

Dr hab. inż. Sławomir WIERZBICKI, prof. UWM
Katedra Mechatroniki
Wydział Nauk Technicznych
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Szwai
pt. „Badanie przebiegu tworzenia mieszanki palnej za pomocą
wtrysku kondensatu pirolitycznego w komorze o stałej objętości”
(Analysis of a combustible mixture formation by the injection of
pyrolysis oil in a constant volume combustion chamber)
Promotor: prof. dr hab. inż. Arkadiusz Szymanek

*Recenzja wykonana na podstawie pisma nr R-WIMil-BOD-510-8/20 Kierownika
Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna, Wydziału Inżynierii Mechanicznej
i Informatyki Politechniki Częstochowskiej dr hab. inż. Janusza Szmidla, prof. PCz.
z dnia 1 czerwca 2023.*

Ocena problematyki pracy

Jednym z obecnie największych wyzwań ludzkości jest ograniczenie negatywnego oddziaływania społeczeństwa i przemysłu na środowisko naturalne. Problem ten dotyczy między innymi utylizacji odpadów z tworzyw sztucznych, które nie mogą być poddane recyklingowi. Jak podkreśla to doktorantka w wstępie ocenianej rozprawy szacuje się, że tylko w Europie powstaje rocznie ponad 150 mln ton odpadów z tworzyw sztucznych, których naturalny proces rozpadu szacowany jest nawet na kilkadziesiąt lat. Konieczne zatem jest z jednej strony poszukiwanie alternatywnych materiałów o korzystniejszym oddziaływaniu na środowisko naturalne, z drugiej zaś strony opracowanie efektywnych metod przetwarzania tych odpadów. Jednym z możliwych sposobów przetwarzania tego typu odpadów jest poddanie ich pirolizie, wskutek czego uzyskuje się olej pirolityczny, posiadający właściwości zbliżone do obecnie stosowanych paliw do zasilania maszyn cieplnych, w tym silników spalinowych.

W recenzowanej rozprawie doktorskiej Autorka podjęła się zagadnienia zbadania właściwości oleju pirolitycznego jako paliwa do silników spalinowych. W

celu oceny tych właściwości przeprowadziła badania mające na celu określenie zdolności tworzenia mieszanki palnej oraz przebiegu spalania.

Z uwagi na tematykę rozprawy, problem badawczy oraz zakres realizacji pracy należy uznać, że **rozprawa ta spełnia kryteria stawiane tematom rozpraw doktorskich realizowanym w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.**

Analiza rozprawy doktorskiej

Oceniana rozprawa doktorska liczy łącznie 119 stron.

Treść pracy podzielona jest na 6 rozdziałów poprzedzonych wykazem oznaczeń, na końcu pracy zamieszczono streszczenie w języku polskim i angielskim oraz wykaz cytowanej literatury.

Struktura ocenianej rozprawy jest poprawna, a kolejność rozdziałów logicznie powiązana z sobą.

W **rozdziale 1 „Wstęp”** (str. 9-12), Autorka wprowadza w tematykę rozprawy opisując krótko aspekty ekologiczne i ekonomiczne gospodarki odpadami o potencjale energetycznym. Opisuje także syntetycznie aspekty prawne związane z utylizacją odpadów, a także aspekty techniczne i technologiczne związane z energetyczną utylizacją odpadów. W rozdziale tym Doktorantka zwraca uwagę na fakt, że problem utylizacji tworzyw sztucznych jest tematem licznych badań na świecie, a ewentualne wykorzystanie olejów pirolitycznych do turbin gazowych i silników spalinowych wymaga poznania zjawiska ich rozpylania, zapłonu jak i spalania.

Rozdział 2 „Stan wiedzy” (str. 13-25) zawiera przegląd informacji literatury na temat rozpatrywanych w rozprawie zagadnień. Zawarte w tym rozdziale informacje podzielone są na cztery nieponumerowane podrozdziały:

- mechanizm rozpadu strugi wtryskiwanego paliwa: primary i secondary breakup,
- analiza wtrysku za pomocą parametru SMD (Sauter Mean Diameter),
- liczby kryterialne: Webera i Ohnesorge do oceny jakości rozpylania oleju pirolitycznego przez wtryskiwacz wysokociśnieniowy,
- analiza porównawcza spalania oleju pirolitycznego z paliwami klasycznymi w silniku tłokowym.

