

dr hab. inż. Jerzy Kowalski – prof. PG  
Instytut Oceanotechniki i Okrętownictwa  
Politechnika Gdańska  
Narutowicza 11/12 80-233  
Gdańsk  
e-mail: [jerzy.kowalski@pg.edu.pl](mailto:jerzy.kowalski@pg.edu.pl)

Gdańsk;15.02.2023

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgra inż. Rafała Rogóza pt.  
„The influence of Flash-Boiling effect on droplet size distribution of low-pressure sprays under various ambient pressures and fluid temperatures”

Promotor pracy: prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk  
Promotor pomocniczy dr inż. Łukasz Jan Kapusta

### 1. Podstawa recenzji

Podstawa opracowania recenzji było pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego z dnia 8 grudnia 2022 (RND-ISGiE/124/2022).

### 2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa liczy 93 strony tekstu w tym 105 pozycji bibliograficznych. Za spisem treści znajduje się lista rysunków i tabel oraz spis oznaczeń. Na uwagę zasługuje fakt że praca została wydana w formie wydania książkowego w języku angielskim a zawarte w niej informacje są przedstawione w sposób zwięzły. Całość rozprawy jest skomponowana logicznie, kolejne rozdziały wprowadzają czytelnika w sposób logiczny w kolejne zagadnienia dotyczące analizowanego problemu. Pierwszy rozdział rozprawy stanowi wstęp, przedstawiający podstawy teoretyczne zjawiska parowania cieczy przegrzanej. Autor dysertacji przedstawia wpływ tego zjawiska na parametry strugi rozpylonej cieczy w oparciu o przegląd literatury, przyjmując podział przeglądu na 3 parametry strugi cieczy. Są to zmiana kąta rozwarcia stożka wtryski rozpylonej cieczy, załamania się zasięgu strugi oraz redukcja rozmiarów kropeł. Zakończenie rozdziału pierwszego stanowi sprecyzowanie celu i zakresu pracy. Autor za cel postawił sobie zbadanie wpływu zjawiska parowania cieczy przegrzanej na parametry strugi w warunkach relatywnie niskiego ciśnienia nie przekraczającego 10 bar. W ostatnim zdaniu rozdziału autor postawił hipotezę, że rozkład rozmiarów kropeł cieczy zmienia się wraz z intensywnością zjawiska parowania cieczy przegrzanej i może być za modelowany funkcją parametrów przegrzania.

Rozdział 2 Autor poświęcił na przedstawienie metodyki prowadzonych przez siebie badań. Autor przedstawił budowę stanowiska badawczego, przyjęty do badań zakres parametrów cieczy oraz metodologię określenia rozkładu rozmiarów kropeł rozpylonej cieczy. Szczególny nacisk autor położył na określenie temperatury strugi cieczy opuszczającej wtryskiwacz.

Rozdział 3 zamiera omówienie wyników badań eksperymentalnych jak również szczegółowy opis analizy teoretycznej zmierzającej do przedstawienia matematycznego opisu rozkładu rozmiarów kropeł rozpylonej cieczy w funkcji parametrów przegrzania.

Ostatni 4 rozdział pracy zawiera podsumowanie i wnioski końcowe. Autor we wnioskach stwierdza że udowodnił hipotezę postawioną na wstępie pracy. Udowodnił że rozkład wielkości kropeł wtryskiwanej cieczy zmienia się wraz z intensywnością parowania cieczy przegrzanej. Zależność ta może być zamodelowana za pomocą zaproponowanego przez Autora równania.

