

Warszawa , 7.02.2023 r.

**Prof. dr hab. inż. Konrad Świrski**

**Wydział MEiL Politechniki Warszawskiej**

**Dyscypliny naukowe** : mechanika, budowa i eksploatacja maszyn, energetyka

**Specjalności:** maszyny i urządzenia energetyczne

### **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Hanuska pt „Optimization and transient scenarios of the liquid eutectic metal fuel Dual Fluid Reactor”

Pomimo wielu kontrowersji i różnych strategii transformacji energetycznej, energetyka jądrowa jest obecnie kluczowym elementem przyszłej polskiej strategii energetycznej zgodnie z aktualnie opublikowaną i przyjętą przez KPRM Polityką Energetyczną Polski do roku 2040. Plan budowy pierwszego reaktora w roku 2033 zakłada na dziś budowę dużych reaktorów GEN III +. Na całym świecie trwają intensywne prace w zakresie energetyki jądrowej (pomimo odchodzenia niektórych krajów od tego typu generacji energii) polegające na dalszej budowie reaktorów dużej mocy, poprzez koncepcje wprowadzenia do systemu energetycznego reaktorów typu SMR (przez niektórych te właśnie reaktory uważane są za przyszłościowe rozwiązanie energetyki jądrowej) aż po prace koncepcyjne nad nowymi projektami reaktorów jądrowych (Gen IV) daleko wykraczającymi poza obecny stan techniczny rozwiązań.. Niezależnie od alternatywnych ścieżek rozwojowych, większość naukowców i ekspertów uważa że rola energetyki jądrowej będzie kluczowa dla uzyskania celów „neutrality 2050) i globalnego zmniejszenia emisji CO2 na świecie, niezbędne są więc poszukiwania nowych możliwości rozwojowych.. Recenzowana praca doktorska mieści się więc w tym kluczowym dla rozwoju energetyki jądrowej oraz pośrednio także dla strategii energetycznej Polski zakresie.

#### **1. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Rozprawa jest napisana w języku angielskim i zawiera łącznie 128 stron, w tym 122 strony tekstu podstawowego , podzielonego na 5 rozdziałów , spis literatury , zawierający 71 wielojęzycznych pozycji bibliograficznych (głównie w języku angielskim) zestawionych w kolejności cytowania.

Pracę można zasadniczo podzielić na dwie części merytoryczne:

- *Część pierwszą* teoretyczną ( ogólną ), obejmującą wstęp (Introduction - rozdział 1) , w których przedstawiono ogólne rozważania dotyczące energii jądrowej oraz koncepcję i aktualny status rozwoju reaktorów MSR

- *Część druga* obejmująca rozdział 2-5 która zawiera kluczowe elementy– modele i wyniki symulacji pracy reaktorów MSRE (rozdział 2-3) oraz DFR (rozdział 4-5) za pomocą kodów obliczeniowych SERPENT i TRACE wraz z Podsumowaniem (Summary and Conclusions) .

Struktura pracy jest właściwa i kompletna, ilość cytowanych pozycji bibliograficznych wskazuje na wszechstronne i wyczerpujące przedstawienie aktualnego dorobku naukowego w tej dziedzinie. Kluczowa hipoteza badawcza pracy poświęcona jest modelowaniu procesów przy użyciu kodów SERPENT2 i TRACE w reaktorach MSRE oraz DFR (dual fuel reactor)– innowacyjnej koncepcji reaktora Gen IV łączącego zalety reaktora chłodzonego solą i reaktora ze stopionym metalem. DFR może być interesującą koncepcją Gen IV przewyższającą inne projekty reaktorów i być może będzie to nowy impuls technologiczny dla rozwoju energetyki jądrowej. Autor jak sam podkreśla w pracy skupia się na modelowaniu i analizie reaktora metalicznego ale wykonuje także symulacje reaktora pracującego na stopionych solach (dla celów benchmarkingowych)

Praca napisana jest starannie i bardzo dobrym językiem naukowo-technicznym. Należy stwierdzić na tej podstawie, że Autor rozprawy wykazał się umiejętnością pisania prac o charakterze naukowym. Autor prezentuje zagadnienia bardzo konkretnie, czasami można nawet uznać że dość oszczędnie co powoduje że niektóre zagadnienia mogłoby być opisane nieco dokładniej i szerzej. Z drugiej strony należy docenić konkretność i skupienia na własnych celach badawczych.

