Dr hab.inż. Elżbieta Fornalik-Wajs, prof. AGH Kraków, 16.10.2023

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. Nairi Baghdasaryan**

„*Modelling and Uncertainty Quantification of Nuclear Fuel Performance in HTGR*”

**1. Wybór tematu**

Jednym z możliwych kierunków rozwoju energetyki jądrowej są technologie związane z rekatorami IV generacji. Badania dotyczące tych technologii z punktu widzenia bezpieczeństwa działania czy zwiększenia sprawności są i będą niezbędne do ich zastosowania w przyszłości. W zakresie zagadnień związanych ze sprawnością układów są problemy nie tylko odnoszące się do transportu masy, pędu i energii, ale także do ilości generowanej energii, a więc do samego paliwa.

Tematyka pracy dotycząca analiz wydajności paliwa wykorzystywanego w reaktorach wysokotemperaturowych chłodzonych gazem (High Temperature Gas Reactor HTGR) wpisuje się w aktualne tredny badawcze i może przyczynić się do rozwoju wspomnianej technologii. Aczkolwiek temat pracy wskazuje na znacznie szersze ujęcie tematu niż zostało to przedstawione w pracy.

**2. Ogólna charakterystyka**

Praca została zawarta na 126 stronach. Składa się ze Spisu treści, Listy rysunków, Listy tabel, Listy symboli, Streszczenia w języku angielskim oraz polskim, 5 Rozdziałów oraz Wykazu literatury (137 pozycji).

Rozdział 1 zawiera uzasadnienie podjęcia tematu i przedstawia krótką charakterystykę trójstrukturalnego izotropowego paliwa (tristructural isotropic TRISO). Zdefiniowano w nim główne cele i tezy w postaci sześciu pytań. Rozdział zakończono opisem struktury pracy.

Rozdział 2 obejmuje przegląd literatury podzielony na dwa podrozdziały związane odpowiednio z reaktorami typu HTGR, będącymi jednostkami eksperymentalnymi, prototypowymi lub koncepcyjnymi oraz z zakresem badań nad wydajnością paliwa TRISO. Opisano zajwiska decydujące o wydajności paliwa z punktu widzenia materiałowego, chemicznego i mechanicznego. Rozdział podsumowano kilkoma rekomendacjami kierunków przyszłych badań.

Rozdział 3 odnosi się do analizy zjawiska wzrostu ciśnienia w paliwie typu TRISO. W rozdziale tym znalazł się opis bloku paliwa dla reaktora Gas Turbine Materials Testing Reactor (GT-MTR), który stał się wzorcem do przeprowadzonych badań modelowych. Dla paliwa UCO oraz UO2 przedstawiono wyniki analiz współczynnika mnożenia neutronów oraz koncentracji gazów Kr, Xe i He. Zaprezentowano obliczenia koncentracji gazu CO metodami Prokscha i Homana. Następnie przedstawiono sposób określenia wzrostu ciśnienia na podstawie równania Redlicha-Kwonga oraz wyniki opisujące udział poszczególnych gazów w ciśnieniu całkowitym. Kolejnym zreferowanym aspektem badań była ocena maksymalnych naprężeń oraz wyznaczenie wskaźnika uszkodzenia paliwa (failure fraction) z wykorzystaniem równania Weibulla. Rozdział zakończono krótkim podsumowaniem.

Rozdział 4 przybliża zagadnienia oceny niedokładności analizy wydajności paliwa TRISO. Zawarto w nim informacje dotyczące reaktora Advanced Gas Reactor 2 (AGR-2), który dostarczył danych eksperymentalnych wykorzystanych przez Doktoranta w badaniach. Przedstawiono charakterystykę analizowanych przypadków oraz wyniki obliczeń. Rozdział zakończono podsumowaniem i dyskusją wyników.

Rozdział 5 zawiera wnioski końcowe.

Całość pracy została podsumowana rekomendacjami co do kierunku dalszych prac.

