

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz
Instytut Napędów i Lotnictwa
Politechniki Poznańskiej

O C E N A
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Białego
pt.: „Metoda ograniczania spalania stukowego w silniku Wankla”

podstawa opracowania: pismo Z-cy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Lubelskiej RDN/IM/203/2024 z dnia 16.09.2024, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej wraz z umową i rachunkiem

1. UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU ROZPRAWY

Ze względu na to, że transport jest najbardziej dynamicznie rozwijającą się dziedziną techniki, można zauważyć wiele weryfikacji konstrukcyjnych istniejących już maszyn, a także pojawianie się całkowicie nowych koncepcji. W związku z tym producenci silników wprowadzają rozwiązania techniczne ograniczające ich negatywny wpływ na środowisko naturalne. Główną gałęzią transportu jest transport drogowy, choćby ze względu na liczbę użytkowanych pojazdów.

Mgr inż. Michał Biały w swojej rozprawie doktorskiej podjął aktualny i istotny problem o charakterze naukowym i praktycznym, związany z metodą ograniczania spalania stukowego w silniku Wankla, zasilanego wodorem. Wprowadzenie wodoru jako paliwa alternatywnego znajduje się obecnie w centrum zainteresowań wielu ośrodków naukowych i jednostkach naukowo-badawczych. Z kolei Felix Wankel już w roku 1929 zgłosił swój pierwszy patent na silnik rotacyjny, który w 1957 stał się działającym prototypem i trafił do seryjnej produkcji w 1963 roku. Mimo wielu prób zastosowań w masowej produkcji, znajduje on marginalne zastosowanie, obecnie w samochodach firmy Mazda.

Badania naukowe nad tego rodzaju konstrukcjami są prowadzone przez szereg ośrodków naukowo-badawczych, jednakże lektura publikacji naukowych wykazuje, że autorzy koncentrowali się do tej pory głównie na analizach symulacyjnych i modelowaniu matematycznym. Deficyt prac poświęconych badaniom empirycznym potwierdza słuszność podjętej przez Autora problematyki badawczej oraz wskazuje, że tematyka, zakres oraz cele przedstawione w pracy zostały trafnie zdefiniowane.

Mgr inż. Michał Biały przedstawił rozprawę doktorską, dotyczącą badań nad wpływem wtrysku wody podczas pracy silnika spalinowego na zdolność przeciwdziałania zjawisku spalania stukowego, ze szczególnym uwzględnieniem silnika Wankla zasilanego

wodorem. Wtrysk wody od wielu lat znajduje zastosowanie w silnikach wyczynowych o zapłonie iskrowym dla wyeliminowania spalania stukowego przy znacznym podniesieniu stopnia sprężania. Stosuje się również wtrysk wody dla ograniczenia emisji tlenków azotu w silnikach okrętowych. W świetle wymienionych aspektów uważam, że podjęta przez Autora problematyka jest istotna i wnosi nowe aspekty w zakresie badań nad nowymi rozwiązaniami silników tłokowych.

Zwłaszcza, że znając współczesny stan wiedzy światowej na temat podjętego zagadnienia uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Białego stanowi oryginalne osiągnięcie Autora i wnosi ważne aspekty do badań nad procesem ograniczania spalania stukowego w silniku Wankla zasilanego wodorem jako paliwem. Praca porusza aktualny i ważny temat z zakresu inżynierii mechanicznej i energetyki, zwłaszcza w kontekście poszukiwania bardziej efektywnych i ekologicznych rozwiązań w silnikach spalinowych. Zastosowanie wodoru jako paliwa oraz wtrysku wody to obszary o dużym potencjale badawczym.

Postawione zadanie naukowe we właściwy sposób spełnia wymagania stawiane rozprawie doktorskiej. Tematyka rozprawy jest aktualna i zgodna z kierunkami badań nad nietypowymi silnikami tłokowymi w aspekcie poprawy bezpieczeństwa ich eksploatacji oraz wykorzystania perspektywicznego paliwa jakim jest wodór.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 141 stron. Praca została podzielona na 6 zasadniczych rozdziałów. Treść obejmuje również streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz zastosowanych skrótów i symboli oraz wykaz literatury. Bibliografię stanowi 144 pozycji o charakterze naukowym oraz poznawczym, obejmujących tematykę badawczą rozprawy. Uwzględniono w nich artykuły naukowe w języku polskim i angielskim, jak również książki oraz patenty. Na uwagę zasługuje cytowanie przez Autora wielu relatywnie nowych publikacji anglojęzycznych. Potwierdza to aktualność podjętej problematyki oraz świadczy o rzetelnym przeglądzie literatury dokonany przez Doktoranta. Cała dysertacja została napisana poprawnym i precyzyjnym językiem technicznym.

