tempo dyssypacji skalara”, powinno znaleźć odnośnik do definicji i używanego tam oznaczenia N . Rysunek 5.5 przedstawiający zdjęcia ilustrujące dynamikę frontu spalania jest mało czytelny. W jego opisie należałoby dodać wskazówki dla czytelnika, na co należy zwrócić uwagę i jaka informacja jest istotna dla porównania z modelem. Tym bardziej, że konkluzja na poprzedzającej stronie stwierdza zgodność z modelem numerycznym, trudną do uchwycenia na podstawie tych danych. Podobnie rysunek 3.3 powinien zawierać informacje o czasie pirolizy, jeśli służy do porównań z modelem numerycznym. Pewne obawy można mieć do precyzji obliczeń numerycznych modelu przemysłowego. Zastosowana siatka obliczeniowa składająca się 4,5 mln elementów nie wydaje się wystarczająco gęsta dla tak dużej geometrii (30m^3). Odpowiada to w przybliżeniu komórce elementarnej o wymiarze charakterystycznym rzędu centymetra. Czy wystarcza to dla prawidłowego modelowania niestacjonarnego przepływu turbulentnego z reakcjami chemicznymi? Być może stosowano też lokalne zagęszczenia w obszarach o dużych gradientach prędkości i temperatury, ale w pracy nie ma na ten temat wzmianki. Wprawdzie w podrozdziale 5.3 wspomniany jest test zagęszczania siatki, ale na podstawie pokazanych rozkładów temperatury trudno wnioskować czy faktycznie wyniki dla różnych siatek są zgodne, (z jaką dokładnością, jaki parametr porównywano – profile prędkości, temperatury, wartości globalne?). W dalszej części wielokrotnie powtarzany jest zwrot „zgodne z obserwacjami”, zbyt ogólny, aby można to przyjąć, jako dowód poprawności modelu numerycznego. Wydaje się, że mamy tutaj jedynie jakościową zgodność mierzonych i obliczanych charakterystyk przepływu, rozkładu temperatury i koncentracji składników, wystarczającą prawdopodobnie do optymalizacji procesu spalania ale trudną do zakwalifikowania jako tzw. „*walidacja fizyki kodu numerycznego*”.

Wniosek końcowy

Podsumowując, recenzent na podstawie przedłożonej pracy może uznać, że doktorant potrafił samodzielnie rozwiązać oryginalny problem naukowy i przedstawić oryginalną pracę naukową, będącą istotnym wkładem do eksperymentalnych i numerycznych badań procesów spalania biomasy. Zastosowane metody i zakres przeprowadzonych badań świadczą o dobrym opanowaniu przez doktoranta zarówno współczesnych technik eksperymentalnych jak i metod analizy numerycznej badanych konfiguracji. Wyniki przedstawione w rozprawie pozwalają recenzentowi na stwierdzenie, iż recenzowana praca spełnia zawarte w Ustawie o Tytule i Stopniach Naukowych wymogi stawiane pracom doktorskim w dyscyplinie naukowej fizyka.

Wobec powyższego stawiam **wniosek o przyjęcie przez Radę Wydziału rozprawy doktorskiej mgr. Kamila Kwiatkowskiego nt.: „Dynamika procesu zgazowania i spalania otrzymanego gazu”** i dopuszczenie Kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Biorąc pod uwagę bardzo szeroki zakres badań zrealizowanych w przedstawionej pracy doktorskiej, ich nowoczesność, stosowaną metodologię analizy, interpretacji i przedstawiania wyników, oraz istotność otrzymanych rezultatów dla rozwoju wiedzy o procesach gazyfikacji biomasy, **wnoszę o wyróżnienie przez Radę Wydziału pracy doktorskiej mgr Kamila Kwiatkowskiego.**



- Prof. dr hab. T. A. Kowalewski -