Dr hab.inż. Elżbieta Fornalik-Wajs, prof. AGH Kraków, 20.09.2023

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

Wydział Energetyki i Paliw

Katedra Podstawowych Problemów Energetyki

Al. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

**Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Hisham Lotfy Elgendy**

„*CFD modeling of dual fluid reactor (DFR) demonstrator*”

**1. Wybór tematu**

Reaktor dwupłynowy (Dual Fluid Reactor DFR) należy do reaktorów IV generacji, a więc grupy reaktorów wskazujących możliwe kierunki rozwoju przyszłościowych technologii reaktorowych. Analizy procesów cieplno-przepływowych, z wykorzystaniem narzędzi obliczeniowej mechaniki płynów, zaczynają stanowić alternatywne, do dotychczas stosowanych narzędzi, źródło informacji. Są one tym cenniejsze, że pozwalają na poznanie lokalnych wartości temperatury, co ma ogromne znaczenie dla bezpieczeństwa pracy reaktorów jądrowych. Temat pracy jest związany bezpośrednio z projektem Mini Demonstratora, który ma być obiektem badawczym reaktora DFR i stanowić źródło danych eksperymentalnych związanych z warunkami jego pracy. Wybór tej tematyki jest uzasadniony, gdyż wstępne analizy numeryczne są niezbędne na etapie projektowania układów cieplno-przepywowych. Poprawnie przeprowadzone badania mogą wpłynąć na sam projekt oraz bezpieczeństwo pracy reaktora.

**2. Ogólna charakterystyka**

Praca doktorska została zawarta na 126 stronach. Składa się ze spisu treści, listy rysunków i tabel, spisu zastosowanych skrótów, wielkości bezwymiarowych oraz symboli greckich i łacińskich, streszczeń w j. angielskim i polskim, 6 rozdziałów oraz wykazu literatury obejmującego 63 pozycje.

Rozdział 1 zawiera uzasadnienie podjęcia tematu wraz z opisem zdefiniowanych celów, ogólną charakterystykę reaktorów IV generacji oraz wprowadzenie do zagadnienia reaktora dwupłynowego. Opis reaktorów jest bardzo krótki, bez podania źródeł literaturowyvh dla prezentowanych informacji. Reaktor dwupłynowy został krótko scharakteryzowany, ale wydaje się, że ten opis mógł zostać dołączony do rozdziału poświęconego tylko jemu. Nie został podkreślony istniejący stan badań dotyczący tego reaktora. Podane są publikacje, ale bez przedstawienia osiągnięć w nich zawartych (np. 19-22, 25-27).

Rozdział 2 dotyczy Mini Demonstratora (MD) i zawiera trzy części: odnoszącą się do znaczenia eksperymentów w rozwoju techniki reaktorowej, przedstawiającą elementy MD i zasady jego działania oraz opis rdzenia MD. Część opisująca znaczenie eksperymentów w badaniach jądrowych została sprowadzona do krótkich notek o przykładowych reaktorach eksperymentalnych. Tak przedstawione informacje nie wzbogacją pracy doktorskiej i nie przyczyniają się do podkreślenia znaczenia i wkładu reaktorów badawczych w rozwój energetyki jądrowej i innych dziedzin. Podobny zakres wiedzy został przedstawiony przy opisie MD. Podano informacje dotyczące budowy rdzenia, ale brakuje pewnych danych geometrycznych, np. średnicy króćców dolotowych i wylotowych, a także informacji skąd zaczerpnięto pozostałe dane. Nie podano mocy rekatora, strumienia masy paliwa i chłodziwa, czy wytyczne projektowe związane z jego działaniem. Przedstawione w pracy dane nie są wystarczające do jego odwzorowania w postaci modelu numerycznego.

