

dr hab. inż. Andrzej Bogusławski, prof. P.Cz.
Instytut Maszyn Ciepłych
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska

Recenzja pracy doktorskiej
mgr. Kamila Kwiatkowskiego
pt.: Dynamika procesu zgazowania i spalania otrzymanego gazu
Promotor: dr hab. Konrad Bajer
Promotor pomocniczy: dr Marek Dudyński

Praca poświęcona jest zagadnieniom numerycznego modelowania procesu zgazowania oraz spalania syngazu. Problematyka poruszana w pracy jest bardzo aktualna ze względu na konieczność utylizacji biomasy odpadowej, co pozwoli na szersze wykorzystanie paliw odnawialnych oraz redukcję emisji gazów cieplarnianych.

W rozdziale 1. Autor uzasadnia w wyczerpujący sposób motywację podjętych badań, zwracając uwagę na istotną przewagę zgazowania masy odpadowej nad bezpośrednim jej spalaniem, podkreślając przede wszystkim możliwość ograniczenia emisji tlenków azotu. W rozdziale tym przedstawia również charakterystykę syngazu, jako paliwa oraz określa warunki, jakie muszą być spełnione, by spalanie tego typu paliwa o niskiej wartości opałowej było opłacalne oraz bezpieczne dla środowiska. W podrozdziale 1.3 Autor formułuje cel i zakres pracy. Brakuje natomiast jawnego sformułowania naukowej tezy pracy, którą Autor chce udowodnić na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych oraz eksperymentalnych przedstawionych w pracy.

W rozdziale 2. Przedstawiono model matematyczny przepływów, wymiany ciepła oraz reakcji chemicznych wykorzystywany w dalszej części pracy. W ostatnim podrozdziale 2.3 Autor przytacza prawo Darcy'ego przepływu przez materiał porowaty, z którego jednak nie korzysta, ponieważ w rozdziale 3. przedstawia pełne równanie przepływu przez materiał porowaty, uwzględniające zmienność w czasie, składnik adwekcyjny i wpływ lepkości. Wydaje się, że podrozdział 2.3 jest zbędny, a przynajmniej niespójny z informacjami przedstawionymi w rozdziale 3.

Rozdział 3 zawiera opis procesu pirolizy i zgazowania oraz przyjętego modelu matematycznego wraz z wynikami symulacji numerycznych porównanych z pomiarami termogravimetrycznymi. Omawiając parametry modelu numerycznego Autor ogranicza się do podania liczby objętości kontrolnych. Opis modelu numerycznego warto byłoby uzupełnić o dodatkowe informacje, takie jak wielkość kroku czasowego oraz metodę jego wyboru, liczbę iteracji na krok czasowy oraz przyjęte kryteria zbieżności jak również uzyskany w obliczeniach poziom zbieżności. Uzyskane wyniki obliczeń są bardzo bliskie wynikom eksperymentu, co świadczy o poprawności modelu matematycznego oraz rozwiązania numerycznego. Bardzo wartościowym elementem pracy jest zastosowanie stałych kinetyki chemicznej wyznaczonych na podstawie badań termogravimetrycznych analizowanego w pracy materiału. Interesująca byłaby również informacja na temat dokładności określenia stałej szybkości reakcji oraz energii aktywacji oraz wpływu, jaki błąd określenia tych stałych może mieć na wyniki obliczeń. Omawiając reakcję zgazowania Autor wymienia jedynie reakcję Boudouarda, pomijając zgazowanie karbonizatu parą wodną. Nie jest jasne, czy obie reakcje były uwzględnione w modelu matematycznym. Istotnym osiągnięciem tej części pracy jest analiza wpływu fragmentacji próbki na szybkość zgazowania oraz wykazanie, że pominięcie fragmentacji spowodowanej wzrostem ciśnienia gazu wewnątrz próbki może prowadzić do bardzo dużych błędów w oszacowaniu czasu procesu zagazowania. Rozdział ten kończy się opisem procesu zgazowania w skali przemysłowej oraz omówieniem właściwości produkowanego gazu.

