

Poznań, 6.04.2022 r.

OCENA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Rodaka pt.:

Wpływ parametrów tworzenia mieszanki wodorowo-powietrznej na przebieg procesu spalania w silniku z zapłonem iskrowym

1. **Podstawa opinii:** pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej prof. dr hab. inż. Jerzego A. Śładka z dn. 28.02.2022 r., sygn. M.00-520-21/2022, które otrzymałem w dniu 7.03.2022 r.
2. **Podstawa prawna:** Ustawa: *Prawo o Szkolnictwie Wyższym* z dnia 20 lipca 2018 r., (Dz. U. Poz. 1668), tekst jednolity opublikowany w Obwieszczeniu Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 3 marca 2022 r. (Dz.U. 2022 poz. 574), szczególnie Dział V *Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki*, Rozdz. 2, *Nadawanie stopnia doktora*, Art. 187; dalej nazywana *Ustawą*.
3. **Przedmiot opinii:** przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Rodaka stanowi dzieło zwarte i zawiera 100 stron tekstu, w tym 85 stron zasadniczego tekstu (podzielonego na 12 rozdziałów), spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz symboli, skrótów i oznaczeń, 4 stron spisu tabel i rysunków oraz 3,5 strony spisu literatury. W pracy umieszczono 55 rysunków, 8 tabel oraz 32 ponumerowane wzory. *Bibliografia* obejmuje 65 pozycji, w znacznej części (43%) publikacje zagraniczne, głównie z okresu ostatnich kilkunastu lat. Praca jest zatem zgodna z wymaganiami Art. 187 pkt. 3 i 4 *Ustawy*.
4. **Ogólna charakterystyka problematyki poruszanej w rozprawie**

4.1. Aktualność podejmowanej problematyki badawczej

Doktorant pan Łukasz Rodak podjął w swojej pracy badawczej zagadnienie wykorzystania wodoru do zasilania tłokowego silnika spalinowego. Problematyka ta jest znana już od XIX w., szczególnie w kontekście stosowania gazów, w tym gazy świetlnego, jednak wówczas problemy z gromadzeniem i przewożeniem gazów węglowodorowych spowodowały rozwój silników zasilanych paliwami ciekłymi. Do zasilania gazami palnymi powrócono pod koniec XX w., głównie w kontekście konieczności spełnienia coraz bardziej rygorystycznych norm emisji związków toksycznych w spalinach. Gazy palne są heterogenicznymi mieszaninami związków węglowodorowych, z definicji zawierające zarówno węgiel, jak i wodór, co – w przypadku

spalania niezupełnego i niecałkowitego – skutkuje emisją węgla (PM), tlenku węgla i węglowodorów. Zastosowanie wodoru do zasilania silników tłokowych istotnie zmniejsza problemy emisyjne, szczególnie w zakresie tzw. gazów cieplarnianych, a ponadto zastąpienie przez niego nieodnawialnych paliw pochodzenia kopalnego wpływa korzystnie na światowy bilans energetyczny i odpowiada obecnej polityce ochrony środowiska naturalnego.

Podjęmowane pod koniec XX w. badania nad wykorzystaniem wodoru do silników spalinowych, także w Politechnice Krakowskiej przez zespół prof. Cz. Kordzińskiego, napotykały na znaczne przeszkody wynikające z trudności w magazynowaniu i przewożeniu dużych objętości wodoru, z trudności we właściwym sterowaniu doprowadzaniem wodoru do cylindra w czasie sprężenia oraz z problemów pogorszonych warunków smarowania par trących wewnątrz cylindra przy wykorzystaniu tzw. gazu „suchego”, pozbawionego komponentów o właściwościach smarnych. Dopiero w ostatnim dwudziestolecium nastąpił znaczący rozwój wysokociśnieniowych układów zasilania gazem z elektronicznym sterowaniem czasem otwarcia wtryskiwaczy, pozwalający na wtryskiwanie wieloczęściowe i lepsze sterowanie przebiegiem procesu spalania. Właśnie takie wtryskiwanie wodoru stanowi istotę badań Doktoranta. Uważam zatem, że kierunek badań i problematyka pracy zostały wybrane właściwie i jest bardzo aktualne, szczególnie w kontekście rozwijającego się obecnie kolejnego kryzysu energetycznego związanego z ograniczeniem dostaw ropy naftowej i gazu ziemnego. Warto zaznaczyć, że wodór jest pierwiastkiem energetycznym powszechnie występującym w przyrodzie, choć jego pozyskanie w czystej postaci cząsteczkowej wymaga dość znacznych nakładów energetycznych.

