Dr hab.inż. Elżbieta Fornalik-Wajs, prof. AGH Kraków, 03.11.2023

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

Wydział Energetyki i Paliw

Katedra Podstawowych Problemów Energetyki

Al. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

**Recenzja**

**poprawionej wersji 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 129 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 75 pozycji.

Rozdział 1 zawiera uzasadnienie podjęcia tematu wraz z opisem zdefiniowanych celów, ogólną charakterystykę reaktorów IV generacji oraz wprowadzenie do zagadnienia reaktora dwupłynowego wraz z określeniem kierunków badań dotyczących jego rozwoju.

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. Pierwsze dwie części mają ogólny charakter i dlatego nie przyczyniają się do podkreślenia znaczenia i wkładu reaktorów badawczych w rozwój energetyki jądrowej i innych dziedzin. Część dotycząca MD zawiera więcej szczegółów merytorycznych dotyczących danych geometrycznych czy związanych z warunkami jego pracy, np. moc rekatora, czy wartości strumienia masy paliwa i chłodziwa.

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). Przedstawiona została motywacja Doktoranta decydująca o wyborze modelu turbulencji dla potrzeb dalszej części badań. Ważnym aspektem tej części pracy jest zwrócenie uwagi na specyfikę modelowania przepływu płynu o liczbie Prandtla mniejszej niż 1.

Rozdział 4 przedstawia zagadnienie walidacji skonstruowanego modelu numerycznego za pomocą danych DNS i LES oraz danych eksperymentalnych. W tym celu powstały dwa pomocnicze modele, które umożliwiły ocenę konstrukcji i konfiguracji właściwego modelu numerycznego oraz wyboru korelacji eksperymentalnej. Przedstawiono skrypt pozwalający na implementację korelacji Kaya 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. Nastepnie przedstawiono krótki wstęp dotyczący lokalizacji wybranych płaszczyzn lub linii, dla których wyniki miały być prezentowane oraz sposobu ich wizualizacji. Oddzielnie zaprezentowano wyniki dla przepływu współprądowego oraz przeciwprądowego. Analiza wyników w każdej z tych części została krótko podsumowana. Podrozdział dotyczący aparatury pomiarowej i jej krótkiej charaktertystyki oraz lokalizacji we wnętrzu MD zamyka tę część pracy.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie badań i najważniejsze wnioski wynikające z analizy wyników. Wskazano możliwe kierunki dalszych badań.

**3. Ogólna ocena**

Temat pracy dotyczy ważnego zagadnienia jakim jest projektowanie MD, który będzie stanowił źródło danych eksperymentalnych do walidacji modeli numerycznych reaktora DFR. Pewien niedosyt odczuwa się jednak w odniesieniu do motywacji oraz wytycznych projektowych MD, zwłaszcza dotyczących zagadnień cieplno-przepływowych. Przedstawienie wytycznych projektowych MD pozwoliłoby na zrozumienie jego potencjalnej roli w rozwoju reaktorów typu DFR, czy skali złożoności zjawisk tam zachodzących. Pominięte zostało też zaganienie skalowania i zastosowanie teorii podobieństwa w procesie projektowania.

Praca koncentruje się na modelowaniu numerycznym procesów transportu masy, pędu i energii z wykorzystaniem oprogramowania Ansys Fluent. Ogólne podejście Doktoranta do takiej analizy jest właściwe, a mianowicie: opis matematyczny, przedstawienie geometrii, warunków brzegowych, walidacja modelu numerycznego, dyskusja wyników i sformułowanie wniosków. Opracowanie modelu numerycznego MD wymagało dużego nakładu pracy, wiedzy i umiejętności, wielu przeprowadzonych symulacji numerycznych oraz analizy licznych wyników. Natomiast w odniesieniu do szczegółów, w pracy dostrzega się niedociągnięcia, zwłaszcza jeżeli chodzi o właściwą kolejność poszczególnych elementów analizy numerycznej, dokładność w prezentowaniu danych niezbędnych dla konstrukcji modelu numerycznego (równań, warunków brzegowych, danych materiałowych, itp.) oraz czytelność prezentowanych wyników obliczeń. Wspomniane niedociągnięcia obniżają wartość merytoryczną pracy. Wyniki badań stanowią jednak dobrą podstawę do dalszych analiz. Sformułowane przez Doktoranta wnioski wskazują najważniejsze parametry, mające wpływ na procesy cieplno-przepływowe oraz obszary wymagające dalszej uwagi.