## **2. Charakterystyka tematu oraz celu rozprawy**

Cały sektor energetyczny na świecie znajduje się w punkcie przełomowym. Z jednej strony dążenie do zeroemisyjności (europejska polityka Green Deal i rezygnacja z paliw kopalnych zdobywa coraz większą popularność na świecie – warto przeanalizować aktualne tendencje np. w USA) z drugiej zaś bezprecedensowe wydarzenia związane z rosyjską agresją na Ukrainę spowodowały ogromną turbulencję w zakresie kosztów surowców i samej energii elektrycznej (co wzmocniło zainteresowanie rozwojem energetyki atomowej). Energetyka jądrowa na świecie znajduje się więc obecnie w decydującym punkcie rozwojowym – gdzie pojawiają się zarówno szanse i zagrożenia. Z jednej strony polityka niektórych krajów (np. Niemcy) zakłada rezygnację z atomu i oparcie się wyłącznie na odnawialnych źródłach energii (i to jeszcze szybciej niż dotychczas) uzupełnionych o gospodarkę wodorową umożliwiającą wielkoskalowe magazynowanie energii – m.in. dla całkowitego uniezależnienia się od importu paliw kopalnych. Z drugiej strony szereg krajów (jak Chiny) nie tylko kontynuuje ale znacząco rozbudowuje sektor atomowy, traktując go jako priorytetowy dla przyszłości swoich gospodarek. W Polsce energia jądrowa – pochodząca zarówno z planowanych reaktorów Gen III+ jak i nowych koncepcyjnie SMR – ma mieć znaczący udział w bilansie energetycznym w dekadzie po roku 2030. Trwa intensywna dyskusja naukowców i ekspertów – w którym kierunku

ku nastąpi postęp energetyki jądrowej i wielu z nich uważa że jest ona kluczowym i nieuniknionym elementem przejścia do gospodarki zeroemisyjnej. Wskazywana jest także konieczność znalezienia nowych koncepcji rozwojowych reaktorów jądrowych, nie tylko poprzez zmniejszanie ich mocy i większą modułowość konstrukcji (jak w reaktorach SMR) ale także poprzez wprowadzenie do eksploatacji zupełnie nowych koncepcji przełomowych technologii reaktorów – IV Generacji. W tym zakresie wciąż nie ma jednej dominującej technologii, a wszystkie rozwiązania (będące zwykle na poziomie wczesnych etapów koncepcyjnych) wciąż borykają się z fundamentalnymi problemami technicznymi i konstrukcyjnymi. Na tym tle pojawia się koncepcja reaktora DFR (dual fluid reactor – reaktor dwufluidowy) która może być w przyszłości jednym z kierunków rozwojowych energetyki jądrowej. Podjęcie tematu reaktora DFR w rozprawie Tomasza Hanuska, a przede wszystkim jedne z pierwszych przykładów tak zaawansowanego modelowania tych urządzeń, należy traktować jako bardzo interesujące i śmiałe zmierzenie się z nowym tematem badawczym, dotychczasowo nieznanym tylko rozpoznany w opracowaniach badawczych i publikacjach naukowych na świecie. Praca doktorska jest więc nowatorską próbą wyjścia poza obecny stan wiedzy energetyki jądrowej w kierunku analizy nowych, przyszłościowych rozwiązań.

