Dr hab. inż. Marek BRZEŻAŃSKI, prof. PK
Wydział Mechaniczny
Politechniki Krakowskiej
31- 864 KRAKÓW
Al. Jana Pawła II 37

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej
Pana mgr. inż. WOJCIECHA CIEŚLIKA pt.

„WPŁYW RECYRKULOWANYCH SPALIN NA PRZEBIEG SPALANIA W UKŁADZIE BEZPOŚREDNIEGO WTRYSKU BENZYNY"

Promotor: **Prof. dr hab. inż. Ireneusz Pielecha**

Podstawa opracowania recenzji:
Pismo Dziekana Prof. dra hab. inż. FRANCISZKA TOMASZEWSKIEGO o decyzji RADY WYDZIAŁU MASZYN ROBOCZYCH I TRANSPORTU POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ z dnia 24.04.2018 r., do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

WYBÓR TEMATYKI ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tematyka rozprawy doktorskiej mgra inż. Wojciecha Cieślika dotyczy ważnych zagadnień związanych z analizą zjawisk zachodzących w procesie spalania w tłokowym silniku spalinowym z uwzględnieniem szczególnego typu systemu recyrkulacji spalin, w którym ładunek znajduje się w otoczeniu spalin. Temat pracy stanowi rozwinięcie podobnego typu prac naukowych prowadzonych przez Heitlanda i Wisłockiego, do których nawiązuje Autor pracy. Z naukowego i praktycznego punktu widzenia jest to ważny i aktualny problem badawczy, którego rozwiązanie może mieć istotny wpływ na zwiększenie sprawności przetwarzania energii, a także zmniejszenie emisji toksycznych składników spalin. Jednocześnie jest to bardzo trudne zadanie do rozwiązania z uwagi na bardzo krótki czas trwania analizowanych zjawisk, które ponadto zachodzą w zamkniętej przestrzeni komory spalania. Wymaga to znajomości teoretycznych podstaw procesu spalania, dużego doświadczenia badawczego oraz znajomości modelowania oraz technik pomiarowych. Niezależnie od faktu, że zakres pracy przedstawiony w dysertacji obejmuje tylko etap wstępnych badań podstawowych, stanowi to istotny krok w kierunku pogłębiania wiedzy na temat procesu spalania.

Podkreślenia wymaga podjęcie się przez Autora naukowych działań dotyczących teoretycznej i praktycznej analizy opracowanej koncepcji nowego systemu spalania w zamkniętej przestrzeni, w którym spalana mieszanka jest otoczona warstwą gazów obojętnych. Jest to bardzo trudny obszar badań, głównie ze względu na szybkozmienność procesów zachodzących w komorze spalania silników tłokowych.

Na uznanie zasługuje podjęcie badań naukowych mających na celu wyjaśnienie określonych procesów i zjawisk fizycznych, a nie przeprowadzenie wyłącznie typowych badań aplikacyjnych. Takie podejście wymaga od Doktoranta dużej wiedzy z zakresu fizyki, matematyki, chemii i innych obszarów nauk podstawowych.

Rozważane w pracy zagadnienia związane z procesem spalania, odbywającym się w zamkniętej przestrzeni komory spalania ze zwiększonym udziałem spalin, nie są wprawdzie nowe, ale w wielu wypadkach wymagają dopracowania w aspekcie spodziewanego efektu zwiększenia sprawności przetwarzanej energii i uzyskania pożądanego składu spalin.

Z tego względu należy uznać, że tematyka podjęta przez Autora pracy jest w pełni uzasadniona pod względem poznawczym, a na spodziewane efekty istnieje także zapotrzebowanie w obszarze praktyki technicznej.

