

Poznań, 31 stycznia 2023 r.

prof. dr hab. inż. Ireneusz Pielecha
Instytut Silników Spalinowych i Napędów
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Politechnika Poznańska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Rogóża
pt.: „The Influence of Flash-Boiling Effect on Droplet Size Distributions of Low-Pressure
Sprays under Various Ambient Pressures and Fluid Temperatures”
(promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk)

Podstawa opracowania:

Decyzja Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwa i Energetyki
RDN-IŚGiE/124/2022 z dnia 8.12.2022

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Układy napędowe środków transportu w przeważającym stopniu wykorzystują obecnie silniki spalinowe. Mimo wymuszanej tendencji zastępowania takich systemów napędowych układami elektrycznymi, silniki spalinowe jeszcze w długiej perspektywie czasowej pozostaną głównym źródłem napędu pojazdów lub maszyn.

Poszukiwanie możliwości zwiększenia sprawności procesu spalania odbywa się obecnie dwukierunkowo: przez zmianę systemu spalania lub przez modyfikację obecnych układów przygotowania ładunku. Pierwszy sposób dotyczy m.in. systemów TJI (*Turbulent Jet Ignition*), których efektywne zasilanie przynosi korzyści w zakresie sprawności ogólnej, wiąże się z wykorzystaniem paliw gazowych. Drugi sposób dotyczy modyfikacji systemów zasilania, których głównym źródłem są paliwa ciekłe. Wysokociśnieniowe systemy spalania lekkich paliw węglowodorowych (ciekłych) są ukierunkowane na zwiększanie ciśnienia paliwa, co sprzyja zwiększeniu jego rozpylenia, a to prowadzi do zwiększenia szybkości tworzenia ładunku palnego.

Jedną z metod zwiększenia szybkości przygotowania ładunku do spalania jest zastosowanie efektu gwałtownego wrzenia paliwa (*flash-boiling*). Taką tematyką zajął się doktorant, co wskazuje, że zagadnienia rozprawy są bardzo aktualne i ważne w aspekcie przygotowania i prowadzenia procesu spalania. Należy zauważyć, że zagadnienia, którymi zajmuje się doktorant związane są także z pozasilnikowymi systemami ograniczania emisji spalin. Pełna znajomość zagadnienia dotyczącego efektu gwałtownego wrzenia jest więc rozwiązaniem systemowym. W obecnie stosowanych systemach napędo-

wych jest to zjawisko, które można wykorzystać dwukrotnie w celu zwiększenia sprawności systemu spalania lub zwiększenia efektywności pozasilnikowego systemu oczyszczania spalin.

Doktorant, mgr inż. Rafał Rogóz podjął w pracy tematykę gwałtownego wrzenia, stawiając sobie za cel stworzenie charakterystyk rozkładu wymiarowego rozmiaru kropeł oraz – na ich podstawie – budowę modelu tego zjawiska jako funkcji zmiany temperatury oraz zmiany ciśnienia.

Rozprawę napisano w języku angielskim, liczy ona 93 strony tekstu obejmującego 4 rozdziały oraz spis literatury zawierający 105 pozycji. W pracy zawarto spis skrótów i oznaczeń; zawarto także spis rysunków i tabel.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym *Wprowadzenie*, Doktorant przedstawił rozpoznanie tematyki rozprawy w zakresie szybkiego wrzenia. Dokonano analizy procesu gwałtownego wrzenia wskazując na mechanizmy jego tworzenia. Przedstawiono także efekty, które towarzyszą temu zjawisku, czyli zwiększenie kąta wtrysku, ograniczenie objętości strugi (tzw. *spray collapse*) oraz zmniejszenie średnicy kropeł. Wszystkie te procesy Doktorant opisał zawierając wiele przykładów potwierdzających ich występowanie.

Rozdział ten jest bardzo obszerny i celowym byłoby rozdzielenie tematyki wprowadzającej w zagadnienie od tematyki dotyczącej gwałtownego wrzenia z jego konsekwencjami. Bieżący kształt spisu treści wskazuje na małą rolę tego Rozdziału – szczególnie w aspekcie jedynie analizy spisu treści. Rozdział ten jest szeroko skomentowany badaniami naukowymi, jednak nie przedstawiono w nim praktycznie żadnych wyników graficznych (poza kilkoma wprowadzającymi w zagadnienie).

