



Toruń, dn. 15.07.2020

dr hab. Katarzyna Słabkowska, prof. UMK  
Katedra Chemii Kwantowej i Spektroskopii Atomowej  
Wydział Chemii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

## Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Ireny Ivanovej-Stanik „Numerical Studies of Impurity Transport in JET ILW Discharges”

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska „Numerical Studies of Impurity Transport in JET ILW Discharges” mgr inż. Ireny Ivanovej-Stanik, wykonana pod kierunkiem promotora dr hab. Romana Zagórskiego, prof. NCBJ oraz promotora pomocniczego dr Agaty Chomiczewskiej. 134-stronicowa rozprawa, napisana w języku angielskim, podzielona jest na dwanaście ponumerowanych rozdziałów, zawiera wykaz publikacji własnych, spis tabel, listę rysunków oraz bibliografię zawierającą 178 pozycji.

Pani mgr inż. Irena Ivanova-Stanik systematycznie brała udział w kampaniach eksperymentalnych na tokamaku JET (Joint European Torus) w Culham, w Wielkiej Brytanii. Badania na tokamaku JET wpisują się w międzynarodowy program wspierający projekt badawczy ITER (po łacinie "Droga"). ITER jest to największy tokamak kolejnej generacji obecnie budowany w Cadarache we Francji.

Głównym celem rozprawy doktorskiej było modelowanie transportu plazmy oraz zanieczyszczeń w JET-ILW (ITER-like wall) za pomocą kodów COREDIV i ETS (European Transport Solver). ILW oznacza aktualną konfigurację tokamaka JET ze ścianą berylową i wolframowym dywertorem, odpowiadającą przewidywanym warunkom pracy w reaktorze ITER. Badania teoretyczne i modelowanie są niezbędne do ukończenia kamieni milowych w mapie drogowej EUROfusion.

Rozdział pierwszy autorka rozprawy zaczyna od opisu reakcji fuzji termojądrowej, wymienia najbardziej użyteczne reakcje na produkcję energii w reaktorach, aby następnie wprowadzić czytelnika w tematykę reaktorów termojądrowych typu „tokamak”. Wyjaśnia

różnice między dwoma głównymi geometriami pola magnetycznego: limiterem i dywertorem, a także pomiędzy dwoma reżimami utrzymania plazmy (L-mode i H-mode). Następnie opisuje dlaczego w przyszłych urządzeniach wykorzystujących reakcję syntezy termojądrowej, takich jak ITER i demonstracyjna elektrownia DEMO, moc docierająca do płyt dywertora będzie stanowić wyzwanie. Ponadto, omawia parametr charakteryzujący utrzymanie energii jakim jest czas utrzymania energii i związane z nim prawo skalowania. W kolejnym kroku przechodzi do zwięzłego opisu tokamaka JET, jego parametrów oraz co najważniejsze, że jest on polem testowym dla reaktora ITER, a w szczególności scenariusze operacyjne zaplanowane dla układu JET-ILW. Na końcu rozdziału autorka przedstawia motywację, cele, tezę oraz strukturę rozprawy. Uważam, że umieszczenie motywacji i zarysu pracy pod koniec rozdziału pierwszego jest dla mnie nietrafione. Dla lepszego zrozumienia pracy korzystniej byłoby przenieść ten podrozdział zawierający motywację i zarys pracy na początek rozdziału pierwszego lub utworzyć na początku rozprawy rozdział wprowadzenie.

Rozdział drugi poświęcony jest źródłom zanieczyszczeń w tokamaku, ich wytwarzaniu oraz głównym procesom atomowym zachodzącym w plazmie. Autorka dzieli zanieczyszczenia na dwie różne kategorie według ich pochodzenia: wewnętrzne i zewnętrzne. Podoba mi się ten zwięzły opis pochodzenia oraz roli zanieczyszczeń, a także procesów atomowych zachodzących w tokamakowej plazmie.