TYTUŁ I UKŁAD TREŚCI ROZPRAWY

Zaproponowany tytuł rozprawy: „Wpływ recyrkulowanych spalin na przebieg spalania w układzie bezpośredniego wtrysku benzyny" niezbyt trafnie oddaje treści zawarte w pracy. Przede wszystkim tytuł ten nie informuje, że chodzi o system spalania w tłokowym silniku spalinowym lub w zamkniętej przestrzeni komory spalania maszyny pojedynczego cyklu. Ponadto użyte w tytule pracy słowo „*układ*" nie definiuje, ani systemu spalania, ani systemu zasilania. W mojej opinii zamiast niezbyt zrozumiałego sformułowania „...*w układzie bezpośredniego wtrysku benzyny*", lepiej byłoby użyć zwrotu „….w komorze spalania z bezpośrednim wtryskiem benzyny" lub też zwrotu „…. w zamkniętej przestrzeni z bezpośrednim wtryskiem benzyny".

Cała rozprawa doktorska została przedstawiona łącznie na 101 stronach maszynopisu wraz ze streszczeniem w jeżyku polskim i angielskim, wykazem ważniejszych skrótów i oznaczeń oraz bibliografią obejmującą 118 pozycji. Zasadnicza treść rozprawy licząca 89 stron jest zawarta w siedmiu rozdziałach. Praca nawiązuje do aktualnych pozycji literatury, głównie krajowej i europejskiej pochodzącej z ostatnich kilku lat.

Treści zawarte w pracy zostały wzbogacone obszernym materiałem graficznym, odnoszącym się zarówno do analizowanej literatury, jak i do analiz i badań wykonanych przez Autora pracy. Ułatwia to w dużym stopniu zrozumienie opisywanych zjawisk. Praca napisana jest językiem zrozumiałym nie tylko przez fachowców, a stosowana terminologia nie budzi zastrzeżeń.

Stan istniejącej wiedzy, dotyczącej postawionego problemu badawczego zajmuje 30 stron, tj. ok. 30% zasadniczej treści rozprawy. W tej części przedstawiono dokonania związane z rozwojem systemów spalania silników spalinowych, z szczególnym zwróceniem uwagi na zagadnienia dotyczące recyrkulacji spalin. Przeprowadzono też analizę zjawisk fizycznych związanych z termochemią zachodzących procesów i wskazano obszary, które wymagają dalszych badań naukowych.

Wnioski płynące z tej części pracy w pełni uzasadniają podjęcie tematu rozprawy.

Główny problem badawczy oraz wynikający z niego cel naukowy podjętej pracy sformułowano w rozdz. 3. Określono szczegółowy zakres działań, w tym rozważań teoretycznych i modelowych oraz prac doświadczalnych, zaplanowanych w ramach dysertacji. Przyjęta metodyka tych działań ma przynieść odpowiedź na główne pytania, wyjaśniające zjawiska zachodzące w opracowanej koncepcji systemu spalania.

Całość analizowanych zagadnień ujęto w formie diagramu, narzucającego poszczególne etapy prac naukowych i stanowiącego podstawę przyjętej metodyki badań.

Obiekt badań, którym była maszyna pojedynczego cyklu oraz cały warsztat badawczy zaprezentowano w rozdz. 4. Przedstawiono w nim także szczegółowy plan rozwiązania postawionego problemu badawczego oraz wyniki wstępnych badań opracowanej koncepcji systemu spalania, które uzasadniały sposób prowadzenia naukowej analizy postawionego problemu badawczego.

W rozdziale 5 zaprezentowano badania modelowe oraz badania optyczne opracowanej koncepcji systemu spalania.

Rozdział 6 stanowi w części teoretyczne rozważania procesów zachodzących w opracowanym systemie spalania, a w części omówienie i interpretację wyników przeprowadzonych badań doświadczalnych. Stanowi to wnikliwe sprawozdanie z realizacji badań naukowych dotyczących wyjaśnienia zjawisk fizycznych zachodzących w trakcie uwarstwienia ładunku cylindra złożonego z warstwy spalin oraz mieszanki paliwowo-powietrznej.

Rozdział 7 zawiera wnioski oraz kierunki dalszych badań, które mogą stanowić kontynuację prac przedstawionych w rozprawie.