4.2. Istotność problematyki badawczej pod względem poznawczym i aplikacyjnym

W światowej literaturze naukowej, szczególnie powstającej w ciągu ostatnich lat pojawia się coraz więcej informacji na temat celowości stosowania wodoru do zasilania silników tłokowych. Dotyczą one jednak wykorzystania wodoru w dość konwencjonalnych systemach spalania. Dużo prac badawczych poświęca się obecnie ogniowom paliwowym, które oferują znaczny potencjał rozwojowy w zakresie uzyskiwania dużych sprawności konwersji energii (nawet 60 – 90%) ze względu na bezpośrednią konwersję energii chemicznej w energię elektryczną. Rozwój takiego rodzaju źródeł przetwarzania energii napotyka jednak na pewne bariery technologiczne i kosztowe.

Obecny stan rozwoju systemów elektronicznie sterowanego wtrysku paliwa, także gazowego, wskazuje na ciągle występujący znaczny potencjał rozwojowy odnośnie silników tłokowych zasilanych wodorem. Posiadane przez zespoły badawcze Politechniki Krakowskiej wcześniejsze doświadczenia z takimi silnikami uzasadniały podjęcie dalszych prac rozpoznawczych i aplikacyjnych w odniesieniu do nowych systemów spalania i zwiększenia możliwości sterowania przebiegiem procesu spalania przez zastosowanie wieloczęściowego wtrysku wodoru. Właśnie w takim zakresie problem wydaje się nie rozpoznany i nie opisany w pełni, a dotychczas przeprowadzone prace wskazują na znaczny potencjał aplikacyjny.

W związku z przytoczonymi tutaj argumentami podjęcie problematyki strategii tworzenia mieszanki wodorowo-powietrznej na przebieg procesu spalania w silniku z zapłonem iskrowym w kontekście zasilania silnika paliwem wodorowym wydaje mi się w pełni uzasadnione i celowe.

4.3. Sformułowanie problemu, celu pracy i tez badawczych

Przeprowadzone przez Autora studia nad zastosowaniem wodoru do zasilania tłokowych silników spalinowych z zapłonem iskrowym omówione w rozdziałach 2 i 3 rozprawy oraz studia nad stosowanymi systemami zasilania i spalania takich silników, omówione w rozdziałach 4 i 5 wskazały, że znaczny potencjał rozwojowy takich systemów leży w stosowaniu koncepcji uwarstwienia ładunku. Do osiągnięcia takiego celu pożądane jest wykorzystanie wieloczęściowego wtrysku bezpośredniego, do komory jednolitej. Taką koncepcję przyjął Autor podejmując dalsze studia oraz badania symulacyjne i badania eksperymentalne, prowadzone w celu weryfikacji wskaźników operacyjnych takiego systemu spalania.

W rozdziale 6.1 Autor przyjął koncepcję systemu zasilania wodorem tłokowego silnika spalinowego, w której przyjmuje się, że wodór dostarczany jest bezpośrednio do przestrzeni roboczej (komory spalania) zarówno w trakcie sprężania, jak i w trakcie trwania procesu spalania (s. 24). Przewidywał, że taki system „może stanowić przesłankę do uniknięcia problemów związanych z samozapłonem mieszanki lub anomaliami (w domyśle: spalania stukowego?) spalania”. Wskazał przy tym, że umożliwi to sterowanie obciążeniem silnika (rozwijaną mocą) zarówno w sposób jakościowy, jak i ilościowy. Przyjął ponadto, że sterowanie doprowadzeniem paliwa powinno ograniczyć szybkość narastania ciśnienia w komorze do maksymalnie 0,7 MPa (7 bar)/^oOWK, wartości granicznej w silnikach z zapłonem samoczynnym; w silnikach z zapłonem iskrowym zwykle ta wartość osiąga 0,3 MPa (3 bar)/^oOWK. Ten wskaźnik można więc przyjąć jako jedno z kryterium prawidłowości zasilania wodorem, choć Autor tak tego nie nazwał.