Po tym rozdziale, następuje przejście do zasadniczej części rozprawy, czyli podstaw transportu plazmy. Autorka przedstawia na wstępie różne modele opisu plazmy: jednocząstkowy, kinetyczny, płynowy, czy też hybrydowy (kinetyczno-płynowy) wraz z jawnym omówieniem opisujących je formuł matematycznych. Zwraca również uwagę, że owe formuły zostały zaimplementowane w programie COREDIV, który jest głównym narzędziem badań autorki rozprawy. Następnie skupia się na opisie procesu transportu, definiując klasyczny i neoklasyczny transport zanieczyszczeń oraz transport anormalny.

Rozdział czwarty zawiera opis najważniejszych diagnostyk, które dostarczają informacji na temat parametrów plazmy, stosowanych w symulacjach dotyczących wyładowań na tokamaku JET-ILW. Mgr inż. Ivanova-Stanik wymienia tutaj między innymi rozpraszanie Thomsona w wysokiej rozdzielczości (HRTX), dzięki któremu możliwe jest uzyskanie informacji na temat średnich wartości temperatury i gęstości elektronowej plazmy; sondy Langmuira służącej do pomiaru gęstości i temperatury elektronowej plazmy

na powierzchni dywertora; użycie bolometru, który umożliwia określenie całkowitej mocy promieniowania, jak również wyznaczenie profilu emisji promieniowania wyładowań na JET-ILW. Ponadto, autorka opisuje diagnostykę opartą o pomiar promieniowania hamowania, dzięki któremu można oszacować tzw. ładunek efektywny ( $Z_{EFF}$ ) służący do oceny zawartości zanieczyszczeń w plazmie fuzyjnej; objaśnia także, że informacje o stężeniu zanieczyszczeń można uzyskać przy użyciu różnych aktywnych lub pasywnych technik spektroskopowych, diagnostyki spektroskopowej XUV, VUV, SXR i widzialnego zakresu długości fal, spektroskopii opartej o promieniowanie hamowania oraz spektroskopii rekombinacyjnej z wymianą ładunku (CXRS). Rozdział ten przeczytałam z wielką przyjemnością, uważam, że został napisany spójnie, a zebranie najważniejszych metod diagnostycznych stosowanych na JET-ILW uważam za pomocne i wartościowe.

Modelowanie transportu plazmy ma na celu przewidywanie jakościowe i ekstrapolacje różnych efektów fizycznych, poprzez uruchamianie kodów, wyposażonych w odpowiednio dobrane modele opisu transportu i innych istotnych zjawisk. Mgr inż. Ivanova-Stanik przedstawia w rozdziale piątym zalety i wady poszczególnych kodów numerycznych oraz ich zastosowanie w symulacji procesów fizycznych, występujących podczas wyładowań impulsowych na tokamaku JET-ILW. Opisane kody są posegregowane w różne grupy: kody opisujące brzeg/SOL, centrum oraz kody zintegrowane (centrum + brzeg/SOL), w zależności od części plazmy jaką obrazują. Autorka charakteryzuje tu między innymi kody ETS i COREDIV, które posłużyły do sprawdzenia prawdziwości tezy przedstawionej rozprawy doktorskiej. Ponadto, autorka porównała wyniki z opracowanego przez siebie modułu dla domieszek w kodzie ETS z wynikami uzyskanymi za pomocą standardowego kodu transportu domieszek SANCO, używanego dla tokamaka JET. Weryfikacja została wykonana dla różnych domieszek: Be, C, Ne, W oraz różnych współczynników transportu (dyfuzja i konwekcja) i uzyskano bardzo dobrą zgodność.

W rozdziale szóstym autorka przedstawiła wyniki swoich symulacji dotyczące transportu zanieczyszczeń w tokamaku JET dla konfiguracji ILW. Obliczenia numeryczne wykonano za pomocą kodu COREDIV, w dwóch reżymach pracy tokamaka: z dobrym (H-mode) i słabym (L-mode) utrzymaniem energii, bez uwzględnienia zewnętrznego domieszkowania zanieczyszczeń. Muszę przyznać, że ogólne porównanie symulacji dla dwóch trybów wyładowań (L- i H- mode) z danymi eksperymentalnymi jest zadowalające, zarówno w rdzeniu, jak i w SOL. Ponadto, na podstawie wyników modelowania autorce udało się stwierdzić, że główna część promieniowania, w badanych eksperymentach,

pochodziła z plazmy centralnej i jest zdominowana przez promieniowanie pochodzące od wolframu. Otrzymała ona także informację, że zanieczyszczenia o mniejszej liczbie atomowej  $Z$ , takie jak Be i C, mają wpływ na  $Z_{\text{EFF}}$ , w przypadku wyładowań bez uwzględnienia domieszkowania zanieczyszczeń i nie przyczyniają się do strat promieniowania w rdzeniu plazmowym.

