

Warszawa, 20 kwietnia 2015 r

Dr hab. inż. Antoni Rozeń  
Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej  
Politechnika Warszawska



## OPINIA

**o pracy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Orszulik**

**pt. „Modelowanie procesów rozprzestrzeniania się wybranych czynników w obudowie bezpieczeństwa reaktora PWR po awarii LOCA”**

**wykonanej w Instytucie Techniki Ciepłej na Wydziale Inżynierii Środowiska  
i Energetyki Politechniki Śląskiej**

**promotor: prof. dr hab. inż. Jan Składzień**

**promotor pomocniczy: dr inż. Adam Fic**

### **1. Charakterystyka pracy**

Przedmiotem recenzowanej pracy autorstwa mgr inż. **Magdaleny Orszulik** jest opracowanie i walidacja modeli matematycznych, wykorzystujących metody obliczeniowej mechaniki płynów, do opisu przebiegu procesów cyrkulacji gazu oraz transportu energii i masy wewnątrz obudowy bezpieczeństwa reaktora jądrowego lekkowodnego typu PWR (Pressurized Water Reactor) w różnych stadiach awarii, polegającej na rozszczelnieniu obiegu chłodzenia reaktora, czyli tzw. awarii LOCA (Loss of Coolant Accident). Dokładniej rzecz ujmując, jak to przedstawiono w rozdziale 1, rozprawa poświęcona jest modelowaniu numerycznemu: przebiegu wstępnej i rozwiniętej fazy awarii LOCA, pracy pojedynczego pasywnego, autokatalitycznego rekombinatora wodoru oraz działania układu tych rekombinatorów wewnątrz obudowy bezpieczeństwa reaktora jądrowego.

Zakres pracy, nakreślony we wstępie, obejmuje modelowanie za pomocą pakietu obliczeniowej mechaniki płynów Ansys Fluent przebiegu eksperymentów przeprowadzonych w instalacjach testowych służących do badania: cyrkulacji i przemian fazowych wody, rozprzestrzeniania się wodoru i transportu ciepła w obudowie bezpieczeństwa reaktora jądrowego oraz procesu katalitycznej rekombinacji wodoru. W ramach pracy podjęto się również przeprowadzenia symulacji numerycznej oraz analizy efektywności działania układu kilku katalitycznych rekombinatorów wodoru zainstalowanych w tzw. układzie lokalizacji awarii.

We wstępie znajduje się także uzasadnienie podjęcia pracy badawczej. Otóż praca dotyczy problemów związanych z bezpieczną eksploatacją elektrowni jądrowych wyposażonych w

reaktory lekkowodne, a zwłaszcza przeciwdziałaniu generacji i rozprzestrzeniania się łatwopalnego wodoru w budynku reaktora.

Podjęcie się przez Autorkę rozprawy tematyki związanej z rozprzestrzenianiem się wodoru w obudowie bezpieczeństwa reaktora i jego usuwaniem w drodze katalitycznej rekombinacji z tlenem uważam za w pełni uzasadnione zarówno ze względów praktycznych (planowana w Polsce budowa elektrowni jądrowej) jak i z naukowego punktu widzenia.

Praca napisana jest w języku polskim i liczy 136 stron. Rozprawa ma czytelną strukturę odzwierciedlającą jej zakres, przedstawiony we wstępie. Po spisie treści oraz wykazach rysunków, tabel i ważniejszych oznaczeń, użytych w pracy, mamy omówiony wcześniej rozdział 1 pt „Wstęp, cel pracy”, liczący 4 strony. W rozdziale 2 pt. „Zagrożenia awaryjne w układach reaktorów wodnych i sposoby zapobiegania skutkom awarii LOCA”, liczącym 18 stron, Autorka przedstawiła przegląd literatury dotyczący dwóch podstawowych zagrożeń awaryjnych: odbioru ciepła powyłączeniowego reaktora oraz generacji i rozprzestrzeniania się wodoru w budynku reaktora. Przedstawiono również w oparciu o liczne cytowania publikacji naukowych schemat typowej awarii rozszczelnieniowej oraz przebieg trzech rzeczywistych awarii LOCA, wskazując na bardzo złożony charakter tego zjawiska, związany z występowaniem procesów cyrkulacji gazu, mieszania konwekcyjnego, dyfuzyjnego i separacji grawitacyjnej składników gazu, przemian fazowych, przepływu dwufazowego oraz transportu i wymiany ciepła z otoczeniem. Autorka, kontynuując przegląd literatury, przedstawiła stosowane obecnie układy lokalizacji awarii LOCA oraz niektóre metody aktywnego i pasywnego usuwania wodoru z budynku reaktora. Omawiany rozdział pracy stanowi w mojej opinii dobre wprowadzenie czytelnika w tematykę związaną z wybranymi zagrożeniami awaryjnymi pracy reaktorów lekkowodnych i metodami ich eliminacji.