**3. Ogólna ocena**

Ocena wydajności paliw w całym cyklu pracy stanowi trudne i złożone zagadnienie, ponieważ wiąże ze sobą obszary inżynierii materiałowej, mechaniki, neutroniki i termohydrauliki. Wszystkie te obszary mają wpływ na stan paliwa i warunki, w których ono się znajduje. Doktorant wspomina o tych różnych aspektach, ale badania dotyczyły tylko jednego z nich, a mianowicie wzrostu ciśnienia i jego oddziaływania mechanicznego. Jak już wcześniej wspomniałam brzmienie tematu wskazuje na szersze ujęcie problematyki.

Niewątpliwie liczba przeprowadzonych obliczeń z przedstawionego zakresu badawczego, zwłaszcza dotyczące oceny ilościowej niedokładności analiz, była ogromna. Trudno jest jednak oszacować znaczenie wyników, gdy nie podano konfiguracji programów Serpent i Bison, informacji dotyczących założeń upraszczających, czy warunków brzegowych. Praca powinna reprezentować poziom wiedzy teoretycznej Doktoranta, a w tym przypadku nie został on wykazany wprost. Jedynie złożoność analizowanego problemu i podejście do jego rozwiązania może wskazywać na osiągniecie odpowiedniego stopnia merytorycznego zaawansowania Doktoranta.

Niemniej jednak praca zawiera ogólną metodykę związaną z analizą wydajności paliwa, przedstawia logiczny ciąg badań od koncentracji różnych gazów wpływających na wzrost ciśnienia, następnie określenie naprężeń maksymalnych oraz niedokładności wielkości związanych z mechaniczną wytrzymałością paliwa. Realizacja pracy wymagała zaangażowania i umiejętności numerycznych ze strony Doktoranta. Kompetencje powinny być jednak lepiej udokumentowane w pracy.

**4. Osiągnięcia**

Za osiągnięcia Doktoranta uznaję:

* podjęcie trudnej tematyki i przeprowadznie badań dotyczących wydajności paliwa TRISO,
* konstrukcję modeli numerycznych w programie Serpent i Bison, co potwierdza kompetencje wykorzystywania narzędzi numerycznych w analizach paliwa TRISO,
* przeprowadzenie obliczeń w zakresie niedokładności analiz wydajności paliwa TRISO, co pozwoliło na uzyskanie materiału badawczego i porównawczego,
* wskazanie licznych aspektów, które powinny być uwzględniane w dalszych pracach badawczych dotyczących paliwa TRISO.

Powyższe osiągnięcia potwierdzają kompetencje Doktoranta, które są niezbędne w pracy naukowej.

**5. Szczegółowe uwagi krytyczne**

Uwagi wymienione zostały w kolejności ich pojawiania się.

* Str. 13 – fragment zdania „fuel… has ability to achieve high coolant outlet temperatures”. To stwierdzenie pomija rolę chłodziwa i warunków przepływowych, a tym samym nie jest prawdziwe.
* Str. 14 – Sformułowanie celów pracy i hipotez w formie pytań jest niewłaściwe.
* Str. 16-27 – Opis reaktorów typu HTGR w wersji eksperymentalnej, prototypowej czy koncepcyjnej mógłby zostać pominięty, ponieważ nie zawiera żadnych istotnych informacji dotyczących zdefiniowanego problemu bdawczego. Natomiast brak jest opisów reaktorów GT-MTR czy AGR 2, z których dane wykorzystywano w analizach. Ponadto, opis typów reaktorów jest niespójny. Pewien zestaw danych np. moc cieplna, gęstość mocy, warunki obiegu pierwotnego, itp., powinien być zawarty w każdym przypadku.
* Rozdział 2.2 Cytowane są publikacje, które można określić mianem „stare” (wiek XX). Na przykład publikacja [42] prezentująca wyniki dotyczące anizotropii struktury grafitu jest z roku 1964. Pojawia się wątpliwość czy Doktorant właściwie dokonał przeglądu literatury z uwzględnieniem najnowszych doniesień. Dodatkowo przy publikacjach, pochodzących z tego samego okresu lub zbliżonego często pojawia się określenie „recent studies”.