### 3. Ocena merytoryczna rozprawy w tym uwagi krytyczne

Autor rozprawy podjął się bardzo trudnego zadania jakim są badania eksperymentalne wpływu zjawiska parowania cieczy przegrzanej na parametry strugi cieczy wtryskiwanej przez wtryskiwacz wielo otworowy. Zadanie to jest trudne do realizacji ze względu na brak możliwości technicznych bezpośredniego pomiaru zjawiska parowania cieczy wewnątrz otworka wtryskiwacza. Możliwa jest jedynie ocena pośrednia oparta na pomiarze parametrów termodynamicznych cieczy tuż po opuszczeniu wtryskiwacza. Niemniej jednak poznanie zależności jakościowych i ilościowych między wspomnianymi zjawiskami jest niezmiernie istotne dla wielu gałęzi przemysłu poczynając od obiegów chłodniczych a kończąc na oczyszczaniu spalin czy ochronie przeciwpożarowej. Właściwy dobór parametrów rozpylanej cieczy jest niezmiernie istotny dla ogólnej sprawności procesów technologicznych wykorzystujących to zjawisko. Istnieje przy tym luka poznawcza, utrudniająca ocenę procesu rozpylania o parametrach termodynamicznych relatywnie niskich w stosunku do rozlania paliw węglowodorowych w celu realizacji procesu spalania.

Należy przy tym zwrócić uwagę że zjawisko parowania cieczy przegrzanej nie jest jedyną przyczyną rozdrobnienia kropeł cieczy po opuszczeniu wtryskiwacza. Dostępne w literaturze wyniki badań jak i moje doświadczenie wskazują, że równie istotnymi czynnikami wpływającym na jakość rozpylania cieczy są własności cieczy, precyzowane wartością kryterialnej liczby Webera, charakter przepływu cieczy wewnątrz otworka wtryskiwacza, określony liczbą Reynoldsa oraz warunki termodynamiczne otoczenia. Wystarczy wskazać, że parametry wtrysku paliw węglowodorowych do cylindrów silników tłokowych znacząco odbiegają od parametrów przegrzania tego paliwa a mimo to paliw równie skutecznie jest rozpylany w komorze spalania. Tymczasem Autor w pracy przedstawia przegląd literatury z którego można by wywnioskować, że zjawisko parowania cieczy przegrzanej jest dominującym zjawiskiem wpływającym na rozpylanie cieczy. Na przykład podczas formułowania celu i zakresu pracy Autor stwierdza między innymi „Despite the fact, that the effect of flash boiling is considered as a dominant driver for angle entrainment it was shown that other factors such as ambient resistance, fluid temperature, injection pressure and injection geometrical parameters can play a minor but distinguishes role in angle formation.” Stwierdzenie to nie zostało udowodnione w pracy. Ponadto oczywistym faktem jest, że wzrost ciśnienia otoczenia (gęstości ośrodka) skutkuje zwiększonym kątem stożka wtrysku w przypadkach, gdy parowanie cieczy nie występuje w ogóle. Co prawda Autor podczas przedstawienia planu badań opisuje parametry eksperymentu, jednak bardzo trudno ustalić, na podstawie przedstawionego opisu, jaka była wartość ciśnienia wtrysku wody. Na rysunku 7 autor przedstawia parametry wtryski wody w postaci temperatury i ciśnienia wewnątrz komory o stałej objętości, stwierdza również że parametry ciśnienia były tak dobrane, aby różnica między ciśnieniem wtrysku a ciśnieniem otoczenia wynosiła 5 bar, podając przy tym, że zakres ciśnienia w komorze wahał się między 0,05 a 10 bar. Wartość ciśnienia wtrysku jest o tyle istotna, że jego zmiana może spowodować zmianę natężenia przepływu cieczy przez otworek wtryskiwacza a co za tym idzie zmianę wartości liczby Reynoldsa. W związku z tym przedstawiony eksperyment bierze pod uwagę sumaryczny efekt rodzaju przepływu jak i parowania wody przegrzanej. Należy również zwrócić uwagę że na wspomnianym rysunku 7 wartości ciśnienia w komorze nie są mniejsze niż 0,1 bara i są znacząco niższe niż 10 bar podanych w tekście. Niestety Autor nie podaje również parametrów technicznych zastosowanych urządzeń pomiarowych, ich dokładności i zakresu. Nie przedstawia również analizy statystycznej uzyskanych wyników pomiarów ani nie określa błędów pomiarowych, czy powtarzalności

wyników. Analiza ta jest o tyle istotna, że uzyskane wyniki pomiarów są podstawą do analizy teoretycznej przedstawionej w dalszej części pracy.