W celu uniknięcia miejscowego przegrzania i uszkodzenia dywertora, opracowywana jest metoda z zewnętrznym domieszkowaniem zanieczyszczeń, w j. ang. określana, jako *impurity seeding*. W ten sposób część strumienia mocy, która dociera do pierwszej ściany i do płyt dywertora, zamieniana jest na promieniowanie. Jest to bardzo pożądany proces, gdyż naturalnie występujące straty promieniowania w układzie JET-ILW, wywołane wyłącznie przez deuter i beryl są zbyt małe i stanowią około 25-30 % dodatkowej mocy grzania. W związku z tym mgr inż. Ivanova-Stanik przedstawiła w rozdziale siódmym serię analiz wpływu zewnętrznego źródła zanieczyszczeń na globalne parametry plazmy. Uzyskane wyniki pozwoliły jej stwierdzić, że zanieczyszczenia o wysokiej liczbie atomowej  $Z$  mogą mieć niekorzystny wpływ na wydajność plazmy. W przypadku zanieczyszczeń o średniej liczbie atomowej  $Z$ , takich jak jony Ni lub Fe, przy większej ilości wtryskiwanego gazu ich stężenie maleje. Można to wytłumaczyć faktem, że wspomniane zanieczyszczenia znajdują się poza obszarem dywertora, w którym bezpośrednio zastosowano iniekcję neonu. Z tego powodu, proces ich uwalniania był prawie nieistotny w porównaniu z wolframem. Ponadto, promieniowanie pochodzące od wolframu maleje wraz ze wzrostem liczby atomowej zanieczyszczeń, przy czym już dla Kr produkcja wolframu praktycznie się zatrzymuje. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że wyniki symulacji przeprowadzonych przez autorkę za pomocą kodu COREDIV były zgodne z tymi uzyskanymi w wyniku analizy danych eksperymentalnych.

W przypadku konfiguracji JET-ILW zintegrowane modelowanie jest bardzo ważne i powinno obejmować nie tylko rdzeń i region SOL, ale także samouzgodnione symulacje źródeł wolframu. Z tego powodu w rozdziale ósmym przedstawiono analizę wpływu grzania dodatkowego na transport zanieczyszczeń w tokamaku JET-ILW, do analizy transportu zanieczyszczeń użyto kodu COREDIV, jak również posłużono się kodem ETS, opisującym sam rdzeń plazmy. Wyniki symulacji pozwoliły stwierdzić, że grzanie dodatkowe odgrywa ważną rolę w transporcie zanieczyszczeń. Degradacja transportu jest większa dla wyższych mocy grzewczych. Silne grzanie prowadzi również do znacznej produkcji wolframu, a w konsekwencji do wysokiego zanieczyszczenia plazmy jonami



wolframu. Dla tej samej średniej gęstości elektronów, zmniejszenie mocy dodatkowej prowadzi do zmniejszenia produkcji wolframu. Czego konsekwencją jest przesunięcie maksimum promieniowania w kierunku obszaru plazmy centralnej. Ponadto, wyniki szczegółowych badań autorki pokazują, że możliwym powodem akumulacji wolframu podczas fazy grzania ICRH (ang. ion cyclotron resonance heating) jest zwiększona koncentracja wolframu w obszarze brzegowym. Autorka wykazuje się dużą wiedzą i znajomością szczegółów eksperymentalnych zarówno fizycznych jak i technicznych związanych z konfiguracją JET-ILW.