Formułując cel naukowy pracy Autor napisał: „...opracowanie koncepcji nowatorskiego systemu zasilania...”. „Opracowanie koncepcji” wydaje się jednak mieć charakter zadania technicznego, choć bez wątplenia ambitnego. Wydaje się, że jako cel naukowy, poznawczy znacznie lepiej brzmiałoby sformułowanie np.: „weryfikacja możliwości sterowania przebiegiem spalania mieszanki wodorowo-powietrznej przez zastosowanie wieloczęściowego wtrysku bezpośredniego do komory spalania”. Bo w istocie Autor zmierzał właśnie do weryfikacji takiej metody zasilania i jej efektywności w trakcie relacjonowanych dalej badań. Ostatecznie przyjmuję, że problem naukowy i cel poznawczy zostały określone prawidłowo, choć ich sformułowanie mogło być precyzyjniejsze.

W następnym zdaniu (s. 25) Autor napisał, że: „... opracowany system umożliwi spalanie mieszanki o składzie stechiometrycznym, pozwoli na wydzielenie większej ilości ciepła i osiągnięcie większej mocy jednostkowej silnika”. Moim zdaniem użyte sformułowanie ma charakter hipotezy roboczej, choć taka nazwa tutaj nie pada. Niestety do tej hipotezy Autor nie odniósł się w podsumowaniu pracy, a byłoby to wskazane.

Po przytoczonym fragmencie Autor wskazał jako cel utylitarny: „... opracowanie elektronicznie sterowanego systemu zasilania... mieszanką wodorowo-powietrzną, pozwalającą na racjonalne wykorzystanie wodoru...”. Oczywiście – ma to charakter utylitarny, ale brak tutaj jednoznacznego kryterium uznania tego celu za osiągnięty, gdyż „racjonalne wykorzystanie” jest pojęciem bardzo mało konkretnym i niepoliczalnym. Domyślam się, że to sformułowanie ma charakter postulatu, gdyż Autor tej racjonalności w kontekście transportu nie analizował i nie było to Jego zadaniem. Natomiast opracował, wykonał i zastosował z powodzeniem układ zasilania wieloczęściowym wtryskiem, i właśnie to należało tutaj podkreślić.

5. Struktura pracy i ocena jej poprawności metodologicznej

Proces rozwiązywania oryginalnego, naukowego problemu badawczego dla zapewnienia poprawności metodologicznej powinien zawierać jego kolejne elementy, które stanowią:

1. Omówienie motywacji i celowości podjęcia określonej tematyki badawczej,
2. Ocena bieżącego stanu wiedzy w celu zdefiniowania braków i niedostatków tej wiedzy,
3. Sformułowanie naukowego problemu badawczego (ewentualnie także tez lub hipotez) oraz wynikających z niego koniecznych do rozwiązania zadań szczegółowych, a także kryteriów uznania problemu za rozwiązany,
4. Przyjęcie sprecyzowanej metody badawczej i metodyki jej stosowania,
5. Zdefiniowanie obiektu (-ów) badań, aparatu badawczego oraz metod i sposobów analizy wyników,
6. Ilościowa i jakościowa ocena uzyskanych wyników,
7. Interpretacja wyników i sformułowanie wniosków końcowych.