Autor za cel pracy postawił sobie udowodnienie zaproponowanej hipotezy. Z punktu widzenia metodologii naukowej podejście takie jest błędne. Co do zasady eksperyment powinien być tak skonstruowany, aby efektem jego była próba podważenia hipotezy a nie jej udowadnianie. Konstrukcja logiczna wskazuje jednak, że Autor tak naprawdę przedstawił tezę pracy. Co prawda w tezie tej zawarte jest pewne uogólnienie, jednak dotyczy ono wyłącznie parametrów termodynamicznych określonych w zakresie pracy i medium jakim jest woda. W związku z tym uznaję, że przedstawiona w pracy hipoteza jest tak naprawdę tezą i w takim wypadku można być ona udowodniana badaniami eksperymentalnymi przeprowadzonymi przez Autora.

Autor duży nacisk postawił na dokładny opis metody zmierzającej do opracowania zależności matematycznej między parametrami parowania wody a parametrami rozkładu wielkości kropeł. Należy tu jednak zwrócić uwagę, że zmierzone wartości dotyczą jedynie niewielkiego wycinka chmury kropeł, który to nie jest reprezentatywny dla całej chmury wtryskiwanej wody. Tak więc cały opis matematyczny odnosi się jedynie do mierzonego wycinka, a problem uogólnienia na całą chmurę nie został przez Autora podjęty. W celu wyznaczenia wspomnianej zależności matematycznej Autor wziął pod uwagę 18 funkcji matematycznych, przedstawiających zależność między parametrami rozkładu wielkości kropeł a zawartością współczynnika przegrzania  $R_p$ . Zgodnie z przedstawioną na stronie 21 definicją tego współczynnika, jego wartość uzależniona jest od temperatury cieczy, ciśnienia otoczenia oraz ciśnienia saturacji. Po analizach statystycznych do dalszych prac Autor wybrał 6 funkcji matematycznych, przy czym jedna z nich Beta Prime zawiera współczynnik „B”, którego wartość uzależniona jest od czasu. Ponieważ Autor prowadził badania w warunkach stacjonarnych kryteria wyboru tej funkcji wymagają szerszego wyjaśnienia przez Autora podczas obrony.

Dalsze analizy teoretyczne Autora wykazały, że najlepiej odwzorowującym prezentowane zjawiska równaniem matematycznym jest rozkład logarymicznie normalny (log normal), co jest wynikiem spodziewanym ze względu na statystyczny charakter rozpadu strugi wody. Autor uznał uzyskany wynik za niezadowalający, dlatego w dalszym etapie prac postanowił rozszerzyć analizę teoretyczną o dodatkowy parametr jakim jest temperatura cieczy. W moim przekonaniu jest to błąd, ponieważ wartość tej temperatury jest już zawarta we współczynniku  $R_p$ . Ponadto skupianie się na zwiększeniu dokładności modelu matematycznego bez wskazania dokładności wartości zmierzonych wydaje się być bezzasadne. Dalsza analiza Autora wydaje się o tyle nieprzekonująca że zawarte w tabeli 4 wartości współczynników wydają się niezależne od wartości temperatury cieczy. Z tego powodu również końcowe stwierdzenie Autora dotyczące analizy teoretycznej „Despite the observed differences, the model reflects the main trends with the satisfactory agreement” wydaje się być nieprawdziwe, tym bardziej że Autor nie przedstawia kryteriów pozwalających na takie stwierdzenie.

Z drugiej strony wyniki analiz przedstawione na Rys. 42 wykazują, że korelacja między wartością współczynnika  $R_p$  a parametrami rozkładu jest niewielka. Oznacza to, że sama wartość współczynnika  $R_p$  jest niewystarczająca do opisu zjawiska. Autor jednak nie bierze pod uwagę możliwości zmiany charakteru przepływu cieczy (zmiana wartości liczby Reynoldsa), która może prowadzić do zmienionych warunków rozpadu strugi cieczy i mieć istotny wpływ na jakość rozpatrywanego zjawiska. Pomimo wskazanych niedociągnięć należy stwierdzić, że Autor pracy podjął się bardzo trudnego zadania i jemu sprostał. Przedstawione działania pozwoliły na zrealizowanie celu naukowego i stanowią znaczny wkład w poszerzenie wiedzy z zakresu rozpylania cieczy. Na wyróżnienie zasługuje zakres i wkład pracy doktoranta, który potwierdza jego wysokie kompetencje naukowe. Dzięki temu recenzowana rozprawa ma wysoki poziom naukowy i poznawczy i stanowi swego rodzaju kompendium wiedzy z zakresu rozpylania cieczy w warunkach termodynamicznych sprzyjających parowaniu cieczy przegrzanej.