W końcowej części tego rozdziału (a ciągle jesteśmy we *Wprowadzeniu*) zawarto również hipotezę badawczą. Przedstawiając syntetyczne wnioski i podsumowania poprzednich podrozdziałów stwierdzono, że brak jest badań dotyczących wpływu efektu gwałtownego wrzenia na kształt statystycznego rozkładu wielkości kropeł w różnych warunkach przegrzania. Takie stwierdzenie było podstawą do postawienia hipotezy, że rozkład wielkości kropeł, zarówno pod względem średnich parametrów, jak i ich kształtu, ulega systematycznej zmianie pod wpływem intensywności gwałtownego wrzenia i można go modelować (ten rozkład) jako funkcję parametrów przegrzania.

Drugi rozdział pracy to *Materiały i metody*. W nim zawarto cztery podrozdziały dotyczące: 1) macierzy testów badawczych, 2) układu doświadczalnego; 3) sposobu kalibracji temperatury oraz 4) metodologii prowadzenia testów.

Macierz testów skomponowano jako układy bez przegrzania przy zmiennej temperaturze (2 punkty badawcze) i ciśnieniu (3 punkty badawcze) oraz układ zasadniczy podlegający przegrzaniu: 45 punktów badawczych.

Łącznie stanowi to 50 punktów (i tak podaje Autor pracy); jednak uwzględniając, że jeden z punktów pojawia się w dwóch grupach – to liczba punktów badawczych wyniosła 49. Wykorzystując wtryskiwacz niskociśnieniowy oraz technikę cieniową (w największym skrócie) dokonano analizy rozkładu kropeł w rozpylanej strudze (nie przegrzanej oraz przegrzanej). W kolejnym, cennym etapie prac dokonano analizy kalibracji temperatury. Wskazano na możliwości powstawania rozbieżności w pomiarze oraz przedstawiono sposób postępowania w celu ograniczenia błędów związanych z tym pomiarem. Jest to bardzo istotna informacja, gdyż już na etapie przygotowania pomiarów eliminuje się jeden z błędów, który mógłby zakłócić prawidłowość otrzymanych wyników.

W rozdziale tym zawarto także informacje dotyczące metodyki kalibracyjnej do określania średnic kropli cieczy. Wskazano na ograniczenia występujące podczas tej procedury oraz podano konkretne wskaźniki, które zostaną poddane analizie.

Rozdział 3 to rozdział badawczy zatytułowany *Wyniki i ich dyskusja*. Podzielono go na trzy części, w których przedstawiono wyniki dotyczące: 1) wpływu ciśnienia i temperatury na rozkład wielkości kropeł cieczy nieprzegrzanej; 2) wpływu cieczy przegrzanej na rozkład kropeł oraz 3) możliwości modelowania rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienia określonych wielkości kropeł jako funkcji różnych parametrów przegrzania oraz zaprezentowano własny model tego zjawiska.

Pracę kończy rozdział 4 zatytułowany *Podsumowanie i wnioski*. W rozdziale tym Autor opisuje zakres pracy. W tym miejscu ponownie pojawia się komunikat, że brakuje badań związanych ze statystycznym opracowaniem rozkładu średnic kropeł w warunkach przegrzania cieczy. Wydaje się, że ten etap pracy wskazane wątpliwości – przy najmniej częściowo – już powinien rozwiewać. Dopiero kolejne akapity wskazują, że Autor uzyskał wyniki, które tutaj poddano pełnej syntezie. Przedostatnie zdanie rozprawy wskazuje na to, że Doktorant potwierdził postawioną hipotezę badawczą.

2. OCENA ROZPRAWY

2.1. Uwagi ogólne

Rozprawę cechuje minimalizm w każdej postaci. Ten minimalizm można zauważyć już na początku pracy – dotyczy on liczby rozdziałów. Jest ich tylko 4, a praca jest na tyle

interesująca, że z powodzeniem mogłoby być tych rozdziałów o kilka więcej. Wynika to z faktu, że nieczęsto spotyka się np. hipotezę pracy umieszczoną we *Wprowadzeniu*. Ma się wrażenie, że rzeczywiste wprowadzenie do zagadnień tej pracy zostało pominięte przez Doktoranta.

