

Prof. dr inż. Henryk Anglart, Prof. em.
Physics Department
School of Engineering Sciences
KTH Royal Institute of Technology
Sztokholm, Szwecja

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr Mateusza Nowaka pt. "*Reactivity control by the pumping system in the Dual Fluid Reactor*".

1. Ocena tematyki podjętych badań

Zapewnienie dostępu do tanich i czystych źródeł energii jest jednym z bardziej istotnych i trudnym w praktycznej realizacji wyzwań dwudziestego pierwszego wieku. Jest to wyzwanie istotne, gdyż nie jest możliwy dalszy rozwój współczesnej cywilizacji bez powszechnego dostępu do źródeł energii. Realizacja takiego celu jest jednak bardzo trudna ze względu na wyczerpujące się zasoby naturalne nośników energii oraz, szczególnie w ostatnich latach, z uwagi na postępującą degradację środowiska naturalnego człowieka.

By podolać temu wyzwaniu, na całym świecie podejmowane są intensywne prace w zakresie rozwoju nowych technologii energetycznych, a w szczególności, nowych typów reaktorów jądrowych. W energetyce jądrowej pokładana jest nadzieja, że stanowiąc będzie jeden z filarów systemów energetycznych pracujących w podstawie i dostarczających bezemisyjnej energii elektrycznej. Obecnie eksploatowane reaktory jądrowe charakteryzuje jednak niski stopień wykorzystania paliw jądrowych. Dlatego niezbędny jest dalszy rozwój bezpiecznych i efektywnych technologii jądrowych, zdolnych do zaspokojenia potrzeb energetycznych przyszłych pokoleń. Recenzowana praca jest elementem takiego rozwoju i dlatego należy uznać, że tematyka podjętych badań jest zasadna. Otrzymane wyniki są jednak dosyć ograniczone, zarówno pod względem praktycznym jak i naukowym, tak więc przydatność pracy pozostaje dyskusyjna.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa jest zawarta na 95 stronach i składa się ze Spisu treści, Spisu symboli, Streszczenia w języku angielskim, Streszczenia w języku polskim, siedmiu rozdziałów, Wykazu literatury (57 pozycji), Spisu rysunków (39 pozycji) oraz Spisu tablic (12 pozycji).

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy i zawiera krótki opis historii rozwoju reaktora DFR (ang. *Dual Fluid Reactor*) oraz przybliży ogólne zasady działania trzech reaktorów czwartej generacji (SFR, LFR i MSR) z których DFR się wywodzi. Autor przedstawia również główną tezę rozprawy o sterowaniu reaktywnością i wymianą ciepła w reaktorze za pomocą zmiany prędkości przepływu ciekłego metalu w rdzeniu reaktora.

Rozdział 2 zawiera opis podstawowych systemów rozpatrywanych w rozprawie. W pierwszej części rozdziału Autor przytacza ogólny opis reaktora DFR oraz jego modeli w skali "mikro" i "mini", które mają służyć do przeprowadzania eksperymentów w warunkach laboratoryjnych. W drugiej części zdefiniowane są podstawowe bezwymiarowe liczby podobieństwa które, zdaniem Autora, mogą być użyte do oceny podobieństwa zjawisk przepływu i wymiany ciepła w systemach laboratoryjnych i w reaktorze DFR.

Rozdział 3 zawiera krótki opis programu komputerowego CATHARE, służącego do obliczeń

cieplno-przepływowych przeprowadzonych w rozprawie, oraz metody analitycznej ECM (ang. *Equivalent Circuit Method*), użytej do wyprowadzenia uproszczonego modelu pompy magneto hydrodynamicznej.

W Rozdziale 4 zamieszczony jest opis metod optymalizacji pompy w celu minimalizacji natężenia prądu zasilającego.

Rozdział 5 zawiera wyniki obliczeń cieplno-przepływowych wykonanych za pomocą programu komputerowego CATHARE.