Przedstawione w tym rozdziale informacje zawierają syntetyczny przegląd poszczególnych zagadnień w świetle aktualnych badań prowadzonych w tym zakresie. Doktorantka w rozdziale tym wprowadza w zagadnienia metodyki badawczej powszechnie stosowanej w zakresie proponowanych badań. Podkreśla również fakt, że w literaturze brak jest danych dotyczących analizy wtrysku i spalania olejów pirolitycznych z wykorzystaniem analizy obrazu zarejestrowanego szybką kamerą cyfrową.

Rozdział 3 „Cel, zakres i tezy pracy” (str. 27-29) – w rozdziale tym Doktorantka przedstawia cel badań, wskazując że podstawowymi celami rozprawy są:

- rozpoznanie przebiegu wtrysku i rozpylania oleju pirolitycznego w warunkach temperatury i ciśnienia atmosferycznego,

- rozpoznanie przebiegu wtrysku, zapłonu i przebiegu spalania oleju pirolitycznego w komorze o stałej objętości w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury typowych dla silnika ZS,
- wykonanie analizy porównawczej z benzyną i olejem napędowym.
Problem badawczy rozprawy doktoranta definiuje jako:
- ocena przydatności oleju pirolitycznego jako potencjalnego paliwa silnikowego;
- ocena jakościowa tworzenia mieszanki palnej w cylindrze silnika przez wtryskiwacz wysokociśnieniowy na podstawie właściwości fizycznych tego oleju,
- powiązanie wielkości opisujących wtrysk z wybranymi wskaźnikami/liczbami kryterialnymi oraz analiza porównawcza wtrysku, rozpylania, samozapłonu i rozwoju płomienia

Ponadto Doktorantka w rozdziale tym formułuje aż trzy tezy:

Teza 1: Zjawiska rozpylania i tworzenia mieszanki palnej oleju pirolitycznego uzyskanego po destylacji surowej cieczy pochodzącej z pirolizy HDPE przebiegają podobnie do zjawisk występujących dla typowej benzyny 95 w instalacji bezpośredniego wtrysku w silniku ZI;

Teza 2: Badana ciecz może być zastosowana jako zamiennik dla benzyny 95 do zasilania nowoczesnego silnika samochodowego wyposażonego w instalację wysokociśnieniowego wtrysku bezpośredniego.

Teza 3: Przebieg spalania oleju pirolitycznego zachodzi szybciej, ze względu na większy udział fazy spalania kinetycznego w porównaniu do przebiegu spalania oleju napędowego.

Ponadto w rozdziale tym doktorantka zamieszcza zakres pracy oraz schemat blokowy układu rozprawy.

W **rozdziale 4 „Metodyka badawcza”**, (str. 31-57) Doktorantka szczegółowo opisała metodykę badawczą wykorzystaną podczas realizacji badań. Zawarte w tym rozdziale informacje dość szczegółowo opisują wykorzystane podczas badań stanowiska badawcze:

- stanowisko Laser Particle Sizer - Malvern-Spraytec do rejestracji przebiegu wtrysku z wysokociśnieniowego wtryskiwacza benzynowego w warunkach ciśnienia i temperatury otoczenia.
- stanowisko z komorą spalania z wizualizacją za pomocą szybkiej kamery cyfrowej przebiegu wtrysku i zapłonu w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury.

W rozdziale tym przedstawiony jest też szczegółowy opis warunków w jakich prowadzone były badania, a także metodyka wyznaczania przebiegu wydzielania ciepła oraz analizy przetwarzania obrazu zarejestrowanego szybką kamerą cyfrową.