Kolejnym minimalizmem cechuje się opis zakresu pracy. Brak jest tutaj wyartykułowanego zakresu pracy. Nie odnalazłem schematu postępowania podczas udowadniania postawionej hipotezy. Metodyka badań również jest bardzo skrótowa, a brak zdjęć stanowisk pomiarowych tylko potwierdza tę tezę. Dość szeroko opisano wyniki badań, jednak przedstawione wnioski ponownie wskazują na minimalizm wypowiedzi. Brak jest tutaj np. wniosków prognostycznych.

2.2. Uwagi merytoryczne

Pod względem merytorycznym i metodycznym pracę należy ocenić dość wysoko. Autor przedstawia analizę bieżącego stanu wiedzy podając bardzo dużą liczbę prac badawczych. Wskazuje na badania dotyczące szybkiego wrzenia w aspekcie różnych czynników:

- a) zwiększenia kąta strugi,
- b) ograniczenia rozwoju strugi lub strug wtryskiwanego paliwa,
- c) redukcji wielkości kropel.

Wszystkie te analizy poparto wieloma przykładami. Czasami odnosiły się one do wtrysku wysokociśnieniowego (choć tytuł pracy sugerował inne warunki), a czasami nawet do silników o zapłonie samoczynnym.

Jednak ten materiał jest cennym dorobkiem Doktoranta, gdyż zestawiono wiele przypadków badań, które dotyczą dość szerokiego spektrum wykorzystania zjawisk *flash-boilingu* przy wtrysku zróżnicowanych paliw w odmiennych warunkach. Trudno na tej podstawie dokonać analizy i wyciągnąć wnioski w aspekcie modelowania rozkładu średnic kropel, więc Autor zaplanował aparat badawczy w celu uzyskania wniosków szczegółowych przydatnych do dalszych prac modelowania matematycznego.

Dziwi natomiast fakt, że Autor nie wspomniał w żadnym punkcie pierwszego rozdziału o istniejących pracach dotyczących określania statystycznego rozkładu wielkości kropel w różnych warunkach przegrzania (np. *Brizi et al., 2019, SAE Int. J. Fuels Lubr.*). Nie wspomniano również o silnikowych zastosowaniach tej metody przygotowania ładunku do spalania. Prace takie są oczywiście prowadzone (np. *Sun et al. 2020, Fan et al., 2021,*

Energy Fuels), co nie umniejsza roli Doktoranta w zakresie badań nad zagadnieniami *flash-boilingu*.

Mimo tych niedociągnięć, przedstawione wcześniej etapy sprowadziły się do powstania hipotezy, że rozkład wielkości kropeł pod względem średnich parametrów ulega systematycznej zmianie pod wpływem intensywności gwałtownego wrzenia i można go modelować jako funkcje temperatury oraz ciśnienia.

Kolejnym etapem prac naukowych była budowa własnego stanowiska badawczego umożliwiającego ocenę rozkładu wymiarowego cieczy w warunkach konwencjonalnych oraz w warunkach przegrzewu. Niestety Autor nie podał w jasny sposób dlaczego zastosował wodę zamiast ciekłych paliw węglowodorowych (do wykorzystania w układach zasilania) lub roztworu mocznika (do zasilania w układach oczyszczania spalin).

Mimo minimalizmu treści (w niektórych obszarach) recenzowaną pracę oceniam bardzo wysoko, gdyż ogólnie odpowiada postawionej hipotezie pracy i jest dostosowana do obowiązujących w tym zakresie wymogów. Dość ogólnie przedstawione zadania badawcze (lub metodyka potwierdzenia postawionej hipotezy) stanowią z pozostałymi elementami rozprawy logiczny i spójny układ, a rozpatrywane treści są ze sobą dość dobrze powiązane.

Sposób przedstawienia wyników badań i ich analiza stanowią najcenniejszą część pracy. Tutaj Autor nie zachował zasady minimalizmu i dość szeroko przedstawił wyniki swoich prac. Analizując rozkłady wymiarowe dla tradycyjnych warunków wtrysku przedstawiono szczegółowo wszystkie etapy tworzenia rozkładów i ich oceny. Wykorzystano przy tym statystyki Kołmogorowa-Smirnowa do oceny istotności testów, co potwierdza naukowe podejście Doktoranta do rozpatrywanych zagadnień. Ten podrozdział bardzo dokładnie wyjaśnia metodykę prowadzenia dalszych badań.