Rozdział 6 poświęcony jest walidacji metody ECM oraz optymalizacji pompy magneto hydrodynamicznej.

Wnioski końcowe ze wskazaniem obszarów dalszych badań zamieszczone są w Rozdziale 7.

3. Osiągnięcia

- Optymalizacja pompy magneto hydrodynamicznej.
- Publikacja naukowa w czasopiśmie *Annals of Nuclear Energy*.

Rozprawa wskazuje na wymagany rozwój i pomaga w identyfikacji dalszych kierunków badań niezbędnych dla zaprojektowania bezpiecznego i optymalnego reaktora DFR.

4. Ogólna ocena rozprawy

Zarówno zawartość jak i konstrukcja rozprawy budzą szereg istotnych wątpliwości. Jej tytuł sugeruje, że ma ona dotyczyć regulacji reaktywności w reaktorze DFR przy użyciu układu pomp. Tymczasem już w samym streszczeniu rozprawy nacisk jest kładziony na zagadnienie skalowania wymiany ciepła w reaktorze DFR przy użyciu modeli w mniejszej skali, testowanych w warunkach laboratoryjnych, oraz na zagadnienie optymalizacji geometrii pompy magneto hydrodynamicznej pod względem minimalizacji natężenia prądu zasilającego pompę. Zagadnienie sterowania reaktywnością reaktora zostało wspomniane dopiero w trzecim akapicie streszczenia, co sugeruje, że nie jest ono głównym tematem rozprawy. Potwierdza to zresztą zawartość rozprawy, gdyż zagadnienie to nie zostało poruszone w żadnym z rozdziałów, oprócz wstępu i wniosków końcowych. Najbliższy prawdzie opis zawartości rozprawy jest zamieszczony na stronie 24, Rys. 1.6, gdzie Autor stwierdza, iż główne zagadnienia poruszone w pracy to "projektowanie i modelowanie układu pomp dla reaktora DFR" oraz "problem skalowania przy użyciu programu obliczeniowego CATHARE".

Rozdziały 1-4 mają charakter odtwórczy i prezentują, w dużej mierze, informacje na poziomie podręcznikowym. Przytoczone na stronie 29 równanie transportu neutronów nie jest w rozprawie nigdzie używane i mogłoby zostać pominięte bez uszczerbku dla pracy. Podobnie rzecz się ma z równaniem Naviera-Stokesa na stronie 31 oraz równaniami magneto hydrodynamiki na stronie 34. Natomiast pominięty został bardziej szczegółowy opis programu komputerowego CATHARE. W szczególności powinny być zamieszczone informacje na temat równań zachowania i modeli użytych w obliczeniach zaprezentowanych w rozprawie.

Rozdział 5 poświęcony jest zagadnieniu skalowania i podobieństwa zjawisk cieplno-przepływowych w reaktorze DFR. Zaprezentowane podejście nie jest jednak poprawne i nie prowadzi do poprawnych wniosków. Wyciąganie wniosku o podobieństwie systemów na podstawie równości liczby Nusselta jest błędne, gdyż liczba Nusselta jest nieokreślającą liczbą podobieństwa, gdy tymczasem o podobieństwie systemów, zgodnie z teorią podobieństwa, decydują liczby

określające. Takimi liczbami są na przykład liczba Reynoldsa, liczba Prandtla i liczba Grashofa. Zgodnie z III twierdzeniem teorii podobieństwa liczba Nusselta jest funkcją liczb określających. Tak więc, jej wartość jest skutkiem podobieństwa, a nie jego przyczyną.