Do najważniejszych osiągnięć Autora rozprawy zaliczam:

- Opracowanie planu i realizację eksperymentu naukowego pozwalającego na zbadanie wpływu parowania cieczy przegrzanej na parametry strugi wody wtryskiwanej do komory o stałej objętości.
- Wyznaczenie eksperymentalnej zależności między wartością współczynnika przegrzania wody a parametrami rozkładu wielkości kropeł rozpylonej wody.
- Opracowanie zależności teoretycznej, pozwalającej na modelowanie rozkładu wymiarów kropeł wtryskiwanej wody w oparciu o współczynnik przegrzania wody.

#### 4. Drobne uwagi techniczne

Przygotowanie rozprawy stanowi proces pracochłonny i długotrwały a zakres wykonanych prac wymaga dużego zaangażowania w organizację zarówno badań eksperymentalnych, opracowania wyników pomiarów jak i analiz teoretycznych. Z tego powodu oczywistym jest, że przygotowanie takiego osiągnięcia może być obciążone pewnymi niedociągnięciami edycyjnymi. Dlatego też w tekście pracy pojawiło się kilka usterek o charakterze redakcyjnym. Usterki te są nieliczne, dlatego też nie wpływają na ogólnie pozytywny odbiór pracy. Przykładowe usterki redakcyjne przedstawiono poniżej:

- Str. 22 – Rys. 3 – brak opisu stref 1, 2, 3, 4
- Str. 23 – „other many other”
- Str. 37 u dołu – SMD increased with the distance from injector tip – chyba jednak maleje.
- Str. 42 u dołu – A schematic diagram was shown in Fig.9 – ale czego?
- Str. 45 – Tabela 1 – “canter position”
- Str. 58 w opisie podano  $\Delta T$  4, 11 i 20 ale na Rys. 24 i 25 już 1, 11 i 20.
- Generalnie Rys 8, 39, 42, 43 i 46 są niewielkie i nieczytelne.

Ponadto Autor w niektórych przypadkach Doktorant informuje o swoich decyzjach odnośnie wybranych kierunków działań badawczych bez przedstawienia przyczyn i argumentów przemawiających za takim wyborem. Nie stanowi to uchybienia, jednak w moim przekonaniu wymaga ustosunkowania się i wyjaśnienia. A mianowicie:

- Przyjęto do pomiarów metodę shadowgraphy, bez wskazania dlaczego ta metoda jest preferowana.
- Wskazano zastosowanie podczas pomiarów lasera o ściśle określonej częstotliwości bez informacji o argumentach przemawiających za tym wyborem.
- Analiza teoretyczna zapoczątkowana była zastosowaniem 18 wybranych funkcji matematycznych. Jakie były kryteria wyboru początkowego?

Jak już wspomniałem nie są to uwagi krytyczne a jedynie pewien niedosyt informacji.

#### 5. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca jest ciekawa i oryginalna a podjęta tematyka ważna i aktualna. Mgr inż. Rafał Rogóż przedstawił i rozwiązał problem opisu matematycznego wpływu efektu parowania cieczy przegrzanej na rozkład i parametry chmury rozpylonej cieczy w warunkach relatywnie niskiego ciśnienia. Wykazał się również adekwatną wiedzą oraz umiejętnością organizacji do przeprowadzenia eksperymentu naukowego.

Niezależnie od przedstawionych w recenzji uwag krytycznych z pełnym przekonaniem stwierdzam, że **przedstawiona praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.**

Zatem wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie do dalszego procedowania.

Jerzy Kowalski