W rozdziale dziewiątym mgr inż. Iwanowa-Stanik przeanalizowała, przy użyciu kodu COREDIV, wpływ gęstości elektronowej plazmy na separatrysie na produkcję i transport zanieczyszczeń. Stwierdziła ona, że zaobserwowane zmiany w zachowaniu zanieczyszczeń są związane głównie z poprawą skuteczności ekranowania jonów zanieczyszczeń przy wyższej gęstości separatrysy. Ponadto, wzrost gęstości elektronów na separatrysie prowadzi do zmniejszenia koncentracji wolframu, jak również promieniowania w rdzeniu. Co więcej, zauważyła także, że gęstość separatrysy, będąca parametrem wejściowym kodu COREDIV, wydaje się być bardzo ważną wielkością kontrolującą właściwości plazmy w SOL. Należy podkreślić, że wyniki uzyskane przez autorkę świadczą nie tylko o biegłości w prowadzeniu zaawansowanych obliczeń numerycznych, ale również o dużej wiedzy i intuicji.

Rozdział dziesiąty przedstawia wpływ radialnego transportu zanieczyszczeń w SOL. Autorka opisuje, że transport zderzeniowy nie jest w stanie wyjaśnić współczynników transportu prostopadłego (promieniowego), uzyskanych z pomiarów eksperymentalnych w SOL. W związku z tym, przeprowadzono badania wpływu transportu promieniowego w SOL podczas wyładowań na JET-ILW, z użyciem kodu COREDIV. Zauważono, że większa dyfuzja prowadzi do lepszego ekranowania zanieczyszczeń wolframowych przez plazmę SOL, co powoduje zmniejszenie promieniowania oraz koncentracji wolframu w rdzeniu, jak również  $Z_{EFF}$ .

W rozdziale jedenastym autorka rozprawy opisała wyniki swoich badań, związane z modelowaniem scenariuszy eksperymentalnych na tokamaku JET w konfiguracji ILW, dotyczące wydajnej, deuterowo-trytowej plazmy. Mgr inż. Ivanova-Stanik otrzymała dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi. Wykazała także, że bezpośrednia ekstrapolacja wyników DD (deuter-deuter) do DT (deuter-tryt) wykazuje stosunkowo słabą wydajność

pod względem uzyskanej mocy syntezy. Poprawa nastąpi, jeśli założona zostanie najwyższa moc grzewcza i rozważona zostanie konfiguracja JET z dużym polem magnetycznym i dużym prądem plazmy.

Rozprawa nie jest wolna od drobnych usterek i błędów edytorskich. W wielu miejscach pomiędzy wyrazami brakuje spacji, po równaniach brakuje przecinków lub kropek, a także w wyniku błędu zmieniony jest sens wypowiedzi, jak choćby tytuł podrozdziału 1.2.4. Autorka nie zdefiniowała wszystkich skrótów, którymi posługuje się w rozprawie, a te zdefiniowane, występują w większości wcześniej, przed ich właściwą definicją, ponadto pewne skróty są błędnie wprowadzone: jest CERS, a powinno być CXRS. Użyte czcionki do opisu osi oraz wartości na osiach większości schematów i wykresów są zbyt małe, co powoduje, że informacje w nich zawarte są praktycznie nieczytelne, jak np. na rysunku 6.4b. W mojej opinii, rysunek 7.20 powinien zostać przeniesiony do podrozdziału 7.4, a nie być umieszczony w sekcji 7.5 Podsumowanie. Zdarza się, że autorka cytuje w tym samym miejscu, w nawiasach klamrowych dwa razy tę samą pracę. Do cytowania większej liczby artykułów stosowane są osobne nawiasy klamrowe, a czasami pojedynczy nawias klamrowy. Na stronie 111, zdanie w akapicie bezpośrednio nad tabelą 11.1, w którym mgr inż. Ivanova-Stanik wymienia różne wartości parametrów jakie zakładała w swoich badaniach nie jest do końca zrozumiałe. Ponadto rozprawa, napisana w języku angielskim, nie jest wolna od błędów językowych.