W rozdz. 6.3 Autor przedstawił 10 kolejnych zadań przeznaczonych do wykonania. Ich zakres, logika i chronologia odpowiadają ogólnym wymaganiom metodologicznym odnoszącym się do prac promocyjnych. Przewidział zatem analizy teoretyczne dotyczące problematyki pracy (rozdz. 3, 4, 5 i 7), sformułowanie celu pracy (rozdz. 6), przeprowadzenie wstępnych badań modelowych, symulacyjnych (rozdz. 8), weryfikację wyników badań modelowych na drodze badań eksperymentalnych, dla realizacji których zaprojektował i wykonał stanowisko z komorą stałej objętości (rozdz. 9) oraz osobne stanowisko do badań silnikowych (tzw. „gorących”, rozdz. 10). Badania doświadczalne silnika rzeczywistego, jednocylindrowego i ich wyniki zostały omówione w rozdz. 11. Pracę kończy synteza wyników badań, ich interpretacja oraz sformułowanie końcowych wniosków (rozdz. 12).

Jak wynika z przytoczonego porównania, Doktorant swój tok postępowania przyjął zgodnie z ogólnie przyjmowaną metodologią a następnie go przedstawił w rozprawie w sposób całkowicie poprawny i konsekwentny.

6. Analiza treści rozprawy

6.1. Adekwatność i prawidłowość przyjętej metody badawczej i zastosowanej metodyki

Dla dokonania deklarowanej w tytule pracy oceny „wpływu parametrów tworzenia mieszanki wodorowo-powietrznej na przebieg procesu spalania w silniku z zapłonem iskrowym” Autor przyjął logiczny i prawidłowy tok postępowania. Najpierw przeprowadził analizę literaturową zagadnień dotyczących spalania gazów, szczególnie wodoru, w komorze spalania silnika tłokowego, porównawczo ocenił podstawowe cechy i właściwości fizykochemiczne paliw gazowych w porównaniu z benzyną oraz względne składy i wartości opałowe mieszanek stechiometrycznych (rozdz. 7). Następnie przystosował program KIVA 3 do obliczeń symulacyjnych oraz przeprowadził badania symulacyjne uzyskując wyniki w postaci przebiegu zmian ciśnienia i temperatury ładunku w komorze stałej objętości dla stałej masy powietrza, dla jedno- lub dwuczęściowego wtrysku wodoru i różnych czasów zapłonu mieszanki.

W kolejnym etapie Autor wykorzystał komorę stałej objętości, w której zastosował podobną strategię zasilania, jak w przypadku badań symulacyjnych, uzyskując szybsze przyrosty ciśnienia i temperatury ładunku w trakcie spalania, lecz ich niższe poziomy końcowe (rozdz.

9). Przed przystąpieniem do badań stanowiskowych silnika rzeczywistego Autor przeprowadził badania symulacyjne takiego silnika wykorzystując program KIVA 3 w wersji zmodyfikowanej 3V.

6.2. Analiza spalania paliw gazowych w silniku tłokowym (rozdz. 7)

Wprowadzając rozdział pod takim tytułem Doktorant chciał pewnie zwrócić uwagę na możliwe różne mechanizmy procesu spalania, gdyż przytoczył definicje i komentarz dotyczące spalania deflagacyjnego, spalania detonacyjnego i spalania stukowego. Moim zdaniem użyte w tytule rozdziału słowo „analiza” zapowiada nieco więcej, bo – rzeczywiście wskazane tutaj było nieco dokładniejsze omówienie specyfiki spalania wodoru, zarówno w kontekście procesów chemicznych, jak i związanych z nimi skutkami fizycznymi, głównie termodynamicznymi. Próba takiej analizy byłaby bardzo wskazana jako pomoc w interpretacji wyników uzyskiwanych w dalszej części pracy. Nasuwa się np. pytanie, czy drgania ciśnienia zarejestrowane na rys. 9.3 w komorze izochorycznej mają częstotliwość i amplitudę charakterystyczną dla spalania stukowego, czy mogą świadczyć o problemach pomiarowych lub zakłóceniach. **Proszę o dodatkowy komentarz w tym zakresie.**