Np. str. 35 - przywołano publikacje z lat 80tych i 90tych XX w., dotyczące kodów do określania produktów rozszczepienia. Nie zostały wspomniane nowsze kody, np. opisane w publikacji:

*Tenglong Cong, Hao Chen, Hanyang Gu, Upgradation of fission gas release model in the nuclear fuel analysis code FuSPAC, Progress in Nuclear Energy 162 (2023) 104775*.

Ponadto brakuje chronologii w przedstawianiu rozwoju podejścia do analizy tego problemu, co pomogłoby wychwycić zmiany i zdefiniować luki, które wymagają dalszych prac.

* Str. 41 – Podsumowanie przeglądu literatury ma formę rekomendacji, co powinno zostać uwzględnione w dalszych badaniach. Z wszystkich wymienionych tylko pierwsza rekomendacja jest spójna z dalszą częścią pracy.
* Rozdział 3.1 Str. 43 – Wspomniane są analizy dla kilku przypadków wypalenia paliwa, ale nie podano dla jakich wartości, ani też nie uzasadniono ich wyboru.
* Str. 44 – Brakuje opisu modelu przygotowanego w programie Serpent. Nie podano jakie dane są wprowadzane do programu. Brakuje również walidacji modelu. Zaprezentowano wartości liczbowe związane z liczbą neutronów na jeden cykl, liczbą cykli, maksymalnym poziomem wypalenia, ale nie uzadniono ich wyboru.
* Str. 45 – Brakuje wyjaśnienia znaczenia kolorów na Rys. 3.1 i 3.2. Nie podano informacji w jaki sposób zdecydowano o rozkładzie pastylek TRISO w kompakcie.
* Str. 46 – Nie podano sposobu wyznaczenia koncentracji gazów Xe, Kr i He, metodyki obliczeń, ani informacji o wykorzystanym oprogramowaniu.
* Str. 48 – Nie podano źródła wzorów 3.1 i 3.2. Brakuje informacji o zakresie temeperaturowym stosowalności wzoru Homana.
* Str. 50 - Nie podano źródła równania 3.5 Redlicha-Kwonga i zakresu jego stosowalności.
* Str. 51 – Brakuje źródła danych zamieszczonych w Tabeli 3.3. Brakuje również informacji w jaki sposób było liczone ciśnienie całkowite.
* Str. 54 – Brakuje informacji o aproksymacji cienkiej warstwy, a zwłaszcza warunków, przy jakich może być stosowana.
* Str. 55 – Brakuje informacji o zakresie stosowalności równania 3.6. Nie wyjaśniono, dlaczego przyjęto wartości 750 MPa i m = 6.84, z czego one wynikają i czy mogą być zastosowane. Nie podano w jaki sposób dokonano obliczeń (jakim oprogramowaniem).
* Str. 57 – Brakuje informacji o osiągnięciach opisanych w publikacjach [127-133].
* Rozdział 4.1, Brakuje opisu programu Bison, szczegółów dotyczących modelu, warunków brzegowych i założeń upraszczających oraz walidacji modelu.
* Str. 59 Wybór kaspuły 5-1-2 został uzasadniony najwyższą fluencją i wypaleniem paliwa UCO. W Tabeli 4.1 znajdują się jednak wyniki o wyższych wartościach, np. kapsuła 2-4-1 czy 2-4-2.
* Str. 60 – Tabela 4.3 zawiera wybrane parametry dla analizy niedokładności. Jednostki w pierwszej kolumnie i pięciu wierszach są niewłaściwe. Nie podano, w jaki sposób określono niedokładności w przypadku gęstości warstwy buforowej, (w Tabeli 4.2 nie podano żadnych wartości). Brakuje informacji o sposobie szacowania niedokładności wyznaczenia promienia rdzenia.
* Rozdział 4.2 – wyniki w tym rozdziale nie powinny być prezentowane jako surowe dane, bo jest ich za dużo i trudno jest rozróżnić jedne od drugich. Sugerowana byłaby konstrukcja mapy przypadków i ich uogólnienie. Rysunki 4.5, 4.11, 4.17, 4.23, 4.33 są takie same, analogicznie jak 4.6, 4.12, 4.18, 4.24 i 4.3, itd. Brakuje interpretacji tego faktu.
* Str. 92, Tabela 4.23 – brakuje informacji o gęstości zewnętrzenj warstwy pirolitycznego grafitu (Outer Pyrolytic Carbon OPyC).
* Str. 108 – Nie można mówić o optymalizacji, jeżeli nie została zdefiniowana funkcja celu.
* Rozdział 4.3 – Trudno jest ocenić wartość przedstawionych wyników, z uwagi na brak brak informacji o uproszczeniach w zastosowanych analizach. Natomiast mogą być one traktowane jako pierwszy krok w kierunku badań nad wydajnością paliwa TRISO.