Analizę zjawiska *flash-boilingu* dokładnie przedstawiono na przykładzie wtrysku cieczy o temperaturze 70°C. Stwierdzono, że nie można prowadzić analiz w odniesieniu do jednoczesnych zmian ciśnienia i temperatury, gdyż wyniki nie są jednoznaczne. Jest to bardzo dobre podejście, gdyż analiza pierwiastkowa umożliwia ocenę wpływu danej wielkości na zaistniałe rozkłady wielkości kropeł.

Niestety, wyjaśnienia dotyczące uzyskanych wyników badań przy innych temperaturach płynu ponownie potraktowano w sposób minimalistyczny: kilkoma zdaniem i dużą liczbą wykresów zamknięto temat otrzymanych wyników rozkładu wymiarowego.

Doktorant najwięcej merytorycznej uwagi poświęcił modelowaniu rozkładu kropeł. Wydaje się to logiczne, gdyż jest to istotny element pracy, stanowiący o jej indywidual-

nym charakterze. Autor wykazał się tutaj znajomością wielu funkcji gęstości prawdopodobieństwa, które w umiejętny sposób wykorzystał. Przyjmując określone kryteria (które jasno określił) wybrał najbardziej reprezentatywne funkcje (z grupy 18 funkcji wybrano 6). W wyniku kolejnych analiz wybrano jedną – logarytmiczno-normalną – opisującą dość dobrze jakość modelowania. Zdaniem Doktoranta funkcja ta zawierająca wartość średnią i odchylenie standardowe umożliwia ich bezpośredni dobór z danych źródłowych.

Wykorzystując dane badawcze oraz regresję liniową określono ww. parametry, umożliwiając jednocześnie powstanie uśrednionego logarytmiczno-liniowego modelu rozkładu średnic kropel.

2.3. Elementy nowości naukowej

Na podstawie szerokiego przeglądu literatury Autor określił tematyczną niszę naukową. Uwzględniając wybrane aspekty naukowe zjawiska *flash-boilingu* postawił hipotezę, którą próbując udowodnić, dokonał wyboru warsztatu naukowego oraz wskazał plan prac naukowych.

Doktorant dokonał szerokiej prezentacji wyników swych rozważań zarówno teoretycznych oraz eksperymentalnych; opisał przeprowadzone badania oraz starał się metodami modelowania matematycznego uzyskać postać modelu rozkładu wymiarowego średnic kropel.

Wnioski z przeprowadzonych analiz i badań są sformułowane trafnie i adekwatnie do ich zakresu i charakteru. Całość pracy cechuje staranna jej redakcja i poprawny styl piśmiennictwa (szczególnie, że pracę przedstawia się w języku angielskim). W zakresie omawianych zagadnień występują silne akcenty teoretyczne wywodzące się z dobrego rozeznania Autora w zakresie rozpatrywanej problematyki.

Najważniejsze osiągnięcia pracy, stanowiące o oryginalnym dorobku Doktoranta:

1. Sformułowanie ciekawego, wynikającego z praktycznego zastosowania, problemu dotyczącego zagadnień wtrysku i rozpylenia cieczy. Problematyka ta dotyczy wtrysku cieczy, która to technika może być częściowym rozwiązaniem problemów związanych z wprowadzeniem normy Euro 7 do silników spalinowych.
2. Nowoczesny i interdyscyplinarny warsztat naukowy obejmujący badania eksperymentalne rozpylenia cieczy z użyciem metody cieniowej, analizę obrazów oraz mo-

delowanie matematyczne prowadzące do uzyskania praktycznego modelu rozkładu wymiarowego kropel, co stanowi o wartości dodanej przedstawionej rozprawy.

3. Uzyskany model rozkładu wymiarowego średnic kropel może być zastosowany zarówno do warunków wtrysku i rozpylenia paliwa oraz do wtrysku cieczy w układzie oczyszczania spalin.
4. Staranne i przejrzyste wykonanie pracy; poprawny język techniczny i konsekwencja w stosowaniu terminologii.

Budzi jednak pewien niedosyt lub zastrzeżenia kilka fragmentów rozprawy, które nie obniżają mojej ogólnej, pozytywnej oceny wszystkich aspektów pracy (wyboru tematu, uzasadnienia, analiz, przeprowadzonych badań eksperymentalnych i modelowych oraz wnioskowania, itp.).

