

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

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Hallera**  
**pt. „Wpływ zawartości wody w mikroemulsji olej napędowy – woda**  
**na poziom emisji tlenków azotu NO<sub>x</sub> oraz na zużycie paliwa”**  
**Promotor: dr hab. inż. Radosław Wróbel, prof. uczelni**

*Recenzja wykonana na zlecenie nr W10/D/31/2023 Przewodniczącego Rady Dyscypliny  
Naukowej Inżynieria Mechaniczna prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego  
z dnia 6.04.2023.*

### **Ocena problematyki pracy**

Ograniczenie emisji związków toksycznych do atmosfery to obecnie jedno z największych wyzwań ludzkości. Problem ograniczenia emisji dotyczy również pojazdów, maszyn roboczych jak i układów kogeneracyjnych, w których silniki spalinowe są głównym źródłem napędu. Użytkowane obecnie silniki spalinowe pomimo zaawansowanych metod redukcji związków toksycznych są znaczącym źródłem emisji: tlenku węgla (CO), tlenków azotu (NO<sub>x</sub>), węglowodorów (HC), cząstek stałych (PM) jak również emisji CO<sub>2</sub> odpowiedzialnego za efekt cieplarniany.

Pomimo tendencji odchodzenia od wykorzystywania silników spalinowych jako głównego źródła napędu, nadal prowadzone są liczne prace naukowe, których zadaniem jest obniżenie szkodliwego oddziaływania silników spalinowych na środowisko naturalne.

W recenzowanej rozprawie doktorskiej Autor podjął się oceny wpływu dodatku wody do paliwa na poziom emisji tlenków azotu (NO<sub>x</sub>), zadymienie spalin oraz zużycie paliwa przez silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym.

Pomimo, iż tematyka zasilania silników o zapłonie samoczynnym emulsjami nie jest nowa, jest nadal aktualna wciąż pojawiają się nowsze rozwiązania pozwalające na

wytwarzanie jednorodnych i trwałych emulsji oleju napędowego i wody. Zatem z punktu widzenia walorów naukowych i praktycznych należy uznać, że tematyka recenzowanej pracy doktorskiej jest ważna i aktualna. **Rozprawa doktorska spełnia zatem wymagania jakie stawia się tematом prac doktorskich realizowanym w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn (obecnie inżynieria mechaniczna).**

### **Analiza rozprawy doktorskiej**

Oceniana rozprawa doktorska liczy łącznie 129 stron.

Treść pracy podzielona jest na 10 rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz wykazem symboli i skrótów. Na końcu pracy zamieszczony został wykaz literatury, a także spis tabel i ilustracji. Struktura ocenianej rozprawy jest poprawna, a kolejność rozdziałów logicznie powiązana z sobą.

**W Rozdziale 1 „Wstęp”**, Autor wprowadza w tematykę oddziaływania silników na środowisko naturalne, a także wskazuje, że jednym z sposobów obniżenia emisji związków toksycznych do atmosfery może być wykorzystanie do zasilania emulsji oleju napędowego i wody.

**Rozdział 2 „Procesy powstawania produktów spalania w silnikach spalinowych”** to rozdział, w którym Autor opisał mechanizmy powstawania związków toksycznych, a w szczególności tlenków azotu, tlenku węgla oraz sadzy.

**Rozdział 3 „Sposoby ograniczania powstawania i emisji NO<sub>x</sub>”** - Autor bardzo krótko opisuje wybrane metody redukcji emisji NO<sub>x</sub> do atmosfery zwracając uwagę, że od prawie 100 lat prowadzone są próby doprowadzania wody do komory spalania co powoduje obniżenie temperatury w komorze spalania, a tym samym sprzyja obniżeniu emisji NO<sub>x</sub>.

**W rozdziale 4 „Analiza stanu wiedzy – studiom literaturowe”**, Doktorant opisał główne kierunki badań silników. Szczególną uwagę zwrócił na problem zasilania silników emulsjami olejowo – wodnymi, co bezpośrednio jest związane z tematyką rozprawy.

**W rozdziale 5 „Cel badawczy”**, przedstawiony został cel pracy, który związany jest z analizą wpływu wykorzystania emulsji olejowo-wodnej na pracę silnika o zapłonie samoczynnym. W pracy Autor skupił się głównie na następujących parametrach: emisja NO<sub>x</sub>, jednostkowe zużycie paliwa oraz zadymienie spalin.