**4. Osiągnięcia**

Za osiągnięcia Doktoranta uznaję:

* konstrukcję modeli numerycznych oraz implementację własnych funkcji w programie Ansys Fluent, co potwierdza kompetencje numeryczne Doktoranta,
* wykorzystanie narzędzi obliczeniowej mechaniki płynów do analizy procesów cieplno-przepływowych w MD, co pozwoliło na poznanie lokalnych wartości pola temperatury i wykazało jego silną niejednorodność,
* identyfikację parametrów mających największy wpływ na procesy transportu masy, pędu i energii w MD,
* wskazanie kierunków dalszych prac badawczych na podstawie wyników własnych badań i ich analizy.

Powyższe osiągnięcia potwierdzają wiedzę i umiejętności Doktoranta w zakresie definiowania problemu, poszukiwania jego rozwiązania metodami numerycznymi, analizy wyników oraz syntezy ogólnych spostrzeżeń i formułowania wniosków.

**5. Szczegółowe uwagi krytyczne**

Uwagi wymienione zostały w kolejności ich pojawiania się.

* Abstrakt/Streszczenie – wspomniany jest wpływ przepływu wirowego na ciśnienie, natomiast w pracy nie przedstawiono wyników dotyczących pola ciśnienia.
* Rozdział 2.1 – 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.
* Str. 38 – w pracy napisano: Other dimensions were decided accordingly to match the general arrangement and the required facility size”. Nie podano natomiast o które wymiary chodzi i ile one wynosiły.
* Str. 38 –brakuje informacji czy wartości strumieni masy podane są dla całego MD, czy dla analizowanego wycinka.
* Str. 38, a także w Rozdziale 4, w części dotyczącej walidacji – nie podano definicji liczby Reynoldsa, a zwłaszcza wymiaru charaktertystycznego przyjętego przy wyznaczaniu jej wartości.
* Informacje dotyczące wprowadzenia do CFD, modelowania metodą DNS oraz LES są bardzo ogólne i powszechnie znane, nawet osobom niezwiązanym z obliczeniami CFD.
* Str. 49 – w pracy napisano “A comprehensive review effort about low Pr turbulent modelling challenge has been discussed in several literatures…” – lista tych publikacji zawiera jedną pozycję.
* Str. 49 – odnośniki literaturowe [53] i [54] oznaczają tę samą publikację.
* Str. 51 – brakuje odnośników literaturowych do dwóch publikacji w tekście „Kawamura et al. and Abe et al.”.
* Str. 52 – nie podano zakresu stosowalności korealcji Kaya, ani zakresu liczb Pecleta występujących w analizach.
* Str. 55 - w zdefiniowanej funkcji użytkownika liczba Reynoldsa przyjmuje wartość 70000, przy czym w treści pracy podana jest wartość 85000. Nie wyjaśniono przyczyny tej rozbieżności.
* Rys. 18 i 19 wskazują na zdefiniowaną wartość turbulentnej liczby Prandtla 0.85, a w tekście wspomniana jest wartość 1. Nie wyjaśniono, która wartość została wykorzystana w obliczeniach.
* Wyniki obliczeń są prezentowane 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. Doktorant określał „stopień” turbulencji przepływu poprzez wartość lepkości turbulentnej – wydaje się, że lepszym parametrem byłaby intensywność turbulencji. Te uwagi znalazły się w części merytorycznej, gdyż taka forma prezentacji danych wpływa na ich czytelność i interpretację.
* Komentarz do Rys. 25 – napisano “This shows that the heat transfer between the fuel and the coolant is sufficient to decrease the fuel temperature to the most possible minimum based on the current flow conditions.” – nie zdefiniowano co oznacza “the most possible minimum”.
* 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 5.5.3 „Discussion” wymieniono parametry, które mogą zostać zmierzone lub określone na podstawie pomiarów. Szkoda, że tych parametrów nie zaprezentowano w pracy bazując na obliczeniach numerycznych.