Jednakże, przedstawione powyżej uwagi nie pomniejszają mojej pozytywnej opinii o rozprawie, a w szczególności wysokiej oceny wartości naukowej zaprezentowanych w niej wyników. Autorka wykonała serię analiz mających na celu określenie dokładności i stabilności różnych metod numerycznych przy rozwiązywaniu równania transportu domieszek. Badała ona również rodzaj i intensywność domieszkowania różnymi gazami. Analizowała wpływ zewnętrznych oraz wewnętrznych zanieczyszczeń plazmy, na przebieg wyładowań w tokamaku JET. Pozwoliło to uzyskać bardzo wartościowe wyniki w dziedzinie badań nad kontrolowaną syntezą termojądrową. Autorka określiła wpływ jonów domieszek na główne parametry plazmy, takie jak: czas utrzymania energii, całkowite promieniowanie plazmy, rozkłady gęstości plazmy i domieszek, rozkład temperatury, ładunku efektywnego oraz redukcję strumienia energii do płyty dywertora. Określiła wpływ radialnego transportu cząstek w obszarze brzegowym. Ponadto, zbadała wpływ podstawowych parametrów wyładowania takich jak gęstość plazmy, prąd plazmy oraz moc dodatkowego grzania na zachowanie zanieczyszczeń. Autorka wykazała się dobrym warsztatem przy wykonywaniu

obliczeń numerycznych dla parametrów plazmy w różnych fazach wyładowania (np., ramp-down, steady-state), w różnych reżimach pracy tokamaka: z niskim (L-mode) i wysokim utrzymaniem energii (H-mode). Mgr inż. Irena Ivanova-Stanik przyczyniła się do osiągnięcia znacznego postępu w dziedzinie dzięki szczegółowemu modelowaniu i symulacji ewolucji plazmy, oraz badaniu wpływu plazmy na materiały wewnętrznej ściany reaktora. Ponadto modelowanie to pozwoliło na lepsze zrozumienie złożonych mechanizmów fizycznych, które rządzą dynamiką plazmy i przyczyniają się do zmniejszenia obciążeń energetycznych płyt dywertora. Mgr inż. Irena Ivanova-Stanik udowodniła, że analiza transportu zanieczyszczeń może być przeprowadzona przy użyciu kodu COREDIV w sposób niezawodny i szybki w porównaniu z innymi kodami. Dlatego też do jednego z istotnych wyników prowadzonych badań opisanych w pracy doktorskiej należy zaliczyć zaimplementowanie metody opisującej transport domieszek z kodu COREDIV do nowego europejskiego kodu transportu (ETS), opracowywanego przez zintegrowaną grupę zadaniową ds. modelowania tokamaka (ITM-TF), do której należała Pani Irena Ivanova-Stanik. Dzięki temu kod ETS został po raz pierwszy zastosowany do symulacji transportu zanieczyszczeń w tokamaku JET. Na podkreślenie zasługuje fakt, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska bazuje na czternastu wieloautorskich publikacjach z listy filadelfijskiej, których współautorką jest mgr inż. Irena Ivanova-Stanik. Ponadto, część wyników badań została zaprezentowana także na konferencjach międzynarodowych. Chciałabym również zauważyć, że uzyskane wyniki mają fundamentalne znaczenie w dziedzinie badań nad kontrolowaną syntezą termojądrową i stanowią istotny wkład w rozumienie fizyki plazmy. Przyczyniają się także do opracowania scenariuszy operacyjnych przyszłych urządzeń fuzyjnych ITER i DEMO, w celu wytworzenia dodatniego bilansu energetycznego. Modelowanie plazmy stanowi nieodzowny element w projektowaniu przyszłych przemysłowych reaktorów fuzyjnych, które mają zapewnić niewyczerpalne oraz bezpieczne źródło energii dla całej ludzkości.

Problemy do dyskusji na obronie mogą dotyczyć: (1) charakterystyki napisanego przez kandydatkę oprogramowania oraz (2) metodyki przeprowadzania symulacji.

Podsumowując, w mojej opinii rozprawa doktorska mgr inż. Ireny Ivanovej-Stanik spełnia warunki określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (z późn. zm.) i w związku z tym, wnoszę o dopuszczenie kandydatki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.