Rozdział 4. poświęcony jest modelowaniu spalania syngazu. Jako model interakcji spalania oraz przepływu turbulentnego Autor przyjął model typu „laminarny flamelet” w wersji stacjonarnej. Model ten został szczegółowo omówiony w podrozdziale 4.1. Brak jednak choćby krótkiego uzasadnienia wyboru tego modelu dla analizowanego w pracy procesu spalania. W programie, z

którego Autor korzystał, jest też dostępna wersja modelu niestacjonarnego flameletu. Nasuwa się pytanie, czy wybór wersji stacjonarnej podyktowany był czasem obliczeniowym, znacznie krótszym w przypadku modelu stacjonarnego, czy warunki spalania pozwalały na zastosowanie uproszczonej wersji stacjonarnej. W podrozdziale 4.2 Autor podjął próbę określenia możliwych reżimów spalania syngazu, przyjmując różne temperatury utleniacza i paliwa. Analiza ta opiera się na rozwiązaniu równań modelu flamelet, pozwalających wyznaczyć profile temperatury w przestrzeni stopnia zmieszania dla różnych, przyjętych w pracy, przypadków temperatury paliwa oraz utleniacza. W obliczeniach przyjęto jedną wartość szybkości dyssypacji skalara na poziomie 5 s^{-1} . Jest to bardzo niska wartość, raczej niespotykana w przepływie typu struga swobodna, a tego typu palnik zastosowany był w komorze spalania analizowanej w rozdziale 5. Interesująca byłaby informacja, na jakim poziomie była szybkość dyssypacji skalara w modelu przepływu przedstawionym w rozdziale 5. Informacja ta jest bezpośrednio dostępna, ponieważ jest niezbędna do wyznaczenia udziałów masowych reagentów w przestrzeni fizycznej. Autor oczywiście jest świadomy, że szybkość dyssypacji skalara ma bardzo istotny wpływ na maksymalną temperaturę spalania, co pokazuje na Rys.4.10. Wydaje się, że bardziej zasadne byłoby przeprowadzenie analizy możliwych reżimów spalania syngazu, przyjmując szybkość dyssypacji skalara na podstawie wyników uzyskanych z rozwiązania równań opisujących przepływ turbulentny w analizowanym przypadku.

W rozdziale 5. Autor przedstawia wyniki symulacji procesu spalania syngazu w rzeczywistej, przemysłowej komorze spalania. W podrozdziale 5.1 przedstawiono podstawowe informacje dotyczące modelowania przepływu turbulentnego o zmiennej gęstości oraz wymiany danych pomiędzy modelem przepływu oraz modelem spalania. W podrozdziale 5.2 przedstawiono informacje dotyczące modelu numerycznego. Informacje na temat modelu numerycznego powinny być uzupełnione o informacje na temat wielkości siatki numerycznej oraz weryfikacji wpływu wielkości siatki na wyniki obliczeń, wartości kroku czasowego oraz sposobu jego wyboru, metodyki modelowania przepływów przyściennych oraz poziomu uzyskanej zbieżności. W obliczeniach uwzględniono dwa przypadki różniące się istotnie strumieniem masy paliwa. Nie jest jasne, dlaczego w obydwu przypadkach utrzymywano ten sam strumień masy powietrza doprowadzanego do komory spalania.