**Rozdział 6 „Paliwa emulsyjne”**, zawiera informacje o właściwościach emulsji i mikroemulsji. Doktorant dość szeroko opisał rodzaje emulsji i ich właściwości, opisał także

procedurę wytwarzania mikroemulsji wykorzystywanej podczas badań oraz wyniki badań laboratoryjnych przygotowanych próbek paliwa.

Kolejny **rozdział 7 „Metodyka badań”** zawiera informacje o aparaturze pomiarowej oraz silnikach na których przeprowadzane były badania. W rozdziale tym Doktorant przedstawił również wyniki wstępnych badań przeprowadzonych na jednocylindrowym silniku SB31, jak również plan badań zasadniczych przeprowadzonych na silniku VW 1,9 TDI.

**Rozdział 8 „Badania eksperymentalne”**, rozdział ten zawiera wyniki uzyskane podczas badań zasadniczych silnika VW 1,9 TDI zasilanych mikroemulsjami o zawartości wody odpowiednio 5, 10, 15, 20, 25%. Wyniki zostały przedstawione w formie tabel jak i wykresów, zawierają one zarejestrowane i obliczone wartości: stężenia NO<sub>x</sub>, jednostkowego zużycia paliwa i zadymienia spalin.

**Rozdział 9 pracy „Metody statystyczne”**, zawiera statystyczną analizę uzyskanych wyników. Doktorant wyznaczył: wartość średnią, błąd standardowy, medianę, odchylenie standardowe, wariancje, wartość minimalną i maksymalną oraz rozstęp dla otrzymanych w trakcie pomiarów danych.

**Wnioski** wynikające z przeprowadzonych badań Doktorant zawarł w rozdziale 10.

Wykaz cytowanej literatury zawiera 81 pozycji z czego większość stanowi literatura anglojęzyczna.

Na końcu rozprawy Doktorant zamieścił spis tabel i ilustracji.

### **Ocena merytoryczna rozprawy**

Doktorant w swojej rozprawie podjął się aktualnego tematu badawczego, wpisującego się w dyscyplinę, w której realizowany jest przewód doktorski. Podjęty w rozprawie temat jest przedmiotem kilkudziesięcioletnich badań wielu badaczy, którzy podkreślają pozytywny wpływ dodatku wody do paliwa zasilającego silniki o zapłonie samoczynnym. Niestety, dotychczas prowadzone badania nie doprowadziły do szerszego wykorzystania tego typu rozwiązań. Jak sam Doktorant zaznacza (str. 40) tego typu rozwiązania mogą mieć zastosowanie jedynie w przypadku zastosowania silników o zapłonie samoczynnym do napędu agregatów prądotwórczych.

Oceniana rozprawa stanowi spójną logicznie całość, nie mniej jednak wydaje się, że niektóre z rozdziałów z uwagi na małą objętość i podobną tematykę mogłyby być z sobą połączone.

Doktorant zrealizował bardzo szeroki zakres badań zarówno laboratoryjnych w zakresie badania uzyskanych mikroemulsji jak i badań silnikowych. Warto również podkreślić, iż badania silnikowe zostały przeprowadzone w pięciu powtórzeniach, co pozwala na szerszą analizę uzyskanych wyników.

Na podstawie przeprowadzonych badań Doktorant uzyskał potwierdzenie postawionego celu badawczego. Dowiódł, że zasilanie silnika wytworzoną według oryginalnej metody mikroemulsją oleju napędowego i wody pozwala na znaczną redukcję emisji NO<sub>x</sub>, a także obniżenie zadymienia spalin. Co ważne podkreśla, że negatywnym skutkiem takiego zasilania silnika jest jednak zwiększenie jednostkowego zużycia paliwa.

Podsumowując wyniki swoich badań Doktorant przedstawił liniowe modele matematyczne opisujące zależność emisji NO<sub>x</sub> i jednostkowego zużycia paliwa w funkcji zawartości wody w paliwie. Przedstawione modele wydają się jednak niezbyt dokładne (współczynnik R<sup>2</sup> odpowiednio 0,337 i 0,19), nie wiadomo dlaczego takiego modelu Doktorant nie sformułował dla zadymienia spalin, którego analiza była również przedmiotem badań.