**6. Uwagi krytyczne wymagające odpowiedzi**

(1) W jaki sposób dokonano wyboru rozkładu przestrzennego pastylek TRISO przedstawionego na Rys. 3.1? Co było przesłanką do takiego wyboru?

(2) Jakie jest fizyczne uzasadnienie znacznie większej koncentracji helu w paliwie UO2 niż UCO?

(3) Str. 50 – wspomniano, że otrzymane wartości koncentracji CO są zawyżone. Co można zrobić, aby urealnić te wartości?

(4) Jakie są warunki stosowalności aproksymacji cienkiej warstwy (approximation of thin shell) i czy zostały one spełnione w prezentowanych badaniach?

(5) Wyniki niedokładności analiz wydajności paliwa oznaczone jako Min Case w wielu przypadkach posiadają większe wartości niż Max Case. W jaki sposób należy interpretować te wyniki?

(6) Rysunki 4.5, 4.11, 4.17, 4.23, 4.33 są takie same, analogicznie jak 4.6, 4.12, 4.18, 4.24 i 4.34… W jaki sposób należy interpretować ten fakt i z czego on wynika?

**7. Uwagi Edytorskie**

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

* Lista symboli zawiera mieszaninę symboli greckich, łacińskich i skrótów. Powinna być uporządkowana. Brakuje jednostek przedstawianych wielkości.
* Nie wszystkie akronimy stosowane w pracy zostały opisane. Pełna lista ułatwiłaby nawigację w pracy.
* W Rozdziale 2.1 jednostki m3 i o C powinny być zapisywane w odpowiedni sposób.
* Str. 51, Rys. 3.9 - na osi rzędnych przedstawione jest paliwo UO2, a w podpisie rysunku – paliwo UCO.
* Rys. 3.8-3.11 – mylące jest użycie kolorów, a dokładniej występuje brak spójności w ich stosowaniu.
* Rozdział 4.1 – W podpisach rysunków powinno być więcej danych, pozwalających na rozróżnienie analizowanych przypadków.
* Rys. 4.14 – W jego podpisie występuje powtórzenie słowa.
* Str. 6.2 – Jest „section 4.4” – powinno być „section 4.3”.
* Brak jest cytowania publikacji [98].
* Spis literatury nie posiada spójnego formatu, brakuje części danych bibliometrycznych.

**8. Wniosek końcowy**

Przedmiotem pracy doktorskiej jest oryginalna analiza wybranego aspektu badań nad wydajnością paliwa w reaktorach HTGR, jako części złożonego interdyscyplinarnego problemu. Wymienione przeze mnie osiągnięcia Doktoranta, wskazują na odpowiedni poziom Jego wiedzy merytorycznej oraz potwierdzają umiejętności numeryczne, co umożliwia prowadzenie samodzielnej pracy naukowej i 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 Kandydata do kolejnych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.