Pozytywnie więc oceniam fakt, że Doktorant podjął tak złożony i bardzo zaawansowany badawczo problem, zajmując się w rozprawie badaniami symulacyjnymi w zakresie nowych projektów reaktorów. Opanowanie na wysokim poziomie analiz, zaawansowanych kodów obliczeniowych pozwala na unikatowe (nie podejmowane do tej pory w otwartej literaturze) modelowanie złożonych układów DFR. Niewątpliwie ten temat i hipotezy badawcze analizowane w pracy będą stanowić istotny przyczynek w dyskusji nad przyszłymi rozwiązaniami w światowym sektorze jądrowym i przyszłych drogach rozwojowych elektrowni jądrowej.

**Biorąc pod uwagę powyższe aspekty praca doktorska mgr inż. inż. Tomasza Hanuska jest aktualna i dotyczy ważnych problemów w energetyce.**

Zaproponowana przez Doktoranta metodyka badań i analiz jest oryginalnym podejściem Autora, służącym do rozwiązania postawionego problemu, a także jest wkładem w rozwój dyscypliny naukowej, której poświęcona jest rozprawa doktorska.

**Postawione przez Autora cele pracy są oryginalne. Przedstawiony problem naukowy jest aktualny i ważny, szczególnie rozpatrując przyszłość energetyki jądrowej i długoterminowych planów badawczych. Zagadnienia naukowe przedstawione w pracy są w ogólności sprecyzowane w sposób wystarczająco jasny.**

### 3. Rozwiązanie postawionego problemu naukowego

Problem naukowy przedstawiony przez Autora został rozwiązany przez szczegółowe analizy proponowanej konstrukcji reaktora przy wykorzystaniu zaawansowanych kodów obliczeniowych energetyki jądrowej.

Za oryginalne osiągnięcia Autora pracy uznałbym:

- szeroka analizę obejmującą zarówno model reaktora na stopione sole (MSR), (takie modele są już dostępne w wynikach poprzednich prac naukowych – ale pozwoliło na weryfikację metod i benchmarking) a następnie model DFR, (który do tej pory nie był prezentowany w literaturze). Weryfikacja wyników otrzymanych w procesie modelowania MSR pozwala na wyciągnięcie wniosków o poprawności modeli i otrzymanych wyników w zakresie reaktora DFR
- weryfikację i dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi wyników dla MSRE co stanowi samo w sobie ważne i oryginalne osiągnięcie naukowe
- cennym osiągnięciem jest zmodyfikowanie kodu źródłowego TRACE dodając dane materiałowe , pokazujące szerokie kompetencje w zakresie możliwości stosowania zaawansowanych kodów symulacyjnych
- budowa modeli i uzyskanie wyników dla zjawisk w reaktorach wykorzystując zarówno metodykę Monte Carlo SERPENT2 jak i obliczenia ciepłno-przepływowo TRACE. Dodatkowo wyniki tych kodów zostały połączone za pomocą własnego kodu doktoranta.
- symulacje reaktorów DFR i MSR ( TRACE) w stanach dynamicznych z kinetyką reaktora wykorzystując współczynniki z własnych obliczeń statycznych. Doktorant przygotował własny wewnętrzny model neutronowy w TRACE korzystając z wewnętrznego języka dla opisów działania automatyki.
- Należy zwrócić uwagę że część prac z niniejszego doktoratu już została opublikowana jak:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454921000840?via%3Dihub>  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.8387>

**Wszystkie te osiągnięcia skłaniają mnie do złożenia wniosku o wyróżnienie pracy.**

### 4. Uwagi i kwestie dyskusyjne

Jako recenzent rozprawy zgłaszam następujące uwagi i kwestie dyskusyjne (*Uwagi ogólne i ewentualne pytania rozszerzające dla doktoranta*) oraz kilka dodatkowych drobnych uwag redakcyjnych – ale od tego typu błędów nikt (nawet zaawansowani i doświadczeni naukowcy) nigdy nie jest wolny i należy to traktować jako rzecz naturalną przy przygotowaniu dużej monografii naukowej. Generalnie praca jest zredagowana bardzo poprawnie i starannie aczkolwiek nieco oszczędnie w opisach.