W podrozdziale 5.3 omawiane jest rozwiązanie uzyskane przy założeniu ustalonego charakteru przepływu. Niepokojące jest stwierdzenie Autora, że „zbieżność uzyskanego rozwiązania jest niska, zaś samo rozwiązanie jest wrażliwe na ustawienia obliczeń numerycznych”. Jeżeli nie uzyskano odpowiedniego poziomu residuów oraz rozwiązanie jest zależne od warunków początkowych, czy np. wartości współczynników podrelaksacji, to oznacza, że nie uzyskano zbieżnego, ustalonego rozwiązania, a wnioski sformułowane na podstawie takiego rozwiązania mogą być błędne. Bardzo możliwe, że w omawianej w pracy konfiguracji nie istnieje ustalone rozwiązanie i należałoby wówczas pominąć wyniki przedstawione w podrozdziale 5.3. W dalszej części pracy omawiane są wyniki uzyskane przy założeniu nieustalonego charakteru przepływu. Silnie niestacjonarny charakter przepływu jest potwierdzony wynikami wizualizacji w komorze spalania przedstawionymi na Rys. 5.5. Stwierdzono obecność okresowych oscylacji pola przepływu o okresie 6 s. Oscylacje te zostały również zaobserwowane w rozwiązaniu numerycznym przedstawionym na Rys.5.6. Oscylacje tego typu wpływają na stabilność spalania i bardzo interesująca byłaby próba określenia przyczyn tych oscylacji. Pierwsze pytanie, które nasuwa się, przy próbie określenia przyczyn oscylacji, dotyczy przepływu izotermicznego, czy przepływ bez spalania w analizowanej komorze spalania jest przepływem ustalonym, czy nieustalonym. Jeżeli oscylacje pojawiają się tylko przy spalaniu, to również interesujące byłoby określenie przyczyn, dzięki czemu możliwe byłoby wyeliminowanie tego typu niestacjonarności. Duża skala obiektu nasuwać może przypuszczenie, że przyczyną oscylacji mogą być siły wyporu, jednak możliwe jest również, że oscylacje te są efektem innego rodzaju niestabilności przepływu o zmiennej gęstości. Warto chyba podjąć próbę wyjaśnienia przyczyn oscylacji w dalszych pracach badawczych dotyczących komory spalania oraz jej optymalizacji.

W rozdziale 6. przedstawiono wyniki dotyczące emisji zanieczyszczeń, w tym przede wszystkim tlenków azotu. Wyniki symulacji numerycznych w zakresie tlenków azotu są znacznie niższe niż wskazują wyniki eksperymentu. Przyczyną niezgodności jest brak w modelu matematycznym

mechanizmu reakcji azotu zawartego w paliwie. Bardzo ważnym wnioskiem jest, że mechanizm ten jest bardzo istotny i powinien być uwzględniony w przyszłych badaniach.

W podsumowaniu pracy Autor wymienia istotne wyniki uzyskane w pracy. Najważniejszym wnioskiem z przeprowadzonych badań, istotnym ze względu na praktyczne zastosowania syngazu, jest stwierdzenie, że niskokaloryczny gaz, pochodzący ze zgazowania biomasy odpadowej, może być wartościowym paliwem dla lokalnej produkcji energii elektrycznej lub ciepła. Pokazano również na podstawie badań teoretycznych, że możliwe dla syngazu jest uzyskanie reżimu spalania typu MILD. Wyniki symulacji numerycznych, zweryfikowane danymi eksperymentalnymi, pokazały możliwość prowadzenia stabilnego spalania syngazu w komorze przemysłowej. W podsumowaniu Autor wspomina również, że na podstawie symulacji numerycznych przedstawionych w pracy, zmodyfikowano lokalizację awaryjnego wtrysku mocznika. Szkoda, że szersza informacja na ten temat nie znalazła się w pracy.

Praca jest napisana poprawnym językiem, a jej lektura nie nastręcza trudności, jednak Autor nie ustrzegł się drobnych, jednak licznych, błędów językowych i interpunkcyjnych.

Podsumowując, w pracy przedstawiono ważne, dla celów zastosowań technicznych, zaawansowane modele matematyczne procesów pirolizy oraz zgazowania biomasy odpadowej oraz spalania syngazu. Wprawdzie Autor we wprowadzeniu pisze, że głównym zadaniem było przeprowadzenie symulacji numerycznych, to jednak z lektury pracy czytelnik dowiaduje się, że Autor pracy był uczestnikiem większości, jeśli nie wszystkich, badań eksperymentalnych, które zastosowano do weryfikacji wyników obliczeń. Na wartość pracy składa się, zdaniem recenzenta, poza bardzo wartościowymi wynikami symulacji numerycznych, również eksperyment przeprowadzony z udziałem Doktoranta. Podkreślić należy, że wyniki uzyskane w trakcie realizacji recenzowanej rozprawy doktorskiej zostały już częściowo opublikowane w renomowanych czasopismach, co również świadczy o dużej wartości naukowej uzyskanych rezultatów.

Pomimo przedstawionych krytycznych uwag, z których część powinna być przedmiotem dyskusji w trakcie publicznej obrony pracy stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymogi stawiane przez Ustawę o Stopniach i Tytule Naukowym. Stawiam wniosek o dopuszczenie omawianej rozprawy do publicznej obrony.