Na zasadniczy trzon pracy składają się cztery kolejne rozdziały: pierwsze dwa poświęcone są modelowaniu wstępnej i głównej fazy awarii LOCA, a pozostałe dwa rozdziały dotyczą modelowania katalitycznego rekombinatora wodoru typu płytowego oraz układu kilku takich rekombinatorów umieszczonych w jednym z przedziałów obudowy bezpieczeństwa reaktora.

Na początku rozdziału 3 pt. „Modelowanie przebiegu wstępnej fazy awarii LOCA w obudowie bezpieczeństwa reaktora PWR”, liczącego 24 strony, Autorka przedstawiła krytyczną analizę metod modelowania przebiegu awarii typu LOCA, w oparciu o przegląd wybranych pozycji literaturowych, w których opisano wyniki zastosowania różnych programów komputerowych do symulacji rzeczywistych awarii lub eksperymentów przeprowadzonych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Sformułowana została ogólna charakterystyka kodów obliczeniowych o parametrach skupionych LP (Lumped Parameter) i kodów CFD (Computa-

tional Fluid Dynamics). Przedstawiono również główne źródła błędów związanych z użyciem kodów CFD, co wskazuje, że Autorka jest w pełni świadoma trudności i problemów, z jakim związane jest zastosowanie metod CFD do symulacji awarii LOCA oraz pracy pasywnych autokatalitycznych rekombinatorów wodoru (Passive Autocatalytic Recombiner, PAR). W dalszej części rozdziału 3 zaprezentowano wyniki modelowania CFD przebiegu eksperymentu CASP-3, symulującego rozszczelnienie obiegu chłodzenia reaktora i wydostanie się do obudowy bezpieczeństwa strumienia gorącej wody. Do modelowania przepływu dwufazowego w układzie doświadczalnym zastosowano uproszczoną wersję modelu typu Euler-Euler (tzw. mixture model), w którym ruch faz gazowej i ciekłej opisuje się w przestrzeni fizycznej, zakładając ich ciągłość i wzajemne przenikanie się. Natomiast do opisu procesów odparowania i kondensacji wody użyto modelu Hertza-Knudsen. Oba modele są dostępne w pakiecie do obliczeń CFD Ansys Fluent. Model Hertza-Knudsen jest modelem mechanistycznym, który wymaga założenia m.in. odpowiedniej wartości tzw. współczynnika akomodacji zarówno dla procesu odparowania jak i kondensacji, co też uczyniono w drodze analizy wyników doświadczalnych dostępnych w literaturze przedmiotu. W obliczeniach uwzględniono przewodzenie ciepła przez ścianki układu i konwekcję naturalną ciepła do otoczenia. Symulacje numeryczne przebiegu eksperymentu CASP-3 przeprowadzono w uproszczonej dwuwymiarowej geometrii układu, stosując siatki obliczeniowe o różnej gęstości. W efekcie uzyskano rozkłady temperatury mieszaniny dwufazowej i ścianek układu oraz wydajności procesów odparowania i kondensacji objętościowej wody. We wnioskach kończących rozdział 3 wskazano, że ze względu na dużą zmienność lokalnych parametrów stanu i składu gazu efektywne zastosowanie metod CFD do modelowania wstępnej fazy awarii LOCA wymaga siatek obliczeniowych od dużej gęstości i kroków czasowych nie dłuższych niż 0,1 s. Podkreślono konieczność kontroli globalnego bilansu masy w modelowanym układzie, zastosowania zmiennego ciśnienia odniesienia w celu uniknięcia błędów zaokrągleń oraz właściwego doboru parametrów modelu Hertza-Knudsen. Szkoda, że Autorka rozprawy nie przedstawiła w omawianym rozdziale porównania zmierzonych i obliczonych zmian temperatury i ciśnienia, czy też współczynnika wnikania ciepła w różnych punktach układu, podobnie jak to uczyniła w swojej wcześniejszej publikacji pt. „Model numeryczny i analiza cieplno-przepływowa eksperymentu CASP-3” (Modelowanie inżynierskie, 37, s. 233, 2009 r.). Takie porównanie pozwoliłoby na rzeczywistą weryfikację poprawności modelu CFD.