1. Autor rozprawy wskazuje, że układy niskociśnieniowego wtrysku pragnie wykorzystać głównie do wtrysku roztworu NH_3 . Dlaczego więc jako medium zastosowano wodę? Dlaczego nie scharakteryzowano możliwych różnic we właściwościach fizykochemicznych typowych mediów silnikowych? Dlaczego nie rozważano wyboru jednego z paliw ciekłych, co w tak dogłębny sposób analizowano w rozdziale wstępnym rozprawy?
2. Dlaczego Autor nie zweryfikował uzyskanego modelu rozkładu kropel na typowym medium stosowanym w układach wtryskowych silnikowych lub pozasilnikowych? Taka weryfikacja w bardzo wymowny sposób wskazywałaby na utylitarny charakter rozprawy.
3. Przedstawione rozwiązanie zastosowane w odniesieniu do wtrysku paliwa dotyczy przede wszystkim ładunku homogenicznego. Współczesne uwarstwienie ładunku wymusza wykorzystanie podziału dawki paliwa wtryskiwanego przed zapłonem. Czy analizowana koncepcja gwałtownego wrzenia spełnia te warunki? Gwałtowne wrzenie powoduje znaczące ograniczenie zasięgu strugi (brak pełnego zasięgu strugi w głąb komory spalania); dodatkowo każda częściowa dawka paliwa wtryskiwana jest przy innej wartości ciśnienia powietrza w cylindrze. Czy w takich warunkach możliwe jest uzyskanie gwałtownego wrzenia i czy będzie ono wówczas skuteczne?
4. W pracy nie zdefiniowano jakiego zakresu ciśnienia paliwa i powietrza dotyczą analizowane systemy niskociśnieniowe. We *Wprowadzeniu* przedstawiono wiele rozwiązań od wartości niewielkiego ciśnienia paliwa do ponad 30 MPa (tytuł sugeruje wartości niskociśnieniowe). Nie do końca wiadomo w jakim zakresie wartości ci-

śnienia wtryskiwanej cieczy prowadzona jest analiza bibliografii. Dlaczego poddano analizie warunki, których nie weryfikowano?

2.4. Uwagi szczegółowe

Rozprawa jest starannie opracowana pod względem redakcyjnym i edytorskim oraz wyróżnia się dostateczną czytelnością zamieszczonych rysunków. Zwraca uwagę łatwość poruszania się Autora w zagadnieniach teoretycznych procesu gwałtownego wrzenia. Terminologia stosowana w pracy jest poprawna i konsekwentnie przestrzegana. Poniżej przedstawiono wybrane uwagi szczegółowe:

Uwagi merytoryczne:

1. We *Wprowadzeniu* brak jest jednoznacznych wniosków dotyczących wpływu czynników zewnętrznych na kąt rozpylenia, zasięg oraz wielkość kropli. Po jego analizie nie wiadomo jaki parametr wpływa najsilniej na zmiany wymienionych wielkości. Szeroki opis i analiza badań literaturowych nie wskazuje na zebranie syntetycznych informacji. Każdy z podrozdziałów wydaje się nie mieć zakończenia lub syntetycznego podsumowania.
2. W tezie pracy Autor wspomina o analizie kształtu kropeł. Czy w pracy podjęto taki temat? Wydaje się, że poza ograniczeniami w metodyce pracy, więcej nie podjęto tego zagadnienia.
3. Brak jest w pracy zdjęcia lub zdjęć stanowiska badawczego. Na rysunku 9 przedstawiono schemat stanowiska, jednak z tego rysunku nie wynika stopień skomplikowania warsztatu badawczego. Wydaje się, że rozprawa doktorska jest miejscem do jego wskazania, co umożliwiłoby jednocześnie ocenę stopnia skomplikowania prowadzonych prac naukowych.
4. Dlaczego skalowanie temperatury oleju zakończono na wartości 100°C (powoduje to uzyskanie temp. cieczy o wartości 79.7°C). Wcześniej ustalono plan pracy, zakładający, że pomiary będą odbywały się do temp. cieczy o wartości 140°C. Pełny zakres skalowania powodowałby, że niepotrzebne są dwa różne typy dopasowania (rysunek 13). Wybrano równanie kwadratowe, które nie zostało zweryfikowane liczbowo z wartościami temperatury przed właściwymi badaniami.
5. Rysunek 16: Jeśli rozkład gęstości prawdopodobieństwa bazujący na wielkościach objętościowych kropeł powstał na podstawie gęstości prawdopodobieństwa liczby kropeł, to ich podstawa dotycząca średnic kropeł powinna być jednakowa. Przedstawione w pracy skale są różne; jeśli więc pierwsza dotyczy kropeł w zakresie