6.3. Badania symulacyjne dla komory izochorycznej

Jak napisał Doktorant, badania symulacyjne spalania mieszanki wodorowej w komorze izochorycznej podjął w celu „wstępnego wyjaśnienia zjawisk zachodzących podczas tworzenia i spalania mieszanki...”. Do tego celu wykorzystał narzędziowy program KIVA w wersji 3V. Nie jest jednak dla mnie oczywiste, jaki był w istocie cel tych badań symulacyjnych, gdyż zapowiadanej analizy takich zjawisk nie prowadzono, a jedynie koncentrowano się na zmianach ciśnienia i temperatury ładunku w trakcie spalania. Przytoczone przykłady przestrzennego rozkładu temperatury nie prowadziły do ich interpretacji w sensie przyczynowo-skutkowym. Program KIVA jest przydatny do symulacji rozkładów przestrzennych, a Doktorant w istocie prowadził analizy 0-wymiarowe ograniczone do historii zmian ciśnienia i temperatury w komorze spalania. Niewątpliwie, przeprowadzone symulacje dostarczyły Doktorantowi istotnych wskazówek dla konstruowania systemu zasilania i umieszczenia wtryskiwacza w komorze spalania, ale nie znalazłem w pracy podkreślenia przydatności tych symulacji w tym zakresie. **Pożądanym jest więc wyjaśnienie, do czego były te symulacje potrzebne i jak je Doktorant wykorzystał w dalszej procedurze badawczej.** Przy okazji warto też wyjaśnić, czy symulowano zjawiska, czy procesy.

Mówiąc o programie symulacyjnym trzeba pamiętać, że każdy program oparty jest na przyjętym modelu, czyli opisie matematycznym symulowanych zjawisk i procesów. Dawniej ściśle przestrzegano obowiązku opisu takiego modelu zawierającego zdefiniowanie jego charakteru (zmienny/ciągły w czasie, zmienny/ciągły w stanie, deterministyczny/probabilistyczny itp.), część tzw. „nieformalną” (definicja wektorów wejścia i wyjścia, opis przyjętych założeń i uproszczeń) oraz część formalną, zawierającą zestaw zależności matematycznych i opis sposobu prowadzenia obliczeń (krok, dokładność, kolejność działań...). Taką charakterystykę modelu, choćby skróconą, można było w tej pracy zawrzeć w załączniku. Zawarte w rozdziale 8.2 informacje dotyczą przyjętych założeń oraz program badań symulacyjnych, w którym kolejne próby zróżnicowano ze względu na wielkość dawki wodoru oraz chwilę zapłonu mieszanki. W rozdziale 8.3 Autor wskazał zastosowane parametry wejściowe i parametry „odpowiedzi”

modelu, w tym także przestrzenne rozkłady wodoru w trakcie wtrysku do komory, rozkłady temperatury ładunku i temperatury płomienia. **Powstaje tutaj pytanie, czy i w jaki sposób te wyniki wpłynęły na dalszy tok postępowania albo rozwój koncepcji sterowania wtryskiem wodoru, bo Autor tego w klarowny sposób nie wyjaśnił.**

W rozdziale 8.4 graficznie przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych dotyczące przebiegu zmian ciśnienia i temperatury oraz masy w trakcie trwania procesu, dla trzech strategii wtrysku wodoru. Wyznaczono wartości maksymalne oraz największe szybkości ich narastania. Szybkości te podano w jednostkach na 1 sekundę, co trochę utrudnia interpretację w kontekście zastosowania do silnika tłokowego, dla którego operuje się wartościami odniesionymi do 1 stopnia OWK. Czas obrotu o 1 stopień OWK dla prędkości obrotowej wału korbowego wynosi 0,083 ms dla $n=2000$ obr/min, 0,042 ms dla $n=4000$ lub 0,028 dla $n=6000$. Jeżeli zatem dla wariantu wtrysku 65_65 obliczona jest wartość $\Delta P/\Delta t = 7606$ MPa/s, to odpowiada to wartości 0,63 MPa/°OWK przy $n=2000$ obr/min lub 0,213 MPa /°OWK przy $n=4000$ obr/min. Jak podaje literatura, w przeciętnych silnikach ZI wskaźnik ten wynosi ok. 0,15-0,40 MPa /°OWK, a w silnikach ZS – 0,6-0,8 MPa /°OWK. Otrzymane wartości są więc zbliżone do silnika rzeczywistego. Na podstawie wyników przedstawionych na rysunku 8.4 można było spróbować ocenić zależność szybkości wypalania mieszanki od jej składu i temperatury, bo wyraźnie widać, że szybkości te są różne.