W rozdziale 4 pt. „Modelowanie przebiegu fragmentu rozwiniętej fazy awarii LOCA w układzie z reaktorem PWR”, liczącym 10 stron, przedstawiono wyniki modelowania eksperymentu SNU symulującego przedostanie się do obudowy bezpieczeństwa reaktora jądrowego dużej

ilości wodoru i pary wodnej; ze względów bezpieczeństwa w warunkach eksperymentalnych zastąpiono wodór innym lekkim gazem – helem. W trakcie eksperymentu utrzymywano warunki uniemożliwiające kondensację pary wodnej, co ułatwia modelowanie CFD. Kluczową kwestią w tym przypadku był dobór właściwego modelu burzliwości, który poprawnie opisałby dynamikę rozprzestrzeniania się w układzie helu i pary wodnej. Świadoma tego problemu Autorka wykonała obliczenia z zastosowaniem modeli burzliwości:  $k-\epsilon$  i  $k-\omega$  w wersji standardowej oraz  $k-\epsilon$  w wersji dla przepływów o niskich liczbach Reynoldsa (Low Reynolds Number, LRN). Przeprowadzono również symulacje numeryczne przy założeniu, że przepływ w całym układzie ma charakter laminarny. Porównanie obliczonej i zmierzonej historii zmian stężenia helu w różnych punktach układu wykazało jakościową zgodność wyników obliczeń i pomiarów. Z drugiej strony stwierdzono wyraźne niedoszacowanie przez model CFD wartości stężenia helu dla długich czasów eksperymentu. Według Autorki rozprawy ta rozbieżność mogła być spowodowana niedokładnym obliczeniem współczynników dyfuzji molekularnej składników gazu. Niestety nie przedstawiono w rozdziale 4 np. wyników obliczeń parametrycznych, które mogłyby uprawdopodobnić to wyjaśnienie.

Na początku rozdziału 5 pt. „Modelowanie procesów fizyko-chemicznych wewnątrz płaskiego, pasywnego, katalitycznego rekombinatora wodoru”, liczącego 26 stron, przedstawiono budowę i sposób działania stosowanych w praktyce urządzeń PAR oraz przegląd opracowań naukowych poświęconych modelom kinetycznym reakcji rekombinacji wodoru z tlenem w fazie gazowej i na powierzchni katalizatora. Na podstawie analizy krytycznej danych literaturowych wybrano do obliczeń model kinetyczny katalizy heterogenicznej Schefera. W drugiej części rozdziału 5 sformułowano model CFD typowego rekombinatora wodoru o budowie płytowej i przeprowadzono badanie parametryczne oraz walidację modelu w oparciu o dostępne w literaturze przedmiotu dane doświadczalne. W ramach szeroko zakrojonych testów numerycznych wykonano obliczenia zakładając, że przepływ wewnątrz rekombinatora jest laminarny oraz burzliwy, przy czym w tym drugim przypadku przetestowano trzy wersje modelu  $k-\epsilon$ : standardową, „realizable” i dla małych liczb Reynoldsa oraz model  $k-\omega$  w wersji SST (shear-stress transport). Przeanalizowano wpływ wartości burzliwej liczby Schmidta oraz różnych metod obliczania własności fizycznych gazu przepływającego przez rekombinator, m.in. kinetycznej teorii gazów i procedur pakietu CHEMKIN, na wyniki modelowania CFD. W efekcie dobrano taką konfigurację modelu CFD, która pozwoliła uzyskać wyniki obliczeń w pełni zgodne z wynikami doświadczalnymi. Nie jest natomiast jasne, czy w finalnej wersji

swojego modelu Autorka uwzględniła promieniowanie cieplne rozgrzanych do bardzo wysokich temperatur powierzchni płyt z katalizatorem.