Uwagi krytyczne dotyczące ocenianej rozprawy:

- w mojej opinii wykaz cytowanej literatury jest dość ubogi (zaledwie 81 pozycji) wydaje się że Autor mógł szerzej odnieść się zarówno do zagadnień przygotowywania emulsji olej napędowy – woda, jak również do wpływu wody na wskaźniki eksploatacyjne silnika;
- w rozprawie przedstawiony jest bardzo ogólny opis zastosowanego emulgatora do wytwarzania mikroemulsji. Podany opis (str. 29) zawiera bardzo ogólny skład tego dodatku, np. zawartość alkoholu etylowego podana jest jako 5-95%. Podobnie podane są udziały procentowe pozostałych składników emulgatora. Wydaje się że podczas badań użyty był jeden emulgator o określonym składzie i celowe byłoby podanie, jeśli nie precyzyjnego składu, to przynajmniej właściwości, które zadecydowały o jego zastosowaniu;
- moje wątpliwości budzą wyniki badań laboratoryjnych paliwa przedstawione w tabeli 1 (str. 31). Zarówno gęstość jak i lepkość uzyskanego paliwa rośnie wraz z udziałem zawartości wody w paliwie do 20%, natomiast dla 25% udziału wody w paliwie wartości tych parametrów maleją. Wyniki te rodzą pytanie, co może być tego przyczyną, tym bardziej że gęstość paliwa wyliczana z przedstawionych wzorów (42) i (43) (str. 28) przy

25% powinna wzrosnąć w stosunku do gęstości obliczonej dla 20%. Podobnie anormalny wydaje się wzrost ciepła spalania i wartości opałowej podany w tab. 1 dla zawartości wody 25% w stosunku do paliwa zawierającego 20% wody. Co prawda Doktorant wyjaśnia, że emulsja o zawartości 25% wody rozwarstwiała się w temperaturze 40°C, jednak większość badań prowadzona była w niższych temperaturach, zatem emulsja powinna być jednorodna.

- przedstawiony na rys. 3 widok próbek badanego paliwa dość znacznie różni się od oczekiwanej zmiany barwy emulsji w zależności od zawartej w niej wody;
- nieprecyzyjnie podane dane silnika, na którym przeprowadzono zasadniczą część badań. Silniki VW 1,9 TDI, nawet te z układami zasilania wyposażonymi w pompowtryskiwacze były produkowane w kilku wersjach mocy. Porównując osiągi silnika z katalogiem można wnioskować, że był to silnik o oznaczeniu AJM (prawdopodobnie błędnie podany w rozprawie stopień sprężania, powinno być 18:1);
- błędnie (str. 40) podana jest informacja, iż podczas zasilania silnika mikroemulsją zawierającą 25% wody zarejestrowano spadek momentu obrotowego o 28%. W rzeczywistości spadek ten wynosił 22% (z 230 Nm przy zasilaniu olejem napędowym do 180 Nm przy zasilaniu mikroemulsją z 25 % dodatkiem wody);
- brak podania dokładności pomiarowej stosowanych w trakcie badań analizatorów;
- dlaczego badania na silniku SB31 były przeprowadzone przy prędkości obrotowej 1200 obr/min. jeśli jak sam Doktorant zaznacza, agregaty prądotwórcze pracują przy prędkościach 1500 lub 3000 obr/min.;
- błędne sformułowanie (str. 40) „W urządzeniach tych (chodzi o agregaty prądotwórcze) ważne jest zachowanie jednostajnej prędkości obrotowej, równej wielokrotności częstotliwości z jaką ono pracuje. Dla prądu przemiennego częstotliwość ta wynosić 50 Hz”. Częstotliwość prądu przemiennego może być dowolna, natomiast częstotliwość prądu w sieci energetycznej w Europie wynosi 50 Hz, a w USA 60 Hz.
- opisane w rozdziale 3 „Sposoby ograniczania emisji NO<sub>x</sub>” nie zawierają informacji o układzie EGR, który od dawna jest powszechnie stosowany w silnikach w celu obniżenia emisji NO<sub>x</sub>. Należy podkreślić, że układ EGR jest standardowym wyposażeniem silnika na którym były prowadzone badania.
- moje wątpliwości budzi też sposób wyznaczania jednostkowego zużycia paliwa. Z przedstawionych na stronie 50 informacji wynika, że zużycie paliwa określano z wykorzystaniem metody objętościowej, uwzględniając gęstość paliwa (mikroemulsji) w

funkcji zawartości wody, co jest w pełni zasadne. Niestety z podanych informacji wynika, że zużycie paliwa było za każdym razem określane jako masa mikroemulsji wtryskiwana do komory spalania w odniesieniu do jego mocy. Wydaje się, że nie pomijano masy wody zawartej w wtryskiwanej dawce paliwa. Zatem, tak duży wzrost jednostkowego zużycia paliwa wynikał z tego, że zużycie emulsji o różnej zawartości wody było porównywane z zużyciem „czystego” oleju napędowego. W przypadku stosowania różnych paliw właściwszym wskaźnikiem porównawczym byłaby np. sprawność ogólna silnika;