Przedstawiona rozprawa doktorska dotyczy badań nad wpływem wtrysku wody podczas pracy silnika spalinowego na zdolność przeciwdziałania zjawisku spalania stukowego, ze szczególnym uwzględnieniem silnika Wankla zasilanego wodorem. Autor postawił tezę, że kąt początku pośredniego wtrysku wodoru ma istotny wpływ na ilość wody potrzebnej do ograniczenia spalania stukowego.

Praca dotyczy problemu spalania stukowego w obiekcie badawczym jakim był silnik Wankla zasilany paliwem wodorowym, co jest ważne dla rozwoju technologii niskoemisyjnych. W literaturze naukowej brakuje badań łączących pośredni wtrysk wodoru, zmianę początku wtrysku oraz analizę skłonności do spalania stukowego w silnikach Wankla, gdyż silniki z wirującym tłokiem są mniej popularne niż klasyczne tłokowe, mają one specyficzny przebieg procesu spalania, różniący się od klasycznych silników. Dotychczasowe badania dotyczące zasilania wodorem nie koncentrują się na wpływie zasilania wodorem na spalanie stukowe. Zatem Autor podjął się zbadania tego zjawiska, aby wypełnić lukę w nauce i dostarczyć wielu danych, które mogą mieć praktyczne zastosowanie w przyszłości, zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym.

Zasadniczym celem pracy było zbadanie wpływu wtrysku wody w czasie pracy silnika spalinowego na zdolność przeciwdziałaniu niekorzystnemu zjawisku jakim jest proces spalania stukowego. Postawiono także hipotezę, że istnieje metoda ograniczania zjawiska spalania stukowego w silniku Wankla wykorzystująca wtrysk wody i dostrojenie kąta początku wtrysku wodoru.

Szczególnie cenny jest opis zakresu prac adaptacyjnych silnika fabrycznego Aixro XR50, wyposażonego w gaźnikowy układ zasilania, oraz zamiany go w silnik badawczy, przy zasilaniu paliwem wodorowym wyposażonym we wtrysk wody. Przedstawiono także opis stanowiska badawczego oraz zakres realizowanych badań stanowiskowych.

Dla zweryfikowania tezy naukowej przeprowadzono badania obiektu na hamowni silnikowej niestety tylko w warunkach statycznych. Przeprowadzono analizę statystyczną mającą na celu ocenę istotności czasu wtrysku wody na kąt wtrysku oraz analizę przebiegów wartości ciśnienia w komorze spalania.

Stwierdzono, że kąt wtrysku wodoru znacząco wpływa na potrzebną ilość wody do redukcji spalania stukowego, a także, że zwiększenie kąta wyprzedzenia wtrysku wodoru prowadzi do zmniejszenia maksymalnego ciśnienia w komorze spalania. Zauważono również, że krótkie czasy wtrysku wody powodują niestabilne warunki spalania, podczas gdy długie czasy wtrysku poprawiają jego stabilność. Przy odpowiednio dużej ilości wody wtryskiwanej do komory spalania można całkowicie wyeliminować spalanie stukowe.

3. OCENA ROZPRAWY

Uwagi ogólne

Najważniejsze osiągnięcia dysertacji mgra inż. Michała Białego obejmują:

- przegląd metod wykrywania i ograniczania spalania stukowego, zasilania silników spalinowych wodorem oraz badania silników Wankla zasilanych wodorem,
- opracowanie obiektu badań i stanowiska badawczego do testowania procesu roboczego silnika Wankla zasilanego wodorem z dodatkiem wody,
- wyjaśnienie wpływu kąta wtrysku wodoru na proces roboczy.