W rozdziale 6 pt. „Symulacja pracy rekombinatorów wodoru w obudowie bezpieczeństwa reaktora podczas awarii LOCA”, liczącym 32 strony, przedstawiono wyniki obliczeń CFD dla układu dwóch urządzeń PAR umieszczonych w zamkniętej komorze ULA (Układ Lokalizacji Awarii) oraz czterech urządzeń PAR zainstalowanych w przepływowej komorze ULA. W obu przypadkach objętość czynna rekombinatorów była znacznie mniejsza od objętości sekcji, w której je umieszczono. Oznacza to znaczne zróżnicowanie skal czasowych i przestrzennych charakteryzujących procesy transportu pędu, masy i ciepła oraz towarzyszącej im reakcji rekombinacji wodoru z tlenem. W takich warunkach symulacja procesu przy użyciu metod CFD wymaga zastosowania siatek obliczeniowych o zmiennej gęstości i bardzo dużej liczbie elementów oraz bardzo krótkich kroków czasowych lub przyjęcia pewnych założeń upraszczających, ułatwiających wykonanie obliczeń. Autorka ocenianej rozprawy zastosowała z sukcesem dwa różne sposoby usprawnienia symulacji CFD: uprościła geometrię zamkniętej komory ULA do przypadku dwuwymiarowego, a w przepływowej komorze ULA zastąpiła rzeczywistą geometrię wnętrza rekombinatora wodoru strukturą porowatą. Wyniki modelowania CFD pracy dwóch urządzeń PAR w zamkniętej przestrzeni wykazały, że pomimo intensyfikacji cyrkulacji gazu w komorze przez gorące strumienie gazu wydostające się z rekombinatorów nie można całkowicie uniknąć stratyfikacji temperatury i składu gazu w układzie, co znajduje swoje pełne potwierdzenie w pracach innych autorów. Z kolei wyniki modelowania CFD pracy czterech urządzeń PAR w przepływowej komorze ULA wykazały znaczny wpływ rozmieszczenia aktywnych rekombinatorów na średnie stężenie wodoru w strumieniu gazu opuszczającym układ. Tego typu symulacje numeryczne stanowią dobry punkt wyjścia do określenia optymalnej liczby i właściwego rozmieszczenia urządzeń PAR wewnątrz obudowy bezpieczeństwa reaktora lekkowodnego.

W rozdziale 7 pt. „Końcowe uwagi i wnioski”, liczącym 4 strony, zreferowano najważniejsze wyniki pracy i przedstawiono wnioski. Jeden z tych wniosków jest moim zdaniem dyskusyjny, a mianowicie stwierdzenie, że pakiet Ansys Fluent jest nieprzydatny wtedy, gdy istnieje duża różnica koncentracji składników gazu. Chciałbym również zwrócić uwagę na fakt, że zastosowanie tzw. struktury porowatej do symulacji przepływu gazu przez urządzenie PAR miało już wcześniej miejsce, czego dowodzi np. publikacja autorów Prabhudharwadkar i Iyer w Nucl. Eng. Des. (241, s.1758) z 2011 roku.

Do rozprawy dołączono liczący 2 strony Załącznik A, zawierający podstawowe równania bilansowe: pędu, masy i energii oraz równania bilansowe energii kinetycznej burzliwości i szybkości dyssypacji energii burzliwości wykorzystywane przez modele  $k-\varepsilon$  i  $k-\omega$ .