Rozdział 3 prezentuje ogólne informacje na temat obliczeniowej mechaniki płynów (Computational Fluid Dynamics CFD) oraz modelowania turbulencji. Skrótowo przedstawione zostały metody Direct Numerical Simulation (DNS), Large Eddy Simulation (LES) oraz Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS). Sformułowania równań wynikających z zasad zachowania masy, pędu i energii są niedokładne i obejmowane jedną nazwą jako równania Naviera-Stokesa, co nie jest prawdą. Stwierdzenie, że przedstawiono równania w formie jednowymiarowej jest nieprawdziwe. Brak jest zdefiniowanych sił masowych w równaniu transportu pędu, a w dalszych częściach pracy jest mowa o sile wyporu. W równaniu transportu energii brak jest członu źródłowego. Brakuje uzasadnienia wyboru modelu turbulencji wykorzystywanego w obliczeniach. Podrozdział dotyczący modelu turbulencji k-ω SST zawiera nieścisłości dotyczące źródeł informacji. Podane publikacje [37] i [39] nie zawierają informacji, o których wspomniano w pracy doktorskiej lub forma równań jest inna. W publikacji [39] nie dostrzega się informacji o warunkach brzegowych dla energii kinetycznej turbulencji. Brakuje również oceny stosowalności warunku zaczerpniętego z literaury. Zwrócona została uwaga na modelowanie przepływu płynu o liczbie Prandtla mniejszej niż 1.

Rozdział 4 przedstawia zagadnienie walidacji skonstruowanego modelu numerycznego za pomocą danych DNS i LES. Głównym problemem jest to, że ten model nie został właściwie zaprezentowany w żadnej części pracy. Proces walidacji modelu numerycznego jest bardzo ważny, zwłaszcza w sytuacji braku danych eksperymentalnych i wymaga dużej uwagi oraz ostrożności. Niestety w tym rozdziale brak jest podstawowych danych, które pozwoliłyby na ocenę konfiguracji modelu oraz procesu walidacji. Dodatkowo, nie podano zakresu stosowalności korealcji Kay’a, ani zakresu liczb Pecleta czy Reynoldsa, które były analizowane. Brakuje też informacji o implementacji korelacji w modelu numerycznym.

Rozdział 5 stanowi główną część pracy doktorskiej i dotyczy modelowania rdzenia MD, wyników oraz ich analizy. Struktura części poświęconej modelowaniu numerycznemu rdzenia jest właściwa i przedstawia model geometryczny, podział przestrzeni obliczeniowej, warunki brzegowe oraz właściwości termofizyczne płynów. Niestety również w tej części brakuje podstawowych informacji, które pozwoliłyby na ocenę wyników przedstawionych w dalszej części tego rozdziału. Informacje o geometrii, warunkach brzegowych, siatce obliczeniowej są niepełne i stąd brak możliwości poznania modelu i jego konfiguracji. Zaprezentowane równania opisujące właściwości termofizyczne płynu (ciepła właściwego i lepkości), zamieszczone w Tabeli 5, są niepoprawne. Brak jest uzasadnienia zastosowania pozostałych dwóch równań z tej tabeli. Brak jest równania opisującego współczynnik przewodzenia ciepła w zależności od temperatury (nie podano żadnej jego wartości). Budzą się wątpliwości, czy Tabela 5 zawiera jedynie pomyłki edytorskie, czy też w obliczeniach zastosowano niewłaściwe równania. Ma to bardzo duże znaczenie, bo decyduje o zjawiskach transportu masy, pędu i energii w analizowanym układzie. Dodam tylko, że analogiczny zapis równań znalazł się w publikacji Kandydata. Uwaga o mniejszym znaczeniu dotyczy braku opisu metody wprowadzenia wspomnianych równań do modelu numerycznego.

W dalszej części Rozdziału 5 prezentowane są dane głównie w postaci linii prądu kolorowanych wartościami temperatury i lepkości turbulentnej. Ta forma prezentacji danych nie jest właściwa, ponieważ nie daje informacji o zmienności wartości w całym analizowanym układzie. Często w opisie rysunków wspomniany jest kierunek przepływu płynu, a nie wynika on z prezentowanych linii prądu. Dodatkowo trudno jest rozróżnić kolory i przypisać im wartości liczbowe przy zastosowanej skali kolorów. W pracy nie zaprezentowano wyników dotyczących pola prędkości (poza wlotami), ciśnienia czy energii kinetycznej turbulencji. Kandydat określał „stopień” turbulencji przepływu poprzez wartość lepkości turbulentnej – wydaje się, że lepszym parametrem byłaby intensywność turbulencji. Na str. 71 pojawia się wzmianka o sile wyporu, która przy normalnej pracy reaktora nie powinna odgrywać dominującej roli, a odnosi się wrażenie, że jest to główny przyczynek do transportu energii w pewnym obszarze. Ze względu na niewystarczający zakres danych, trudno odnieść się do przedstawionej interpretacji wyników.