Pewne uwagi może wnieść do kolejności rozmieszczenia w pracy poszczególnych rozdziałów, a mianowicie badania teoretyczne oraz badania modelowe winny poprzedzać badania eksperymentalne, ponieważ przebieg badań eksperymentalnych i zastosowany warsztat badawczy w dużej części powinien wynikać z przesłanek teoretycznych. Ta uwaga wynika także z braku oddzielnego rozdziału, w którym zostałyby zaprezentowana spójna metodyka prowadzonych badań naukowych. Częściowy opis metodyki jest zawarty w rozdz, 4, a także w rozdz. 3. w postaci planu pracy, przy czym w przedstawionej pracy zaplanowana kolejność nie została zachowana.

Pewne zastrzeżenia budzi tytuł rozdz. 4, który niezupełnie oddaje jego treść, podobnie jak rozdz. 6, w którym omówiono część zagadnień teoretycznych związanych z tematem pracy, a w części stanowi on omówienie wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

TEZA, CEL, ZAKRES ORAZ SPOSÓB REALIZACJI PRACY

Naukowy problem badawczy postawiony przez Autora rozprawy, sprowadza się do teoretycznego i doświadczalnego zweryfikowania nowego systemu spalania, w którym mieszanka palna jest otoczona warstwą niepalnych gazów, którymi w praktyce są spaliny. Spodziewanymi efektami jest uzyskanie częściowej adiabatyzacji procesu, dzięki czemu można spodziewać się zwiększenia sprawności obiegu.

Zamiast tezy Autor dysertacji sformułował główny problem badawczy oraz wskazał zagadnienie naukowe, wymagające rozwiązania. Podobnie jak w tytule rozprawy wskazał na kształtowanie procesu spalania w bliżej nieokreślonym „*układzie*", podczas gdy w rzeczywistości chodzi o kształtowanie procesu spalania w komorze spalania maszyny pojedynczego cyklu lub docelowo silnika z zastosowaniem bezpośredniego wtrysku benzyny.

Postawiono przy tym założenie, że dostarczony ładunek będzie znajdować się wewnątrz otoczki utworzonej z recyrkulowanych spalin.

Zakres prac teoretycznych i doświadczalnych przewidzianych w rozprawie w dużej części dotyczy zagadnień podstawowych, dotyczących tworzenia ładunku w zamkniętej przestrzeni komory spalania, według zaproponowanej koncepcji. To trudne zadanie zostało wykonane z zastosowaniem przemyślanego warsztatu badawczego obejmującego zarówno analizy teoretyczne, technikę modelowania zjawisk fizycznych, jak i część eksperymentalną, której zakres obejmował głównie badania metodą optyczną procesu tworzenia ładunku, wykonane z zastosowaniem maszyny pojedynczego cyklu.

Tego typu naukowe podejście do analizy bardzo złożonego procesu spalania, zachodzącego w zamkniętej przestrzeni, zasługuje na wysoką ocenę.

W dyscyplinie związanej z rozwojem systemów spalania maszyn cieplnych, takie podejście stanowi obecnie rzadkość, co należy podkreślić, ponieważ większość prac naukowych, realizowanych w ostatnich latach w obszarze wiedzy związanej z techniką silników spalinowych, zwykle obiera konkretny cel utylitarny, a prowadzone badania mają

charakter badań aplikacyjnych. Z tego względu przyjęty przez Autora rozprawy sposób rozwiązania problemu naukowego stanowi wyjątek i świadczy o dojrzałości badawczej.

OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Ze względu na poruszone ważne zagadnienia z zakresu podstaw teorii maszyn cieplnych przedstawiona rozprawa jest bardzo wartościowa merytorycznie. Mimo, że praca ma charakter badań podstawowych, Autor sposób pośredni założył sobie również cel utylitarny, którym jest znalezienie takich rozwiązań, które mogłyby być wykorzystane do sterowania przebiegiem procesu tworzenia mieszanki w kontekście optymalnego przebiegu procesu spalania. Są to zagadnienia dotyczące teorii tłokowych silników spalinowych, związane z podstawami teoretycznymi procesu tworzenia mieszanki, jak i z zakresu procesów zachodzących w komorze spalania silnika. Podczas realizacji tych zadań Autor poruszył dwa duże i złożone problemy poznawcze, z których pierwszy dotyczy rozpoznania mechaniki tworzenia mieszanki i kinematyki ruchu niejednorodnego ładunku cylindra, a drugi procesu rozwoju reakcji spalania.