## **2. Ocena tematyki badawczej, dokonań badawczych i publikacyjnych**

Modelowanie przebiegu awarii LOCA jest problemem ważnym, aktualnym i co istotne nadal wymagającym doskonalenia istniejących i opracowania nowych metod obliczeniowych. Realizacji tego zadania służy coraz szersze wykorzystanie metod obliczeniowej mechaniki płynów, które pozwalają z rozdzielczością czasowo-przestrzenną, niedostępną kodom skupionym, wyznaczać: rozkłady prędkości, temperatury i stężenia składników gazu, lokalne szybkości przemian fazowych składników gazu oraz rozkłady prędkości i średnic kropeł fazy ciekłej. Problemem, który szczególnie skupia uwagę wielu badaczy w kontekście awarii LOCA, jest proces generacji i rozprzestrzeniania się wodoru wewnątrz obudowy bezpieczeństwa reaktora jądrowego. Gazowy wodór powstaje wskutek rozkładu cząsteczek wody np. podczas radiolizy lub reakcji utleniania cyrkonu z koszulek paliwowych. Ta druga reakcja chemiczna jest silnie egzotermiczna i ulega gwałtownemu przyspieszeniu po awarii systemu chłodzenia i przegrzaniu reaktora. Ponadto w przypadku zaistnienia ciężkiej awarii prowadzącej do stopienia rdzenia reaktora wodór może pojawić się w wyniku kontaktu stopionego rdzenia z betonem w tzw. strefie „chwytacza rdzenia”. Wodór gromadzi się w obiegu chłodzenia reaktora, zbiorniku i obudowie bezpieczeństwa reaktora. Ten lekki gaz tworzy łatwopalne mieszaniny z powietrzem, co może prowadzić do przypadkowego zapłonu wodoru, gwałtownej propagacji frontu spalania czy wręcz detonacji i w konsekwencji do znacznego wzrostu ciśnienia i temperatury gazu. Powstałe w ten sposób obciążenia mechaniczne i termiczne mogą spowodować uszkodzenie reaktora i jego kluczowych systemów, a w najgorszym przypadku doprowadzić do rozszczelnienia się obudowy bezpieczeństwa reaktora i wydostania się materiałów radioaktywnych do atmosfery. Konieczne jest zatem zapobieganie wzrostowi stężenia wodoru. W praktyce stosuje się szereg metod do usuwania lub obniżania stężenia wodoru, np. katalityczną rekombinację wodoru prowadzona w pasywnych autokatalitycznych rekombinatorach wodoru (PAR); w zależności od przyjętej strategii ochrony przed wzrostem stężenia wodoru wewnątrz budynku reaktora instaluje się od kilku do kilkudziesięciu urządzeń PAR.

W związku z powyższym podjęcie się przez Doktorantkę szerokich badań nad wykorzystaniem metod obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) do modelowania awarii LOCA oraz pracy urządzeń PAR uważam za w pełni uzasadnione. W literaturze przedmiotu brak jest kompleksowych opracowań poświęconych modelowaniu CFD różnych faz awarii LOCA oraz

analizie parametrycznej modeli burzliwości używanych do obliczeń przepływu i mieszania gazu wewnątrz katalitycznych rekombinatorów wodoru o budowie płytowej.

Różnorodność poruszanych zagadnień, wykorzystanie wielu metod CFD i modeli mechanicznych procesów fizykochemicznych oraz dyskusja wyników badań poprzez ich publikowanie i prezentowanie na szeregu konferencji naukowych doprowadziło do powstania pracy doktorskiej, która wnosi nowe treści i rozwiązania do wiedzy i praktyki zastosowania metod CFD w obszarze energetyki jądrowej. Uważam ponadto, że recenzowana praca została wykonana samodzielnie.

Doktorantka jest współautorem dwóch publikacji w czasopiśmie naukowych, znajdujących się na liście punktowanej MNiSW, oraz siedmiu prac przedstawionych na konferencjach naukowych, w tym 3 międzynarodowych, co świadczy o umiejętności pracy w zespole.

Za główne dokonania Doktorantki uważam:

- Racjonalne zaplanowanie i wykonanie symulacji numerycznych kolejnych faz awarii LOCA odtworzonych w projektach doświadczalnych CASP-3 i SNU.
- Szczegółową analizę parametryczną konfiguracji modelu CFD pasywnego autokatalitycznego rekombinatora wodoru oraz walidację tego modelu w oparciu o wyniki eksperymentalne uzyskane w instalacji REKO-3.
- Interesującą próbę określenia optymalnej konfiguracji przestrzennej urządzeń PAR w komorze układu lokalizacji awarii.

Należy również zauważyć, że w trakcie wykonywania recenzowanej pracy Autorka nabyła cennych umiejętności w dziedzinie modelowania CFD złożonych procesów transportu pędu, masy i energii, zachodzących w obudowie bezpieczeństwa reaktora jądrowego, oraz analizy wyników obliczeń, co powinno procentować w przyszłości.