- kolejnym mankamentem rozprawy jest brak indykowania silnika. Analiza przebiegu ciśnienia w komorze spalania pozwoliłaby określić wpływ dodatku wody na przebieg zmian ciśnienia, wywiązywania się ciepła i temperatury w komorze spalania, co ma istotny wpływ na emisję  $\text{NO}_x$ ;
- w przeprowadzonych badaniach nie kontrolowano również charakterystyki podawania paliwa. W tego typu układach zasilania ciśnienie wtrysku jest zależne jedynie od prędkości obrotowej, zatem można przyjąć, że podczas badań było stałe. Nie mniej jednak wtrysk większej dawki paliwa przy zasilaniu emulsją musiał skutkować wydłużeniem kąta wtrysku paliwa, tak więc wtrysk paliwa był rozciągnięty w czasie, mogło to mieć wpływ na obniżenie sprawności silnika. Wydaje się, że monitorowanie wtrysku np. poprzez kontrolę sygnału sterującego elektrozaworem pompowtryskiwacza dostarczyłoby cennych informacji o reakcji sterownika silnika na zaistniałe warunki pracy.
- ostatnią kwestią wartą poruszenia jest brak informacji o kontroli ilości powietrza zasysanego przez silnik, co też mogło istotnie wpływać na stężenie  $\text{NO}_x$  jak i zadymienie spalin.

Oczekiwałem ustosunkowania się Doktoranta do powyższych kwestii podczas obrony rozprawy.

Praca napisana jest poprawnym językiem technicznym, nie mniej jednak w trakcie jej czytania zauważyłem następujące drobne błędy językowe i stylistyczne:

- strona 5 – jest „ $\text{HO}_2$  – dwutlenek wodoru” – związek chemiczny o podanym wzorze nie istnieje;
- strona 5 – jest „OH – tlenek wodoru” – związek chemiczny o podanym wzorze nie istnieje;
- strona 19 – jest „moc oraz moment obrotowy odbierany przez wał korbowy”;
- strona 19 – jest „poprawić wydajność spalania”;
- strona 19 – jest „poprawia oszczędność paliwa”;

- strona 20 – jest „uzyskane powiększenie obrazów kropeł jest do 30 razy większe od rzeczywistego rozmiaru”;
- strona 23 – jest „optymalny procent wody w emulsji”
- strona 27 – jest „zapobiega jego późniejszego rozwarstwieniu;
- strona 32 – jest „zawartość wody w paliwie nieznacznie różni się od wyliczonych wartości, które otrzymano w trakcie procesu wywarzania emulsji”;
- strona 34 – jest „Wstępne badania z użyciem hamowni silnikowej wykonano na stanowisku wyposażonym w jednocylindrowy silnik badawczy”;
- strona 36 – jest „Hamulec był wyposażony w tensometryczny czujnik do pomiaru siły, którą obciążano silnik”;
- strona 41 – jest „badanymi parametrami były stężenia: NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM, G<sub>e</sub>;
- strona 77 – jest „Przy obciążeniu silnika równym 120 Nm, rozkład normalny dla badanych paliw uzyskano zbliżone rozkłady normalne”;
- strona 82 – jest „obarczone są niepewnością pomiarową wynikającą z wariacji warunków testowania”.

## Konkluzja

Zawarte w mojej recenzji uwagi krytyczne nie wpływają na ogólną, pozytywną ocenę rozprawy, a często uwagi te mogą mieć charakter dyskusyjny.

Biorąc, zatem pod uwagę omówione i ocenione wyżej rezultaty rozprawy doktorskiej stwierdzam, że rozprawa doktorska **mgr inż. Piotra Hallera pt. „Wpływ zawartości wody w mikroemulsji olej napędowy – woda na poziom emisji tlenków azotu NO<sub>x</sub> oraz na zużycie paliwa”** spełnia wymogi stawiane pracom na stopień doktora nauk technicznych, w rozumieniu art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (*Dz. U. nr 65, poz.595 z późniejszymi zmianami*) oraz ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (*Dz. U. 2018 poz. 1668*). Wnioskuje zatem o **dopuszczenie mgr inż. Piotra Hallera do publicznej obrony** przedstawionej rozprawy doktorskiej.