- 0–200 μm (skumulowana dystrybuanta przy $D = 200 \mu\text{m}$ osiąga maksimum), to dlaczego na drugim rysunku prawdopodobieństwo występowania kropeł zwiększono do średnic o zakresie 200–300 μm ?
6. Rys. 28 i inne: Przedstawione wykresy powinny być podstawą analizy wyników. Ich czytelność w bieżącej postaci nie jest duża, a widoczność danych jest dość mocno utrudniona. Wielkości skumulowane są dobrze widoczne, jednak rozkłady prawdopodobieństwa kropli mogłyby być przedstawione nieco lepiej.
 7. W jaki sposób należy rozumieć stwierdzenie (odnoszące się do rys. 33) o nieliniowych kształtach? Na rysunku nie naniesiono żadnych kształtów.
 8. Tabela 3: podano 18 zmiennych rozkładów prawdopodobieństwa. W tekście pracy natomiast Autor pisze, że zaprezentowano 19 różnych modeli.
 9. W jaki sposób Autor uzyskał współczynnik determinacji R^2 równy -1.473 . Wartość ta wymaga szerszego wyjaśnienia.
 10. Rysunek 13 powinien znajdować się w podrozdziale 2.3, a jest zamieszczony w rozdziale 2.4.

Uwagi edytorskie

1. Jakość rysunków jest dobra, jednak ich czytelność mogłaby być lepsza przez ich powiększenie. Duża liczba krzywych na rysunkach nie stwarza problemu, jednak analiza rozkładu wymiarowego średnic kropeł – niestety – jest dość utrudniona.
2. Język angielski jest nieco prostszy w zagadnieniach technicznych, jednak w polskojęzycznej części abstraktu występują drobne nieścisłości w postaci stwierdzeń: *pod niskim ciśnieniem, pomiar kropli, stopniowe zmniejszanie stopnia redukcji*.

3. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy treści stwierdzam, że oceniana praca mieści się w dyscyplinie naukowej ***Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka***.

Temat dysertacji jest ważny w projektowaniu i eksploatacji silników spalinowych, szczególnie w zakresie układów oczyszczania spalin, a uzyskane wyniki mogą być już obecnie wykorzystane w praktyce modelowania zagadnień wtrysku i rozpylenia cieczy. Równocześnie temat rozprawy jest niedostatecznie opisany w takiej postaci w literaturze, a sam sposób uzyskania modelu rozkładu wymiarowego jest oryginalnym rozwiązaniem Autora i stanowi o dużej wartości pracy. Zadanie, którego podjął się Autor należy do trudnych, bowiem jego realizacja wymagała wykorzystania obszernego zakresu wiedzy teoretycznej i wykonania rzetelnych badań eksperymentalnych z jednoczesnym

uwzględnieniem ich wyników do modelowania matematycznego. Z tego powodu podjęcie się tak trudnego zadania przez Autora uważam za wartość dodaną pracy.

W przedstawionym zadaniu naukowym Autor wykazał się samodzielnością w formułowaniu oryginalnych problemów i ich rozwiązywaniu oraz umiejętnością prowadzenia unikalnych badań eksperymentalnych. Przeprowadzone rozważania teoretyczne i uzyskane wyniki badań modelowych są przekonujące i w pełni potwierdzają postawioną w pracy hipotezę.

Pod względem metodologicznym pracę uznaję za prawidłową. Autor potwierdził umiejętność formułowania hipotez oraz syntezy prowadzonych badań w sposób uporządkowany i metodyczny, a także prawidłowe podejście do interpretacji wyników. Na podkreślenie zasługuje również poziom redakcyjny i edytorski pracy oraz fakt jej publikacji w języku angielskim.

Zawarte w opinii uwagi krytyczne nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę pracy. Należy zaznaczyć równocześnie, że niektóre z uwag mają charakter dyskusyjny lub wyjaśniający albo stanowią alternatywne podejście do zagadnienia.

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa **mgra inż. Rafała Rogóza** pt. „**The Influence of Flash-Boiling Effect on Droplet Size Distributions of Low-Pressure Sprays under Various Ambient Pressures and Fluid Temperatures**” spełnia wymagania stawiane pracom na stopień doktora nauk technicznych, w rozumieniu art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (t.j. Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.). Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie mgra inż. Rafała Rogóza do publicznej obrony ocenianej dysertacji.

Iwencusz Pielecha