### **3. Uwagi dyskusyjne i krytyczne**

Lektura rozprawy doktorskiej nasunęła szereg uwag o charakterze merytorycznym.

a) Opis modelu CFD użytego do przeprowadzenia symulacji pierwszej fazy awarii LOCA przedstawiony w rozdziale 3 wskazuje, że Autorka nie uwzględniła w obliczeniach kondensacji warstewkowej pary wodnej na ściankach układu. Pominięcie tego ważnego mechanizmu kondensacji może spowodować poważne błędy w obliczeniach strumienia ciepła wymianowego z otoczeniem oraz masy fazy ciekłej rozproszonej w fazie gazowej, a także pośrednio wpłynąć na intensywność cyrkulacji gazu wewnątrz zbiornika. Co zdecydowało o zaniedbaniu w obliczeniach mechanizmu kondensacji warstewkowej?

b) Na stronie 45 napisano, że średnice kropeł wody przyjęte do obliczeń były równe 0,001 m. W cytowanej przez Autorkę pracy [43] oraz w wielu innych publikacjach poświęconych kondensacji objętościowej pary wodnej przyjmuje się, że średnice kropełek mgły wodnej zawierają się w zakresie od  $10^{-7}$  do  $10^{-4}$  m. Krople o średnicach rzędu 0,001 m opadają w powietrzu z prędkością dochodzącą do 4 m/s, co sprzyja ich szybkiej depozycji na dnie zbiornika i poziomej przegrodzie dzielącej zbiornik. Na jakiej podstawie przyjęto tak dużą średnicę kropeł kondensatu?

c) Uproszczenie geometrii układu, w którym przeprowadzono eksperyment CASP-3, do przypadku dwuwymiarowego zostało połączone ze znaczną redukcją wysokości otworu wlotowego strumienia mokrej pary wodnej, co wynika z porównania rys. 3.2 z rys. 3.5-3.11. Taka korekta geometrii musiała spowodować przeszacowanie szybkości odparowania strumienia gorącej wody, a tym samym wpłynąć na: prędkość temperaturę i skład fazy gazowej w pobliżu wlotu do zbiornika. Czy te lokalne zmiany miały wpływ na dynamikę zmian średniego składu i temperatury gazu w górnej i dolnej sekcji zbiornika?

e) Na stronie 65 stwierdzono, że w eksperymencie SNU większy wpływ na mieszanie gazu miała dyfuzja molekularna niż burzliwa, pomimo tego, że warunki eksperymentu wskazują na to, że mieszanie strumienia helu i pary wodnej z gazem znajdującym się w otoczeniu punktu dozowania zachodziło w przepływie burzliwym. Na jakiej podstawie wyciągnięto taki wniosek i jak w rozważanym przypadku obliczano współczynniki dyfuzji molekularnej?

f) Porównanie wyników obliczeń CFD i wyników pomiarów temperatury środkowej płyty PAR wskazuje, że założenie laminarnego przepływu gazu w kanale między płytami powoduje przeszacowanie temperatury płyty o około 200 K na całej jej długości. Skąd wzięta się aż tak duża rozbieżność, jeżeli wiadomo, że warunkach eksperymentu liczba Reynoldsa charakteryzująca przepływ gazu w kanale była równa w przybliżeniu 900?

g) Jednym z etapów formułowania modelu CFD urządzenia PAR był dobór odpowiednich procedur do obliczania współczynników przewodzenia ciepła gazu i współczynników dyfuzji molekularnej składników gazu. Osiągnięto to poprzez porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów temperatury płyt z katalizatorem i ułamka molowego wodoru w kanale pomiędzy płytami. Sądzę, że w tym przypadku lepszym rozwiązaniem byłoby bezpośrednie porównanie obliczonych wartości własności fizycznych gazu i jego składników z dostępnymi danymi tablicowymi.

h) Na jakiej podstawie w równaniu (6.2) do obliczania spadku ciśnienia w strukturze porowatej nie uwzględniono członu bezwładnościowego?



#### 4. Uwagi redakcyjne

W recenzowanej pracy dostrzeżono szereg błędów stylistycznych oraz terminologicznych. Autorka nie uniknęła również błędów korektorskich, a pozycje w wykazie literatury nie zawierają informacji o numerach stron artykułów, co utrudnia ich wyszukiwanie. Przytaczam poniżej zauważone błędy.