Takiej dyskusji zabrakło trochę we wnioskach z symulacji dla komory izochorycznej (rozd. 8.5). Doktorant głównie relacjonuje uzyskane wyniki badań symulacyjnych, ale raczej w sposób ogólnikowy. Píše np., że wyniki symulacji wskazują na: istotną rolę strategii dostarczania wodoru...” i „stwarza (raczej tworzy?) to przesłanki do opracowania systemu pozwalającego na kontrolę procesu wydzielania ciepła...”. Mało konkretnie brzmi także zdanie: „... gdy paliwem jest wodór, przyrost ciśnienia po zapłonie jest bardzo duży i może prowadzić do wystąpienia anomalii spalania”. I dalej: „... na podstawie tych badań symulacyjnych określono graniczną wartość współczynnika nadmiaru powietrza, przy którym nie występowały anomalie spalania...”. To stwierdzenie wydaje się arbitralne i nie wynika wprost z interpretacji wyników symulacji.

Na s. 43 Autor napisał: „potwierdzeniem prawidłowego przebiegu spalania ... są wizualizacje zmiany temperatury i stopnia wypalania paliwa...”. Chyba same wizualizacje nie mogą być potwierdzeniem, lecz interpretacją zmian wizualizowanych parametrów. Takie skróty myślowe są dość częste w pracy, ale charakterystyczne dla typowego inżyniera praktyka.

6.4. Badania eksperymentalne w komorze izochorycznej

Omawiane w rozdziale 9 (s. 44 – 55) badania eksperymentalne dotyczyły wtrysku wodoru do przestrzeni o stałej objętości zamkniętej z dwóch stron oknami kwarcowymi umożliwiającymi obserwację strumienia doprowadzanego gazu, powstawania i rozwoju płomienia po zapłonie mieszanki z jednoczesną szybką rejestracją zmian ciśnienia. Zgodnie z metodologią takich badań powinny być przyjęte i opisane następujące elementy: badany obiekt i stanowisko badawcze, zastosowana aparatura badawczo-pomiarowa z charakterystyką jej dokładności i rozdzielczości (przestrzennej, czasowej), wielkości mierzone oraz zależności funkcjonalne wykorzystane do analizy wyników pomiarów i wielkości (wskaźników) porównawczych, a także procedura badawczo-pomiarowa i sposób jej przeprowadzenia.

Niewątpliwie, zastosowane przez Doktoranta stanowisko badawcze jest oryginalne, dobrze dobrane do poszukiwanych wyników i informacji porównawczych. Parametry komory zostały określone wyczerpująco (s. 45), jednakże parametry aparatury pomiarowej zostały całkowicie pominięte, także aparatury do rejestracji optycznych (rozdzielczość optyczna, częstotliwość filmowania, typ rejestrowanego obrazu, model barw). Autor napisał jedynie: „... filmowania... za pomocą kamery do filmowania procesów szybkozmiennych” – zdecydowanie zbyt ogólnikowo i bez informacji pozwalającej na lepszą ocenę dokładności uzyskiwanych wyników. Dopiero na s. 51 wspomniano jakby mimochodem o częstotliwości filmowania $f=20\ 000$ klatek/s. Nie wspomniano także o ocenie powtarzalności rejestrowanych procesów.

Na s. 45 podano kolejne 3 strategie wtrysku wykonywanego w czasie badań. Nie opisano jednak, jak je realizowano w sensie układu wykonawczego, wtryskowego. Schemat takiego układu oraz sposób wywoływania wtrysku i kontrolowania jego długości powinien się znaleźć w pracy, choćby w załączniku.