Należy tu podkreślić, że oba badane procesy zachodzą równocześnie w bardzo krótkim czasie, rzędu kilku do kilkudziesięciu milisekund i w przypadku wtrysku bezpośredniego odbywają się w zamkniętej przestrzeni roboczej silnika, co dodatkowo komplikuje ich badanie i analizę. Niezbędna jest tu znajomość wiedzy podstawowej z zakresu fizyki klasycznej, termodynamiki, hydromechaniki oraz umiejętność posługiwania się nowoczesnymi narzędziami inżynierskimi, takimi jak wyspecjalizowane programy komputerowe oraz specjalistyczna, bardzo złożona aparatura badawcza.

Prawidłowe rozpoznanie tych zależności ma bezpośrednie przełożenie na sprawność przetwarzania energii w silniku spalinowym oraz na zagadnienia związane z emisją toksycznych składników spalin.

Badania modelowe, w których, w których Autor wykazał się znajomością współczesnych technik symulacyjnych zaprezentowano w rozdz. 5.3. Zostały tu zastosowane uznane narzędzia programowe w postaci oprogramowania Autodesk Inventor oraz programu AVL Fire, dedykowanego do modelowania i analizy szybkozmiennych procesów zachodzących w silniku spalinowym. Tego typu wiedza jest obecnie niezbędna do realizacji postawionych celów naukowych.

Należy jednak zwrócić uwagę, że wyniki badań symulacyjnych powinny zostać zaprezentowane w rozdziałach poprzedzających opis stanowiska badawczego i aparatury pomiarowej, ponieważ zgodnie z przyjętymi zasadami prowadzenia prac naukowych zastosowany warsztat badawczy powinien wynikać właśnie z uzyskanych rezultatów badań modelowych.

Ponadto w części teoretycznej pracy brak jest spójnego wyjaśnienia mechanizmu kształtowania przebiegu procesu spalania w opracowanym systemie recyrkulacji spalin. Dotyczy to wszystkich aspektów prowadzenia procesu spalania z dodatkiem spalin, takich jak wpływ cząstek spalin na rozwój reakcji łańcuchowej i przejmowanie energii rodników, czy też wpływ właściwości fizyko-chemicznych spalin na termochemię procesu. Wybrane zagadnienia z tego obszaru pojawiają się wprawdzie w różnych rozdziałach pracy, lecz w opracowaniu, które w tytule zawiera recyrkulację spalin, wyjaśnienie tych wszystkich zjawisk powinno został ujęte w osobnym rozdziale.

W przypadku badań prowadzonych przez Autora, które dotyczą słabo rozpoznanego obszaru wiedzy, bardzo trafnym wyborem jest zastosowanie maszyny pojedynczego cyklu, w której można uzyskać wystarczającą powtarzalność zachodzących zjawisk i dzięki temu zweryfikować wyniki rozważań teoretycznych i badań symulacyjnych.

Uzasadnionym merytorycznie jest również przyjęcie do analizy dwóch, wybranych cech tworzenia ładunku w otoczce spalin. Pierwsza z nich rozważa różną kolejność doprowadzania gazów obojętnych i gazu palnego. Druga uwzględnia różną wartość ciśnienia doprowadzania gazów obojętnych, co ma znaczenie w odniesieniu do zmian ciśnienia w komorze spalania w trakcie wywiązywania ciepła. Dzięki takiej metodyce uzyskano wystarczająco dużą macierz wyników poddanych analizie.

Bardzo ważną częścią pracy jest przeprowadzenie analizy przebiegu procesu spalania w otoczeniu warstwy spalin, w dwóch różnych wariantach prowadzenia procesu. W pierwszym z nich zastosowano wtrysk paliwa do wewnętrznej części ładunku, natomiast w drugim centralne położenie miał kanał iskrowy świecy zapłonowej. Tego typu badania stanowią ważną przesłankę do zastosowania opracowanej koncepcji systemu spalania w rzeczywistym silniku tłokowym. Istotną wartością merytoryczną pracy, składającą się na dorobek Autora rozprawy, było przeprowadzenie naukowej analizy związków istniejących pomiędzy sposobem zasilania silnika a ruchem ładunku i procesami zachodzącymi w przestrzeni roboczej podczas tworzenia mieszanki palnej. Są to procesy szybkozmienne, których badanie wymaga zastosowanie niestandardowych technik pomiarowych. Doktorant w tej część pracy wykazał się, bardzo dobrym przygotowaniem badawczym, którego wymagało zastosowanie nowoczesnych metod pomiarów optycznych. W przypadku rozwiązywanego problemu naukowego, tylko tego typu badania umożliwiają pełne rozpoznanie zjawisk zachodzących w przestrzeni roboczej systemu spalania.