Recenzowaną rozprawę oceniam bardzo wysoko pod względem merytorycznym oraz metodycznym. Praca zawiera pojedyncze błędy i niedociągnięcia, które nie rzutują na jej ogólną wysoką ocenę. Układ rozprawy jest logiczny i odpowiada tokowi wykonanych badań oraz analiz. W pracy prawidłowo przedstawiono ciąg czynności badawczych w sposób charakterystyczny dla rozpraw doktorskich. Podział treści rozprawy i kolejność rozdziałów są przejrzyste i nie budzą zastrzeżeń. Praca nie zawiera powtórzeń i błędów logicznych. Rozprawa została napisana wyjątkowo starannie z wykorzystaniem poprawnego języka technicznego. Wykorzystane pojęcia i terminologia są właściwie używane. Przedstawione w pracy rysunki i tabele zostały opracowane bardzo dokładnie, z dbałością o czytelność zamieszczonego w nich tekstu. Materiały ilustracyjne w części teoretycznej dobrze uzupełniają opisywane treści. Na uwagę zasługuje precyzyjne sformułowanie celów badawczych i zakresu pracy. Doktorant wykonał eksperymenty i analizy, które stanowią wartość naukową, jak również użyteczną.

Zalety pracy:

- w pracy zdefiniowano zjawisko spalania stukowego, przyczyny jego mitygacji oraz negatywny wpływ na jednostkę napędową, opisano klasyczne i nowoczesne metody wykrywania i mitygowania spalania stukowego,
- omówiono zastosowanie wodoru jako paliwa alternatywnego do silników wewnętrznego spalania, jego właściwości oraz odwołano się do licznych badań naukowych wskazujących pozytywne i negatywne skutki stosowania tego paliwa,
- scharakteryzowane praktyczne znaczenie silnika Wankla, jego możliwości zastosowania w przemyśle, w pojazdach hybrydowych czy elektrycznych, a także negatywne aspekty stosowania tej jednostki napędowej,

- dokonano analizy stanu wiedzy dotyczącego wykorzystania silnika Wankla zasilanego paliwem wodorowym, omówiono m.in. aspekty ograniczenia emisji spalin czy aspekt wtrysku pośredniego i bezpośredniego wodoru jako dodatku do paliwa głównego,
- dokonano analizy stanu wiedzy wpływu kąta wtrysku innych paliw gazowych na poszczególne parametry tłokowych silników spalinowych, gdzie wyraźnie wskazano wpływ powyższych zależności oraz wpływu kąta wtrysku wodoru na proces roboczy w silniku Wankla,
- opisano szereg modyfikacji mających na celu przystosowanie seryjnego gaźnikowego silnika Wankla Aixro XR50, do zasilania pośrednim wtryskiem wodoru, w tym opracowanie elektronicznego układu zapłonowego, układu wtrysku wody czy oleju smarującego,
- omówiono i podparto przykładami badań weryfikacyjnych wyniki opracowanych modyfikacji silnika do zasilania wodorem,
- scharakteryzowano stanowisko badawcze w skład którego wchodzi hamulec elektrowirowy, układy dodatkowe oraz rejestrujące i sterujące pracą jednostki napędowej,
- dokonano analizy stanu wiedzy w zakresie badania wtrysku wody w silniku spalinowym, na podstawie której autor stwierdza, że systemy wtrysku wody do silników znane są od ponad 100 lat i przez niektórych producentów stosowane są do dnia dzisiejszego,
- opisano plan badań stanowiskowych dla badawczych punktów pomiarowych oraz rejestrowane wartości pomiarowe na podstawie których sporządzono przebiegi wartości ciśnienia w komorze spalania w przypadku wystąpienia spalania stukowego i bez jego inicjacji,
- udowodniono zależność współczynnika stuku od czasu otwarcia wtryskiwacza wody oraz zależność momentu obrotowego, czasu wtrysku wody od kąta początku wtrysku wodoru,
- udowodniono statystyczną istotność zależności czasu wtrysku wody wymaganej do stłumienia zjawiska spalania stukowego od kąta początku wtrysku wodoru,
- na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, że precyzyjne dobranie kąta początku wtrysku wodoru pozwala na znaczące zmniejszenie ilości wody potrzebnej do tłumienia spalania stukowego w silniku Wankla oraz, że zmiana kąta początku wtrysku wodoru ma istotny wpływ na przebieg ciśnienia w cylindrach oraz moment obrotowy generowany przez silnik.

O wysokiej wartości merytorycznej pracy świadczą również:

- właściwe uzasadnienie podjętej tematyki poprzedzone szeroką analizą stanu wiedzy,
- trafne zdefiniowanie celu i zakresu pracy,
- budowa unikalnego stanowiska badawczego z wykorzystaniem najnowszych rozwiązań konstrukcyjnych w silniach spalinowych,
- oryginalność uzyskanych wyników badań,
- wykorzystanie zaawansowanej analizy matematycznej do przetwarzania zarejestrowanych danych,
- logiczna i przejrzysta struktura pracy.