W komorze zarejestrowano przebiegi zmian ciśnienia ładunku w trakcie spalania. Pokazany na rys. 9.3 przebieg pokazuje nakładanie się większych częstotliwości w zakresie średnich i dużych ciśnień. Nasuwa się pytanie, czy taki „piłokształtny” przebieg rejestrowano także w innych warunkach badań i co on może oznaczać. Na dole s. 48 Doktorant napisał (błędnie odwołując się do rys. 10.3), że „analizie poddano także przebieg drgań masy gazowej, rejestrowany podczas procesu spalania...”. Stwierdzono, że częstotliwość drgań nie przekroczyła $\nu = 1-3$ kHz, a amplituda nie przekraczała $A = 0,1 - 0,2$ MPa. I dalej pisze: „wartość tych parametrów stanowiła kryterium oceny prawidłowości procesu spalania” – no dobrze, ale dlaczego, na jakiej podstawie? A jak taką analizę przeprowadzono – chyba należało to skomentować, skoro jest ważnym kryterium.

Efektem badań w komorze było określenie szybkości narastania ciśnienia i temperatury; tutaj znowu podane zostały wartości tej szybkości w odniesieniu do 1 sek., co było naturalne, ale jest mało komunikatywne dla inżynierów silnikowców. Nie przeprowadzono niestety porównania z wartościami tych wskaźników uzyskanymi w symulacji, a różnią się one znacząco. Warto może podjąć dyskusję o ile się one różnią i dlaczego.

W komentarzu dotyczącym rys. 9.6 i 9.7 pokazujących kolejne klatki filmu z przebiegu rozprzestrzeniania się płomienia Doktorant napisał: „Analiza przebiegu spalania pozwala na ocenę zachodzących procesów zawirowania ładunku, rozwoju płomienia oraz penetracji cząsteczek... wodoru w głąb komory...”; wprowadzie dalej elementy takiej analizy się pojawiają, ale przedstawiony materiał może być wykorzystany do dużo dokładniejszej i szerszej analizy z wykorzystaniem cyfrowej analizy obrazu, do czego bym namawiał Doktoranta w następnym etapie badań.

Wzór (9.16) napisano dla obliczenia sprawności cieplnej, a w tekście traktuje się obliczoną wartość jako straty chłodzenia; traktuję to jako przeoczenie terminologiczne.

We wnioskach z badań eksperymentalnych w komorze izochorycznej Doktorant napisał, że analiza materiału filmowego: „... pozwoliła na potwierdzenie... hipotezy, że możliwe jest spalanie wodoru w miarę dostarczania do komory wypełnionej powietrzem”. Dalej napisał że: „... dostarczanie wodoru i spalanie go w miarę dostarczania daje możliwość kontrolowania wydzielania ciepła”. Taka hipoteza wydaje mi się mocno sztuczna, gdyż nie widzę podstaw do jej falsyfikacji, a z drugiej strony – nie przyjęto żadnego wskaźnika, którego potwierdzenie

pozwalaloby na zdecydowanie jej potwierdzenie. Pożądane tutaj może być skorelowanie charakterystyki wieloczęściowego wtrysku wodoru $m_{H_2} = f(t)$ ze zmianami szybkości spalania mieszanki. Zabieg taki byłby możliwy w oparciu o pozyskane wyniki badań.

6.5. Badania symulacyjne dla warunków silnikowych

W rozdziale 10 Doktorant omówił swoje badania symulacyjne dla przypadku tłokowego silnika spalinowego, do których wykorzystał program symulacyjny KIVA 3V. Objętość robocza symulowanego silnika wynosiła 418 cm^3 , czyli ok. 2-krotnie większa niż komory izochorycznej. Parametry wejścia modelu zostały opisane wyczerpująco na s. 56-57. Przestrzeń robocza silnika została zamodelowana trójwymiarowo, podzielona na ponad 84 tys. komórek obliczeniowych z wykorzystaniem programu narzędziowego CATIA P3, rozdz. 10.2. W tym rozdziale na s. 57 Autor napisał, że: "... strategia spalania mieszanki... w trakcie jej tworzenia jest złożonym i trudnym do badania procesem, dlatego... prace doświadczalne poprzedzone zostały badaniami modelowymi...". Nie jest to niestety przekonujące uzasadnienie, tym bardziej, że nie padły żadne inne wyjaśnienia w tym zakresie. Tak jak już zauważyłem wcześniej, nie widzę uzasadnienia do prowadzenia obliczeń w zaawansowanych modelach przestrzennych dla określenia wskaźników procesowych niezależnych od współrzędnych przestrzennych, a jedynie od czasu trwania procesu.