W mojej opinii największa wartość prac naukowo-badawczych, przedstawionych w recenzowanej rozprawie dotyczy:

- Opracowania nowej koncepcji tworzenia ładunku, w zamkniętej komorze spalania,
- Stworzenia teorii, wyjaśniającej mechanizm przebiegu procesu spalania w otoczeniu niepalnych gazów, tworzących warstwę izolacyjną i umożliwiającą częściową adiabatyzację procesu wydzielania ciepła,
- Wykonania badań symulacyjnych, za pomocą uznanych narzędzi programowych, które w dużym stopniu są zbieżne z wynikami badań eksperymentalnych,
- Opracowanie stanowiska badawczego do badania przebiegu procesu tworzenia i spalania mieszanki, opracowanego według własnej koncepcji z zastosowaniem maszyny pojedynczego cyklu,
- Opracowanie koncepcji i przeprowadzenie badań procesu tworzenia i spalania mieszanki metodami optycznymi, które należą do grupy złożonych i niestandardowych metod badawczych, wymagających specjalnego przygotowania,
- Opracowania różnych strategii tworzenia warstwy otaczającej ładunek cylindra, rozwijających opracowaną koncepcję,
- Przeprowadzenie analizy przebiegu procesu spalania w otoczeniu warstwy spalin, w dwóch różnych wariantach prowadzenia procesu: z zastosowaniem wtrysku paliwa do wewnętrznej części ładunku oraz z zastosowaniem centralne inicjowanego zapłonu,
- Stworzenia pewnych możliwości kontroli przebiegu procesu spalania, zarówno w zakresie kinetyki procesu, jak i szybkości wydzielania ciepła,
- Sformułowania wniosków i podania wytycznych, umożliwiających podjęcie prac aplikacyjnych.

Analizując treść rozprawy nasuwają się pewne uwagi i pytania, które jednak w żaden sposób nie umniejszają jej pozytywnej wartości merytorycznej. Przykładami mogą być:

- Treści zamieszczone w poszczególnych rozdziałach dysertacji robią wrażenie nieco nieuporządkowanych. Dotyczy to zwłaszcza wiedzy na temat podstaw teoretycznych opracowanej koncepcji, która to wiedza jest rozproszona po wszystkich rozdziałach pracy,

- Kolejność przedstawiania i wyjaśniania poszczególnych zjawisk jest dość przypadkowa, czego skutkiem jest brak zachowania odpowiedniej narracji, umożliwiającej łatwe przyswojenie przekazywanej wiedzy,
- Tytuły niektórych rozdziałów, dotyczy to głównie rozdz. 4, 5 i 6 nie w pełni odpowiadają zawartej w nich treści,
- Opracowana koncepcja systemu tworzenia ładunku w otoczeniu gazów obojętnych jest bardzo interesująca teoretycznie, natomiast należałoby rozważyć, czy w zastosowaniu aplikacyjnym poniesione nakłady i złożoność systemu, przyniosą spodziewane efekty utylitarne w postaci większej sprawności energetycznej i korzystniejszego składu chemicznego spalin, w stosunku do rozwiązań konwencjonalnych,
- Opracowany system zasilania może być bardzo trudny do adaptacji w komorze spalania silnika tłokowego,
- Zaproponowana koncepcja tworzenia mieszanki została zbadana w ustalonych warunkach termodynamicznych. W przypadku próby jej zastosowania w systemie spalania silnika spalinowego wydaje się, że może być ona być bardzo wrażliwa na zmianę obciążenia i prędkości obrotowej silnika, szczególnie w przypadku, gdy zmiany te zachodzą z dużą prędkością,
- Pewnym niedostatkiem opracowania wyników jest brak stworzenia formuły, która umożliwiałaby bezpośrednie porównanie wyników prac modelowych i doświadczalnych opracowanej koncepcji systemu zasilania z standardowymi systemami zasilania współczesnych silników.