Optymalizacja pompy magneto hydrodynamicznej jest najlepiej dopracowaną częścią rozprawy. Metody użyte w tym celu oparte są na rozwiązaniach zaczerpniętych z literatury (np. zastosowanie metody ECM do optymalizacji pompy magneto hydrodynamicznej z prądem stałym (DC MHD) zaczerpnięte jest z publikacji *Lee, G.H. and Kim, H.R., Design analysis of DC electromagnetic pump for liquid sodium-CO₂ reaction experimental characterization, Annals of Nuclear Energy, 109(2017)490-497* oraz na publikacji własnej Autora (*Nowak, M., Spirzewski, M. and Czerski, K., Optimization of the DC magneto hydrodynamic pump for the Dual Fluid Reactor, Annals of Nuclear Energy, 174(2022)109142*). Celem optymalizacji było wyznaczenie geometrii pompy DC MHD o przekroju prostokątnym przy której wymagane jest minimalne natężenie prądu zasilającego. Kluczowym równaniem w procesie optymalizacji jest bilans spadku ciśnień w pętli obiegowej wraz z pompą, czyli równanie (3.3) w rozprawie, w którym założono, że pętla obiegowa ma takie same wymiary geometryczne jak pompa, lecz inną długość. Nasuwa to przypuszczenie, że podczas optymalizacji rozmiarów pompy podlegały zmianie również rozmiary pętli. Podejście to zasadniczo różni się od modelu zaprezentowanego w publikacji referencyjnej [Lee and Kim, 2017], gdzie opór hydrauliczny pętli był stały i opisany w równaniu (17) współczynnikiem oporu K_1 .

Autor nie ustrzegł się przed popełnieniem dosyć elementarnych błędów. W równaniach różniczkowych cząstkowych użyty jest niepoprawny znak różniczki cząstkowej: δ zamiast ∂ . W równaniu zachowania energii (2.3) człon przedstawiający źródła energii Q przedstawiony jest jako "współczynnik wymiany ciepła na jednostkę objętości". Na Rys. 2.6 przepływ przejściowy między przepływem laminarnym a turbulentnym nazwany jest "przepływem krytycznym". W równaniu (2.7) konwekcyjny strumień ciepła (a więc wielkość fizyczna) jest nazywany "konwekcją wymuszoną" (co jest zjawiskiem fizycznym).

Podsumowując, rozprawa reprezentuje niski poziom i zawiera szereg wątpliwych pod względem merytorycznym sformułowań. Wartość rozprawy zawiera się głównie w tym, iż Autor podjął w niej istotne zagadnienia związane z rozwojem i projektowaniem reaktora DFR. Zastosowanie programów komputerowych i modeli dotyczących optymalizacji pompy magneto hydrodynamicznej niewątpliwie wymagały zaangażowania i kompetencji ze strony Autora. Jednak uzyskane wyniki pracy, zarówno ich praktyczna przydatność jak i naukowa ścisłość, wzbudzają istotne wątpliwości.

5. Uwagi szczegółowe i edytorskie

Strona 11: znaczenie skrótu DFR(m) powinno być wyjaśnione.

Strona 18 wiersz 2 od dołu: jest "... several advantages several advantages ..."

Strona 22: znaczenie skrótu IROI powinno być wyjaśnione.

Strona 26 wiersz 2 od dołu: jest "... Hot Pipe Microreactor ..."; powinno być "... Heat Pipe Microreactor ...".

Strona 29 wiersze 8-9 od dołu: jest "... they have a much higher conductivity than other materials, so they store heat much better ..."; przewodność właściwa (conductivity) nie ma związku ze zdolnością magazynowania ciepła (heat storage).

Strona 31 wiersz 5 od dołu: jest "... Q is the heat transfer coefficient per unit volume ..."; powinno być "... Q is the heat source per unit volume ...".

Strona 32, Rys. 2.6: jest "Critical flow"; powinno być: "Transition flow".

Strona 33, wiersz 8 od dołu: jest "... coefficient of heat transfer coefficient ..."; powinno być "... heat transfer coefficient ...".

Strona 33, równanie (2.7) błędnie przedstawia definicję współczynnika wymiany ciepła jako

stosunku "konwekcji wymuszonej" do różnicy temperatur ścianki i ciekłego metalu.