## Chapter 1 Introduction

- Drobne pytanie - Strona 30: "Based on experience with ARE, the same fuel salt has been used in MSRE" – poproszę o uściślenie. Wydaje się, że to nie jest to samo paliwo.

Fuel salt - MSRE LiF-BeF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>

Fuel salt - ARE: 53.09% of NaF 40.73 % of ZrF<sub>4</sub> 6.18 % of UF<sub>4</sub>

## Chapter 2 MSRE Model

### Rozdział 2.2

Obliczenia dynamiczne z wykorzystaniem TRACE. Rozwój modelu neutronowego z wykorzystaniem modeli automatyki TRACE

- Autor mógłby przedstawić szerzej jak zmieniał kod źródłowy TRACE – technicznie - jaki został wykorzystany kompilator jaki język ?. W jaki sposób dokonano walidacji że się zmiany nie wpływają na TRACE w sposób znaczący ?

### Chapter 2.2.3.

Autor opisuje równania kinetyki punktowej.

- Czy w tym rozdziale jest tylko modelu punktowy dla całego reaktora czy jakieś inne zmiany? Brakuje w mojej ocenie w pracy opisu jak wygląda to w przypadku zastosowania wielu kanałów - czy stosowana jest średnie równanie kinetyki punktowej czy liczone jest kilka równań kinetyki punktowej?
- W późniejszej części pracy wprowadzana jest „ważność” (importance) neutronowa, ale dalej nie są jawnie pokazane równania, które są rozwiązywane wykorzystując to importance. Szczególnie biorąc pod uwagę, że autor rozwija modele TRACE o różnej nodalizacji i ilości kanałów chłodzących. (Dotyczy to też rozdziału 3 i dyskusji wyników TRACE dla modeli MSRE jak i dla DFR)

## Chapter 3: Symulacje wyniki dla MSRE

Rozdział 3.1.3 Strona 72.

- prośba aby Autor mógł opisać jak SERPENT wykonuje reprocessing paliwa. Nie jest to typowa opcja dlatego możnaby ten opis poszerzyć

## Chapter 4: Model DFR

Strona 84: "It can be seen that the reactivity coefficient is going to be more negative with higher burnup. It is because, during burnup, the amount of fission products increases with time."

- Czy autor ma na myśli wyższe aktywnowce (higher activeds/ minor actinides) czy produkty rozszczepienia. Możliwe, że mylone są pojęcia?

Strona 85. W Tabeli 22 podane jest wartość wypalenia 59.6.

- Co wpływa na maksymalne wypalenie DFR. Jakie czynniki, czym się różni od innych reaktorów. Czemu akurat wybrano takie wartości wypalenia? Jakie są możliwości DFR?

Strona 85. 2 akapit.

- Czy dla DFR są proponowane jakieś rozwiązania techniczne na wypadek krzepnięcia/solidyfikacji chłodziwa/paliwa? Jak tego unikać? Jak duży potencjalnie jest to problem? Czy chwilowy spadek temperatury wpływa na to i czy można sobie pozwolić na stany przejściowe z „chwilowymi” temperaturami poniżej temperatury krzepnięcia.

Strona 86. Rozdział 4.1.3.

- Dlaczego autor zdecydował się zmienić grubość reflektora. Jakie były przesłanki?

#### Chapter 4.2.4

Autor wprowadził Nuclear importance.

- Czy takie pojęcie jest stosowane w literaturze czy to jest podejście zaproponowane przez Autora. Nie jest jasne, jak to samo Nuclear importance jest zaimplementowane w równaniach kinetyki. Czy rozwiązywany jest jeden układ kinetyki czy osobne dla każdego kanału i ważona średnia?

Strona 96. Metoda obliczeń kinetyki.