W pracy zauważono usterki o charakterze redakcyjnym lub stylistycznym. Dotyczy to np., stosowania w niektórych przypadkach języka potocznego, który nie powinien być stosowany w opracowaniu naukowym. Przykładem może być na str. 70 : „*temperatura powietrza na dolocie*". Autor często używa słowa „układ" na określenie wielu różnych podmiotów, począwszy od tytułu pracy, jak i np. na str. 92 stwierdzenie: *„…funkcje inhibitora dla układów o zapłonie iskrowym*". Podobnie w wielu miejscach pracy Autor używa słowa „*redukcja*", jako synonimu słowa zmniejszanie, (*np. str. 6 „…redukcji emisji dwutlenku węgla*"), co w pracy, która w pewnej części dotyczy zagadnień emisji toksycznych składników spalin nie powinno mieć miejsca, z uwagi na znaczenie słowa „redukcja", jako określonego typu reakcji chemicznej.

Powyższe uwagi nie wpływają na ocenę merytoryczną pracy Pana **mgr. inż. Wojciecha Cieślika** i jak już podkreślono we wstępie recenzji, w rozprawie poruszono i rozwiązano wiele ważnych zagadnień dotyczących wiedzy podstawowej, co wymagało od Autora gruntownej znajomości zagadnień z szerokiego obszaru nauk podstawowych. Należy podkreślić, że do wyjaśnienia postawionej tezy i realizacji programu badań użyto nowoczesnego aparatu badawczego, wymagającego od Autora dobrego przygotowania inżynierskiego i naukowego z zakresu wielu dyscyplin naukowych, jak również połączenia wielu metod badawczych o zakresie interdyscyplinarnym.

Wszystkie wymienione powyżej elementy rozprawy doktorskiej stanowią o jej dużej wartości merytorycznej, a na podkreślenie zasługuje wnikliwa analiza teoretyczna opisywanych zjawisk na poziomie badań podstawowych oraz pionierski oraz interdyscyplinarny charakter prowadzonych badań teoretycznych i eksperymentalnych.

Z tych względów przedstawioną rozprawę należy uznać za oryginalny dorobek naukowy Doktoranta, stanowiący wkład w dziedzinę nauki dotyczącej podstaw teoretycznych i badania procesów cieplnych zachodzących w maszynach cieplnych.

WNIOSKI KOŃCOWE

Recenzowana praca doktorska autorstwa **mgr. inż. Wojciecha Cieślika** dotyczy aktualnego problemu badawczego, związanego z badaniem procesu tworzenia ładunku w otoczeniu gazów obojętnych, która to koncepcja może znaleźć zastosowanie w tłokowych silnikach spalinowym. W omawianej dziedzinie praca zawiera istotne wartości naukowe związane z ważnym problemem dotyczącym podstawowych badań zmierzających do poprawy sprawności maszyn cieplnych, a uzyskane wyniki rozważań teoretycznych i badań doświadczalnych mają dużą wartość dla praktyki technicznej. Stanowi to oryginalny dorobek naukowy Doktoranta.

Uważam, że recenzowana praca doktorska pt.: **„Wpływ recyrkulowanych spalin na przebieg spalania w układzie bezpośredniego wtrysku benzyny”,** której autorem jest Pan **mgr inż. Wojciech Cieślik** spełnia warunki stawiane dysertacjom doktorskim zgodnie z wymaganiami obowiązującej w tym zakresie **„Ustawy o stopniach i tytule naukowym”** (Ustawa z dnia 14 marca 2003 r.).

Rozprawa ta może być dopuszczona do publicznej obrony i stanowić podstawę do nadania **mgr. inż. Wojciechowi Cieślikowi** stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Kraków, dnia 10. 06. 2018 r.