Strona 40, wiersze 1-3 od dołu: jest "... *Navier-Stokes equations, a set of partial differential equations that describe the conservation of mass, momentum, and energy in fluid ...*". Równanie Naviera-Stokesa dotyczy tylko zachowania pędu w płynie.

Strona 57: Tablica nie posiada tytułu i numeru.

Strona 59: Tablica i rysunek nie posiadają opisów i numerów.

Strona 60 wiersz 2 od góry oraz Rys. 5.6 na stronie 61: "*forced convection*", czyli konwekcja wymuszona użyto zamiast "*convective heat flux*" - konwekcyjny strumień ciepła.

Strona 62 wiersz 1 od dołu: jest "... *Nusselt number increases (that is, the kinetic energy of the system increases)*...". Wartość liczby Nusselta nie ma związku z wartością energii kinetycznej systemu.

Strona 68 wiersz 10 od góry: jest "... *condensing pump ...*"; powinno być "... *conducting pump ...*".

Strona 70: w Tablicy 6.1 nie podano jednostek wymienionych wielkości fizycznych.

Strona 72: w Tablicy 6.2 nie podano jednostek wymienionych wielkości fizycznych.

Strona 74, Tablica 6.3: współczynniki a_L , b_L , itd. powinny mieć podane jednostki. Uwaga ta dotyczy również współczynników zamieszczonych w Tablicach 6.4 i 6.5.

Strona 81 wiersz 4 od góry: jest "... *it was proven that changing the flow rate affects reactivity ...*". Nigdzie w rozprawie nie wykazano, że zmiana przepływu (chłodziwa? paliwa?) wpływa na reaktywność (reaktora).

Strona 89: pozycja literaturowa [Polidori and Kadri, 2012] ma niekompletny i niepoprawny zapis.

Strona 90: pozycja literaturowa [Voorde and Division, 1983] ma niekompletny i niepoprawny zapis.

6. Uwagi krytyczne dotyczące struktury i treści rozprawy

Następujące zagadnienia wymagają dodatkowych i uzupełniających wyjaśnień:

1. Jednoznaczne i jasne sformułowanie przedmiotu badań, konsekwentnie odzwierciedlone w tytule rozprawy, jej streszczeniu i zawartości. Zamieszczenie wniosków odnoszących się do rzeczywistych osiągnięć uzyskanych w pracy.
2. Pełny i wyczerpujący przegląd wiedzy (*state-of-the-art*) w dziedzinie podjętych badań. Jeśli badania mają dotyczyć regulacji reaktywności w reaktorze DFR, przegląd powinien dotyczyć tego zagadnienia.
3. Pełny i wyczerpujący opis użytych narzędzi. Jeśli tym narzędziem jest program komputerowy, opis powinien zawierać zestaw tych równań i modeli zaimplementowanych w programie, które mają wpływ na uzyskane wyniki.
4. Ocena podobieństwa zjawisk przepływu i wymiany ciepła w systemach o różnych skalach wymaga zastosowania metod znanych z teorii podobieństwa, a w szczególności, powinna się opierać na jej trzech podstawowych twierdzeniach.
5. Optymalizacja geometrii pompy magnetohydrodynamicznej pracującej w pętli powinna się odbyć przy założeniu stałej charakterystyki hydraulicznej tej pętli.

7. Wnioski końcowe

Praca doktorska mgr Mateusza Nowaka w stopniu minimalnym prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Autora w dyscyplinie naukowej fizyka i w stopniu minimalnym potwierdza jego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a więc, również w stopniu minimalnym spełnia podstawowe wymogi uzyskania stopnia doktora zgodnie z zapisem Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce", Art. 187.

Biorąc powyższe pod uwagę, oraz ze względu na oryginalność i stopień złożoności podjętych badań, w tym poziom kompetencji potrzebnych do ich przeprowadzenia, wnioskuję do Rady Naukowej Narodowego Centrum Badań Jądrowych o dopuszczenie mgr Mateusza Nowaka do dalszego etapu postępowania doktorskiego.