W trakcie realizacji rozprawy Doktorant wykazał się dobrym przygotowaniem do pracy naukowej, w szczególności znajomością zagadnień teoretycznych poświęconych silnikom spalinowym, teorii sterowania silnikiem, umiejętnością wykorzystania współczesnych metod pomiarowych w badaniach silnikowych oraz umiejętnością zaawansowanej matematycznej analizy danych.

Uwagi krytyczne, o charakterze dyskusyjnym i perspektywicznym do dalszej kariery naukowej (habilitacja):

Pomimo bardzo wysokiej oceny merytorycznej rozprawy doktorskiej pojawiają się drobne uwagi i wątpliwości, niektóre o charakterze dyskusyjnym, mające charakter krytyczny:

- tytuł rozprawy umniejsza osiągnięcia Autora, bo nie wspomniano o zasilaniu wodorem, zatem tytuł powinien mieć postać: „Metoda ograniczania spalania stukowego w silniku Wankla zasilanego wodorem”,
- badania zostały przeprowadzone tylko dla dwóch wartości prędkości obrotowej oraz trzech wartości obciążenia (nie uzasadniono dlaczego wybrano te wartości), zatem w warunkach statycznych, a dla badań silników spalinowych kluczowe są zjawiska dynamiczne,
- spośród rejestrowanych parametrów pracy silnika pominięto analizę emisji substancji toksycznych; niemniej jednak zarówno w technice motoryzacyjnej panuje silny trend ukierunkowany na minimalizację emisji substancji toksycznych takich jak tlenek węgla, tlenki azotu, niespalone węglowodory czy dwutlenek węgla jako wskaźnik zużycia paliwa,
- nie uwzględniono analizy błędów i niepewności związanych z pomiarami, co jest kluczowe dla oceny wiarygodności wyników,
- nie wskazano metod niedopuszczających do inicjacji spalania stukowego np. przez zmianę liczby oktantowej paliwa silnikowego,
- nie przeprowadzono analizy stanu wiedzy dotyczącej zasilania silników paliwem oryginalnym z domieszką wodoru,
- dla części z przedstawionych metod wykrywania i mitygowania spalania stukowego nie wskazano wartości parametrów charakterystycznych, dla których przyjmowane jest wystąpienie stuku,
- w analizie stanu wiedzy dotyczącego wykorzystania silnika Wankla zasilanego paliwem wodorowym nie dokonano analizy porównawczej zużycia wodoru do paliwa oryginalnego,
- opisane zostały wyniki analizowanych badań wpływu wtrysku wody na mitygację spalania stukowego i wpływu na parametry robocze silnika jednak nie opisano negatywnego wpływu wtrysku na samą jednostkę napędową,
- w analizie literatury nie odwołano się do badań numerycznych analizujących wpływ wodoru na proces spalania w silniku Wankla, a zwłaszcza na inicjację spalania stukowego,
- w opisie modyfikacji fabrycznego silnika do zasilania wodorem nie zdefiniowano parametrów pracy niektórych układów np. ciśnienia wtrysku benzyny czy wody,
- nie zdefiniowano motywów osadzenia wtryskiwaczy benzyny i wody we wskazanych miejscach w kolektorze dolotowym,
- nie wskazano przyczyn montażu czujników przebiegu ciśnienia w komorach spalania dla prezentowanego położenia kąтового wału korbowego,
- nie opisano z wykorzystaniem jakiej aparatury dokonywano pomiaru współczynnika nadmiaru powietrza w gazach spalinowych.

Pozostałe uwagi ogólne:

1. Znaczna objętość dysertacji, wynikająca m.in. z „podręcznikowego” charakteru niektórych rozdziałów (zwłaszcza rozdziału 1).
2. Mimo bardzo starannego zredagowania rozdziału „8. Dyskusja i podsumowanie” sugerowałbym bardziej przejrzyste zakończenie tej pracy, przez dodanie syntetycznych wniosków w następującej konfiguracji:
 - wnioski ogólne (czy zrealizowano cele pracy i czy udowodniono tezy),