- Czy autor mógłby skomentować podejście liczenia Nuclear importance po całym poziomie axial i osobno po całym radial. Czy nie lepsze wyniki byłby jakby reaktor podzielić na komórki. Co prawda wymagałoby to znacznie więcej obliczeń. Czy zaproponowane przez autora podejście jest zaczerpnięte z literatury?

#### Chapter 4.2.5

- Prośba o dodatkowe rozszerzenie informacji o narzędziu numerycznym dla łączenia TRACE i SERPENT. W czym zostało napisane, jak czasochłonne są obliczenia. Czy sprzężeni działa automatycznie, ręcznie czy pół-manualnie. Jak długo trwały obliczenia i jak duże moce obliczeniowe były potrzebne.

#### Chapter 4.3.4

- Tabela 31 – skąd zostały wzięte dane geometryczne. Zaproponowane arbitralnie?

#### Chapter 5.

Strona 112.

- Czy autor rozważał obliczenia dla większych wartości reaktywności wprowadzonej. Jak zachowałyby się reaktory, gdyby wprowadzić w niego wartości blisko 1\$ i ponad 1\$ i stanie nadkrytycznym na neutronach natychmiastowych? Czy rozwinięte narzędzia pozwalają na analizę takich warunków?

#### Summary/Conclusions

Opis w tej części pracy jest nadzwyczaj oszczędny i ograniczony.

- jakie badania można zrobić dalej w kolejnych krokach badawczych? .
- Jakie jest największe osiągnięcie/osiągnięcia autora w pracy?
- Czy reaktor DFR metaliczny jest lepszy od innych koncepcji DFR?
- Jakie są zalety/wady tej koncepcji względem ogólnie innych reaktorów Generacji IV.

## 5. Ocena pracy jako rozprawy doktorskiej

Biorąc pod uwagę zawartość pracy stwierdzam, że Doktorant w sposób wystarczająco jednoznaczny sformułował problem naukowy, który następnie rozwiązał właściwie przy użyciu metod naukowych. W świetle powyższych uwag, należy uznać, że **postawiona w rozprawie teza została udowodniona**.

Autor pracy model reaktora MSRE oraz DFR wraz z wykonaniem obliczeń ciepłoprzepływowch i neutronowych. Te wyniki i wnioski z pracy należy oceniać wyjątkowo wysoko jako jedne z pierwszych tak kompleksowych badań koncepcyjnych nowych typów reaktorów jądrowych. Zakres i stopień wiedzy Doktoranta w zakresie dyscypliny naukowej, której dotyczy praca, jest wystarczający zarówno w zakresie teoretycznym jak również aplikacyjnym. Na szczególną uwagę zasługuje duża wiedza i znajomość zagadnień z zakresu modelowania matematycznego i korzystania z profesjonalnych kodów symulacyjnych stosowanych w energetyce jądrowej. Doktorant posiada również bardzo dobre opanowanie techniki pisanie prac naukowych oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

## 6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Hanuska pt., „Optimization and transient scenarios of the liquid eutectic metal fuel Dual Fluid Reactor” **spełnia ustawowe wymagania dotyczące rozpraw doktorskich** zawarte w stosownych przepisach, a w szczególności w art. 13 Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z 14.03.2004r.(Dz.U.nr 65,poz.595 wraz z późn. zmianami).

Jest ona oryginalnym rozwiązaniem postawionego przez Autora zagadnienia naukowego i udowadnia opanowanie wiedzy w dyscyplinie naukowej **inżynieria środowiska górnictwo i energetyka**. Potwierdza również umiejętność rozwiązywania problemów naukowych, w związku z powyższym wnioskuję o **dopuszczenie przez Radę Naukową** mgr inż. Tomasza Hanuska **do dalszego etapu postępowania doktorskiego**. Mając na uwadze także osiągnięte wyniki, wysoką jakość i unikatowość prowadzonych badań wnioskuję także do Rady Naukowej o wyróżnienie pracy.