Rozdział 5 „Wyniki badań eksperymentalnych i ich analiza”, (str. 59-102) zawiera wyniki przeprowadzonych badań oraz ich analizę. W rozdziale tym Doktorantka przedstawiła między innymi:

- badania właściwości oleju pirolitycznego;

- analizę porównawczą wtrysku: oleju pirolitycznego, benzyny oraz oleju napędowego oraz porównania tych paliw za pomocą liczb kryterialnych Webera i Ohnesorge, a także SMD;
- analizę wtrysku i spalania oleju pirolitycznego i oleju napędowego w komorze o stałej objętości przy różnych ciśnieniach;
- badanie zasięgu i prędkości rozpylania paliwa w podwyższonym ciśnieniu;
- rozdział ten zawiera również podsumowanie w którym Doktorantka przedstawiła wnioski wynikające z przeprowadzonych badań;
- rozdział ten zakończony jest podrozdziałem "Analiza błędów" w którym zamieszczone są informacje o dokładności wielkości mierzonych, jak również dokładności wielkości wyznaczonych pośrednio.

Ostatni **6 rozdział „Wnioski”** (str. 103-105) zawiera wnioski, które Doktorantka podzieliła na: wnioski ogólne, wnioski szczegółowe, wnioski użytkowe oraz wnioski przyszłościowe.

Praca zawiera również streszczenie w języku polskim i angielskim (str. 106-111).

Na końcu rozprawy (str. 112-119) zamieszczony jest „**Wykaz literatury**”, zawierający 74 pozycje. Warto podkreślić, iż wykaz ten zawiera poza jednym wyjątkiem publikacje anglojęzyczne pochodzące z renomowanych międzynarodowych czasopism o zasięgu ogólnoswiatowym. W wykazie cytowanej literatury występują również 3 publikacje współautorskie Doktorantki.

Ocena merytoryczna rozprawy

Oceniana rozprawa dotyczy aktualnego tematu badawczego, wpisującego się w dyscyplinę naukową inżynieria mechaniczna. Podjęty w rozprawie temat utylizacji odpadów z tworzyw sztucznych jest obecnie jednym z ważniejszych wyzwań dla nauki na całym świecie. Jednym z możliwych sposobów zagospodarowania tych odpadów jest właśnie wykorzystanie ich do produkcji paliw do silników spalinowych, co jest przedmiotem badań przedstawionych w recenzowanej rozprawie.

Rozprawa doktorska mgr M. Szwai stanowi spójną logiczną całość, zawartość poszczególnych rozdziałów jest kompletna, nie wymaga uzupełnień i jest logicznie z sobą powiązana. Doktorantka po krótkim wprowadzeniu w tematykę pracy, syntetycznie przedstawiła przegląd literatury dotyczący rozpatrywanego problemu. Następnie jasno sprecyzowała cel i zakres pracy formułując trzy tezy. W dalszej części rozprawy opisała metodykę badawczą opasując dość szczegółowo stanowiska badawcze, plan eksperymentu, sposób wyznaczania przyjętych wskaźników porównawczych badanych paliw, jak również zastosowaną metodykę analizy zarejestrowanych obrazów.

Do ceny przydatności oleju pirolitycznego jako potencjalnego paliwa do silników tłokowych o zapłonie iskrowym jak i samoczynnym Doktorantka przeprowadziła badania porównawcze analizowanego paliwa z benzyną 95 i olejem napędowym.

Warto podkreślić iż zasadnicza część badań była przeprowadzona w Michigan Technological University przy wykorzystaniu nowoczesnej techniki pomiarowej nie

stosowanej powszechnie, dzięki czemu uzyskane wyniki badań są niewątpliwie nowe i pozwalają na szeroką analizę badanych zjawisk.

Badania dotyczące analizy przebiegu wtrysku przeprowadzone zostały na stanowisku Laser Particle Sizer, a jako wartość porównawczą wykorzystano średnią średnicę kropeł wyznaczoną wg metody SMD (Sauter Mean Diameter).

Przebieg spalania porównywanych paliw (pominięto benzynę z uwagi na brak możliwości wymuszenia zapłonu) przeprowadzono w komorze o stałej objętości, pomiar ciśnienia w komorze realizowano z częstotliwością próbkowania 100 kHz, dodatkowo stanowisko było wyposażone w dwie kamery do rejestracji obrazu z szybkością 20 000 klatek/s, co pozwalało na cyfrową analizę obrazu.