Str. 8.

Symbol  $\omega$  oznacza tzw. specyficzną szybkość dyssypacji energii burzliwości o wymiarze (1/s) w odróżnieniu od zwykłej szybkości dyssypacji energii  $\varepsilon$  o wymiarze ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ ). Energia aktywacji  $E$  wyrażana jest w (J/mol). Człon źródłowy  $G$  w równaniach modelu burzliwości ma wymiar ( $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^3)$ ).

Str. 18.

Co oznacza sformułowanie „woda o wysokich parametrach” na końcu 1 akapitu?

Str. 24.

Wyrażenie „budowę containmentu” w 4 wierszu od góry to rażący anglicyzm.

Str. 25.

W literaturze przedmiotu przyjął się termin „zapłonniki wodoru” a nie „zapalniki wodoru”.

Str. 29.

W podpisie pod rys. 2.11 powinno być „Bloki 1-3 elektrowni jądrowej...” a nie „Boki 1-3 elektrownia jądrowa...”.

Str. 32.

Koniec ostatniego zdania pierwszego akapitu powinien brzmieć „jak i dynamika przemian fazowych” zamiast „jak i zmiany fazy”. W kolejnym akapicie pojawia się potoczne sformułowanie „próba zamodelowania”. Należy unikać tego typu wyrażen w rozprawie naukowej.

Str. 41.

W pierwszym zdaniu 2 akapitu powinno być „stanu nieustalonego”, a jest „stanu ustalonego”.

Str. 49.

Separatorem dziesiątym jest przecinek, tymczasem 3 wierszu od dołu strony użyto kropki, podobnie jest w podpisach niektórych rysunków w rozdziale 5 i w tekście tego rozdziału.

Str. 52.

W ostatnim zdaniu 1 akapitu powinno być „punkcie 3.2” zamiast „punkcie 3.3”. W ostatnim zdaniu 2 akapitu powinno być „dłuższego kroku”, zamiast „krótszego kroku”.

Str. 67.

W 4 wierszu od dołu strony napisałbym „cienkie płytki”, zamiast „płytki te o bardzo niewielkiej grubości”.

Str. 68.

W dwóch ostatnich wierszach pojawiają się sformułowania będącą prawdopodobnie zbyt dosłownym tłumaczeniem z języka angielskiego: „wykładnik reakcji przedniej” i „wykładnik reakcji wstecznej”. Poprawnie byłoby np. „wykładniki reakcji odwracalnej”.

Str. 70.

W 2 akapicie od dołu strony zauważyłem dwa błędy; zamiast „Muellera [87] i o 20 równań mechanizm Millera i Bosmana [60]” powinno być „Muellera [62] i o 20 równań mechanizm Millera i Bowmana [60].”

Str. 72.

Początek 3 punktu w 1 akapicie sformułowałbym „w kanałach pomiędzy płytkami z katalizatorem” zamiast „w obrębie katalizatora”.

Str. 92.

W 3 wierszu od dołu strony napisałbym „obecność elementów siatki obliczeniowej o niewielkich rozmiarach” zamiast „fakt występowania elementów różnicowych o bardzo małych wymiarach”.

Str. 98.

W 2 akapicie należało użyć terminu szybkość (wydajność) reakcji zamiast natężenie reakcji.

Str. 121.

Rysunek 6.17 odnosi się do przypadku pary rekombinatorów 1 i 2 a nie 1 i 3.

## 5. Wniosek końcowy

Podsumowując, mogę stwierdzić, że Doktorantka wykazała się dużymi umiejętnościami zarówno w modelowaniu CFD jak i w interpretacji wyników obliczeń. Przedstawione w punkcie 3 uwagi mają głównie charakter dyskusji merytorycznej, do podjęcia której zachęcam. Praca jest moim zdaniem wartościowa, ponieważ poszerza wiedzę o aktualnych możliwościach metod CFD w modelowaniu awarii LOCA i pracy katalitycznych rekombinatorów wodoru, a także stanowi oryginalny wkład w badania nad optymalizacją rozmieszczenia urządzeń PAR wewnątrz układu lokalizacji awarii. Stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Magdaleny Orszulik spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez przepisy ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnioskuję do Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej o jej przyjęcie oraz dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.

  
dr hab. inż. Antoni Rozeń