Uwzględniając zamieszczone powyżej uwagi, pojawiają się wątpliwości związane z wynikami, ich wizualizacją i interpretacją. Nie można ich właściwie ocenić nie znając konfiguracji modelu numerycznego, warunków brzegowych i przepływowych, właściwości płynu, itp. Dodatkowo należy podkreślić, że w pracy zostały zaprezentowane wyniki dla jednego przypadku przepływu współprądowego i przeciwprądowego. Trudno w takiej sytuacji mówić o uogólnionych wnioskach. W tym świetle, sugestie co do lokalizacji czujników pomiarowych wydają się przedwczesne. Techniki pomiarowe zostały przedstawione w marginalny sposób.

W podrozdziale „Discussion” wymieniono parametry, które mogą zostać zmierzone lub określone na podstawie pomiarów. Szkoda, że tych parametrów nie zaprezentowano w pracy bazując na obliczeniach numerycznych.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie badań. Ze względu na wcześniej już wspomniane braki informacji, nie można odnieść się do zawartych w nim wniosków.

**3. Ocena**

W związku ze zdefiniowanymi celami pracy, wątpliwości budzą następujące sformułowania:

* ***Opracowanie złożonych aspektów projektowych rdzenia Mini Demonstratora***. W pracy brak jest jakichkolwiek informacji o metodyce jego projektowania oraz o wyborze założeń geometrycznych, termicznych czy hydrodynamicznych. Brakuje podstawowych danych do wykonania takiego projektu (np. gęstości generowanej mocy, wymagań temperturowych na wylocie, strumieni masy paliwa i chłodziwa, itp.)
* ***Identyfikacja odpowiedniej metodyki CFD***. Brakuje informacji, w jaki sposób została wybrana metodyka CFD, a zwłaszcza model turbulencji. Co więcej, brak jest podstawowych danych dotyczących konfiguracji modeli numerycznych, czy informacji o stosowanych metodach i schematach numerycznych. W konsekwencji, nie ma możliwości oceny odwzorowania geometrii oraz warunków pracy MD w postaci modelu numerycznego. Niestety, to samo dotyczy procesu walidacji modelu. Pełna ocena tego procesu nie jest możliwa.
* ***Modelowanie charakterystyki cieplno-przepływowej rdzenia MD***. Informacje zawarte w pracy nie pozwalają na właściwą ocenę modelu numerycznego, wykonanych obliczeń i zaprezentowanych wyników.
* ***Propozycja optymalnej lokalizacji czujników pomiarowych w rdzeniu MD***. Biorąc pod uwagę wątpliwości związane z modelowaniem numerycznym procesów zachodzących w tym układzie, ograniczoną liczbę analizowanych przypadków, brak chociażby wstępnych oszacowań wpływu czujników na strukturę przepływu, ta część pracy wymaga ponownego rozpatrzenia.

Praca doktorska w obecnej formie uniemożliwia ocenę, czy założone cele zostały osiągnięte.

**3. Ocena - Podsumowanie**

Podjęta tematyka jest ważna i wymagająca pod względem obliczeniowym. Wspomniane w recenzji braki w zakresie podstawowych, a jednocześnie niezbędnych informacji, dotyczących parametrów decydujących o konfiguracji modeli czy analizowanych przypadkach, jak też nieścisłości w podawanych wzorach lub danych, wpływają na brak **możliwości właściwej oceny metodyki przeprowadzanych analiz oraz oceny i interpretacji wyników**. Ponadto, praca doktorska powinna być sprawdzona pod względem edytorskim, gdyż zawiera liczne błędy jęzkowe i składniowe, brak spójności w stosowanym nazewnictwie i symbolach. Forma prezentacji danych powinna być również zweryfikowana, by umożliwić właściwą analizę i interpretację wyników.

**8. Wniosek końcowy**

Stwierdzam, że opiniowana praca doktorska nie spełnia w obecnej formie wymogów stawianych pracom doktorskim i **wnioskuję do Komisji Doktorskiej o skierowanie jej do poprawy**. Poprawiona wersja umożliwi właściwą ocenę otrzymanych wyników badań, wiedzy Kandydata w zakresie zrozumienia procesów zachodzących w Mini Demonstratorze oraz Jego kompetencji w zakresie obliczeniowej mechaniki płynów.