Wykorzystana podczas realizacji rozprawy aparatura i metodyki badawcze nie budzą żadnych wątpliwości, a uzyskane wyniki badań można uznać za kompletne i wystarczające do realizacji rozprawy doktorskiej. Co istotne w rozprawie znalazł się podrozdział 5.6 „Analiza błędów”, w którym Doktorantka wyznaczyła niepewność pomiarową dla uzyskanych wyników.

Uwagi krytyczne dotyczące ocenianej rozprawy:

- „Teza 2: badana ciecz może być zastosowana jako zamiennik dla benzyny 95 do zasilania nowoczesnego silnika samochodowego wyposażonego w instalację wysokociśnieniowego wtrysku bezpośredniego”, wydaje się być nie w pełni potwierdzona przeprowadzonymi badaniami. Brak również odniesienia do tej tezy w wnioskach;
- brak w pracy uzasadnienia wyboru metodyki analizy zarejestrowanych obrazów. Doktorantka podaje nazwy funkcji i filtrów z jakich korzystała podczas poszczególnych etapów obróbki zarejestrowanych obrazów, nie argumentując zalet i ograniczeń tych rozwiązań, w stosunku do innych dostępnych metod;

Oczekiwałam ustosunkowania się Doktorantki do powyższych kwestii podczas obrony rozprawy.

Rozprawa doktorska napisana jest poprawnym językiem technicznym, zawiera nieliczne błędy językowe i stylistyczne. Cytowanie literatury jak również forma prezentacji wyników jest czytelna i nie budzi żadnych zastrzeżeń.

Nie mniej jednak w trakcie jej czytania zauważyłem nieliczne drobne błędy językowe i stylistyczne, przykładowo:

- str. 9 – jest „Odpady o relatywnie dużej wartości odpadowej ...” – powinno być „... wartości opałowej”;
- str.10 – jest „nad utylizacją plastikowych odpadów” – określenie „plastikowych” jest żargonem powinno używać się określenia „tworzywa sztuczne” lub „polimery”;
- str. 31 – jest „skład oleju pirolitycznego”;
- str. 47 – równanie 4.14 jest oznaczone jak (4.13);

Podsumowując ocenę przedstawionej do oceny rozprawy stwierdzam, że oceniana rozprawa doktorska zawiera oryginalne i wartościowe wyniki dotyczące oceny oleju pirolitycznego otrzymanego z tworzyw sztucznych jako potencjalnego paliwa do silników spalinowych. Przedstawione w pracy badania zostały wykonane

na unikatowych stanowiskach badawczych, wykorzystany do analizy aparat matematyczny jest zgodny z aktualnie obowiązującymi trendami. Poziom analizy i prezentacji wyników świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktorantki do prowadzenia prac naukowych z wykorzystaniem nowoczesnych technik pomiarowych jak i oprogramowania naukowo-inżynierskiego.

Konkluzja

Zawarte w mojej recenzji nieliczne uwagi krytyczne nie wpływają na ogólną, bardzo pozytywną ocenę rozprawy, ponadto mogą mieć one charakter dyskusyjny.

Biorąc, zatem pod uwagę omówione i ocenione wyżej rezultaty rozprawy doktorskiej stwierdzam, że rozprawa doktorska **mgr inż. Magdaleny Szwai pt. „Badanie przebiegu tworzenia mieszanki palnej za pomocą wtrysku kondensatu pirolitycznego w komorze o stałej objętości (Analysis of a combustible mixture formation by the injection of pyrolysis oil in a constant volume combustion chamber)”** spełnia wymogi stawiane pracom na stopień doktora nauk technicznych zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r, - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.). Wnioskuje zatem o **dopuszczenie mgr inż. Magdaleny Szwai do publicznej obrony** przedstawionej rozprawy doktorskiej.

Jednocześnie biorąc pod uwagę sposób realizacji badań, zastosowaną metodykę analizy uzyskanych wyników, jak również formę ich prezentacji wnioskuje o wyróżnienie ocenianej rozprawy doktorskiej.