**6. Uwagi krytyczne wymagające odpowiedzi**

1. W jaki sposób były/będą skalowane procesy transportu masy, pędu i energii zachodzące w reaktorze DFR i MD?
2. W kilku miejscach w pracy wspomniano dużą rolę siły wyporu w procesie transportu ciepła w MD. Przy jakich warunkach pracy MD miało to miejsce? Jak należy interpretować te wyniki w odniesieniu do pracy reaktora DFR?
3. Rys. 14 – jaki był zakres liczb Pecleta w prezentowanych badaniach? Czy dla tego zakresu stosowanie korelacji Kaya jest uzasadnione?
4. W pracy brakuje opisu metody Standard-Gradient Diffusion Hypothesis (SGDH). Proszę krótko ją scharakteryzować.
5. Str. 66, Tabela 5 – zaprezentowane równania opisujące właściwości termofizyczne płynu (ciepła właściwego i lepkości), są niepoprawne. Nie podano równania opisującego zmianę współczynnika przewodzenia ciepła z temperaturą. Proszę przedstawić poprawną wersję równań oraz brakujące równanie, które wykorzystano w obliczeniach.
6. Rozkład temperatury w przypadku przeciwprądowym (Rys. 63) wymaga wyjaśnienia. Dlaczego występują tak znaczne różnice temperatury na wlocie do kanałów paliwowych i wylocie z kanałów chłodziwa? Jakie dokładnie wartości temperatury zostały osiągnięte na wylocie z kanałów paliwowych?
7. Podano, że strumień masy paliwa i chłodziwa były różne w przypadku przepływu współprądowego i przeciwprądowego. Jaka była wspólna płaszczyzna dla porównania tych dwóch konfiguracji MD? Jakie parametry umożliwiały ich porównanie?

**7. Uwagi edytorskie**

Poniżej zostały wymienione najważniejsze uwagi edytorskie. Pominięto uwagi o charakterze językowym.

* Nie wszystkie skróty zostały objaśnione, np. COP czy BREST.
* W grupie symboli greckich zapisane są także symbole łacińskie.
* Streszczenie (w j. polskim) powinno zostać sprawdzone pod względem językowym, ponieważ zawiera zwroty, które są niezrozumiałe, np. „Przypadek został starannie podzielony na siatkę i poddany obliczeniom opartym na względnych warstwach granicznych i różnych scenariuszach.” czy „…danymi DNS/LES/Eksperymentalnymi, co zwiększa pewność przechwytywania właściwego zachowania termohydraulicznego.”
* W pracy znajduje się dużo wyrażeń żargonowych, np. temperature … is transferred, low Pr fluid.
* Brak jest spójności w stosowaniu stylu czcionek i formatowania tekstu.
* Brak jest spójności stosowaniu symboli, np. K równoczesnie oznacza współczynnik przewodzenia ciepła i energię kinetyczną turbulencji.
* Po tytułach rozdziałów nie stosuje się kropek.
* Brak jest spójności w prezentacji wyników obliczeń. Rysunki mają różne rozmiary, przedstawiają różną orientację przestrzenną tej samej geometrii, itp. Utrudnia to analizę wyników.
* Język angielski wymaga korekty, ponieważ często pojawiają się błędy literowe lub składniowe.

**8. Wniosek końcowy**

Przedmiotem pracy doktorskiej jest oryginalna analiza mini demonstratora reaktora typu DFR. Zastosowanie metodyki CFD do analizy procesów transportu masy, pędu i energii w tak złożonym układzie wymagało wiedzy i umiejętności nie tylko z zakresu energteyki jądrowej, ale także analizy numerycznej i języków programowania. Wymienione przeze mnie osiągnięcia Doktoranta potwierdzają kompetencje niezbędne do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej, a sama praca spełnia wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”.

Wnioskuję do Rady Naukowej Narodowego Centrum Badań Jądrowych o dopuszczenie Doktoranta do kolejnych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.