- wnioski szczegółowe,
 - wnioski metodyczne,
 - wnioski uytlytarne,
 - wnioski perspektywiczne (kierunki dalszych badań).
3. Dobrze byloby, zeby Autor nie uytzywala pojticia „optymalny” w znaczeniu popularno-naukowym.
 4. Mylenie pojtci emisji ze stężeniem emisji, np. na rysunkach: 3.29, 3.32 i strony 80–81.
 5. Pracę nalezy pisać w trybie bezosobowym.
 6. Nalezaloby poprawic formatowanie, niepotrzebne puste miejsca.
 7. „Rysunki przedstawiaja” – ma byc na rysunkach przedstawiono.
 8. Brak niektorych oznaczen w „WYKAZ WAZNIEJSZYCH SYMBOLI I OZNACZEN”, co ulatwiloby konsekwentne uytzycie terminologii, np. czy „kat poczatku wtrysku wodoru” to jest to samo „kat wyprzedzenia wtrysku”.
 9. Wprowadzenie nowego pojticia wymaga jego zdefiniowania (np. sila stuku, czas wtrysku wody).

Podsumowanie oceny merytorycznej

Pomimo wymienionych powyzej drobnych uwag krytycznych i sugestii bardzo wysoko oceniam poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej. Na szczegolna uwage zasluguje szeroki zakres wykonanej pracy, trafnosć podjtetej tematyki badawczej oraz duzy wklad intelektualny Autora. Wymienione krytyczne uwagi, niektore o charakterze dyskusyjnym, nie umniejszaja mojej wysokiej oceny recenzowanej pracy.

Przedstawiona rozprawa zawiera wazne tresci poznawcze i praktyczne. Badania przedstawione w pracy zwrócily uwage na duze znaczenie strategii wtrysku wody dla eliminacji spalania stukowego w silniku Wankla zasilanym wodorem. Jednoczesnie osiagnieta zostala cel praktyczny, ktory pozwolil na udzielenie odpowiedzi na temat strategii wtrysku wody dla zapewnienia lepszych osiagow badanego silnika. Powyzsza prac moze byc przyczynkiem do powrotu silnika Wankla zasilanego wodorem do napedu pojazdow samochodowych.

Uwazam, ze opracowany przez Autora material literaturowy oraz badawczy zostaly uytzyc we wlasciwy sposob. Opracowane przez Doktoranta wyniki i przedstawione analizy swiadcza o rzetelnosci i wnikliwosci badawczej Autora. Rozprawa doktorska przedstawiona do oceny moze zostac uznana za oryginalne dzieło, wnoszace duzy wklad i majace duze znaczenie w rozwoju konstrukcji silnika Wankla i wykorzystania wodoru jako paliwa do tlukowych silnikow spalinowych.

Autor podjal sie trudnej problematyki naukowej oraz wykorzystal zlozona metodologie badawcza. Przedstawione w pracy zagadnienia nie wyczerpuja wszystkich zagadnien związanych z analiza procesu wtrysku wody dla eliminacji spalania stukowego w silniku Wankla zasilanego wodorem (o czym wspomniano w powyzej w „Uwagi krytyczne, o charakterze dyskusyjnym i perspektywicznym do dalszej kariery naukowej (habilitacja)”. Obecny stan wiedzy nie pozwala na pelna ocene wplywu tych czynnikow i parametrów na procesy spalania w tym silniku. Wskazuje to na koniecznosć prowadzenia dalszych badań w tym zakresie.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, ze:

- Autor dokonala wyjatkowo trafnego wyboru tematyki swojej pracy, a jej zakres spelnia stawiane wymagania,
- zasadnicze cele pracy zostaly w pelni osiagniete w zakresie przyjtym przez Doktoranta,

bowiem uzasadnione zostały twierdzenia Autora ujęte w tezach pracy, a prezentowane wyniki są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych studiach i eksperymentach własnych i mogą służyć do dalszych prac,

- formalny układ pracy jest prawidłowy,
- dysertacja dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy i praktyki, a w niektórych elementach wnosi do nich nowe treści,
- znaczna akumulacja należycie ustalonych faktów sprawia, że zostało spełnione kryterium logicznej poprawności pracy.

Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria Mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Stwierdzam zatem, że praca mgr. inż. Michała Białego pt.: „Metoda ograniczania spalania stukowego w silniku Wankla” (promotor: prof. dr hab. inż. Mirosław Wendeker) spełnia wymagania określone dla tego typu prac zgodnie z Ustawą z 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r., nr 65, poz. 595, z późn. zm.) w zw. z art. 179 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2020.1086 z późn. zm.), a Autor może być dopuszczony do jej publicznej obrony.