W rozdz. 10.3 Autor umieścił omówienie procedury badawczej i uzyskanych wyników dla wtrysku pośredniego i współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 2,0$ przy prędkości obrotowej $n = 2500 \text{ obr/min}$ i 50% otwarciu przepustnicy. Na wykresie zmian ciśnienia w cylindrze w funkcji kąta OWK, w okresie trwania dolotu ładunku do cylindra ciśnienie wynosi ok. 0,2 MPa, co sugeruje, że modelowy silnik był doładowany niewielkim nadciśnieniem. Wartości temperatury ładunku w tym okresie wydają się to potwierdzać. Czy te parametry początkowe cyklu roboczego wynikały z parametrów stosowanych w badaniach stanowiskowych?

W tym fragmencie tekstu Doktorant odnotowuje wyznaczone wartości maksymalnego ciśnienia w cylindrze, maksymalnej szybkości narastania ciśnienia, kąta opóźnienia spalania (okres indukcji), maksymalnej temperatury ładunku (s. 59-60). Takie informacje są cenne wówczas, gdy przedstawia się je porównawczo, odnosząc do parametrów sterujących procesem albo w kontekście różnych metod badawczych (tutaj: symulacja, eksperyment). Brak więc tutaj jakiegokolwiek komentarza Autora, brak także takiej analizy porównawczej na końcu pracy.

Na s. 60 Autor podał wzór (10.1) na przebieg wywiązywania ciepła jako $Q(\alpha) = m_{sp}(\alpha) \cdot W_{op}$ pisząc przy tym, że przebieg zmian masy paliwa uzyskano z symulacji numerycznej. Rozumiem, że chodzi tutaj o przebieg wypalania wodoru. Jeżeli tak, to wartości Q dotyczą raczej ilości ciepła dostarczonego w cząsteczkach wodoru, ale czy rzeczywiście wywiązanego, to jest raczej hipotezą, choć pewno bliską rzeczywistości (w paliwach ciekłych takie przybliżenie jest dużo bardziej ryzykowne). Na dole s. 60 napisano, że prędkość wywiązywania ciepła można wyliczyć różniczkując równanie (10.1). Jeżeli tak zrobimy i będziemy interpretować szybkość wydzielania ciepła tak jak na rys. 10.5, to wynik takiej interpretacji jest całkowicie oderwany od rzeczywistego wykorzystania ciepła na zwiększenie temperatury i ciśnienia w cylindrze. A przecież po to mierzy się ciśnienie w cylindrze, żeby na jego podstawie określić średnią termodynamiczną temperaturę ładunku w cylindrze oraz z nich wyznaczyć przyrosty energii wewnętrznej ΔU i wykonanej pracy indykowanej $\Delta W_i = p_i \cdot \Delta V$, których suma stanowi

informację o tzw. ciepłe wykorzystanym Q_{wyk} . Różnica między ciepłem doprowadzonym Q_{dopr} a ciepłem wykorzystanym określa ciepło strat (do ścianek, przecieki itp.):

$$Q_{dopr} = \Delta U + W_j + Q_{strat}$$

Takie same wątpliwości pojawiają się po przeczytaniu rozdziału 10.4, który zawiera omówienie wyników symulacji dla przypadku bezpośredniego wtrysku wodoru do cylindra, dla takich samych warunków operacyjnych: $n = 2500$ obr/min, $\lambda = 2,0$.

Dla porównawczej oceny różnic pomiędzy różnymi strategiami zasilania w kontekście efektywności procesu spalania byłoby ogromnie ciekawe przeprowadzenie analizy porównawczej szybkości **wykorzystania** ciepła, gdyż wskaźnik taki pomaga ocenić dynamikę procesu.

Na zakończenie rozdziału 10 oczekuje się porównania wyników dla wtrysku pośredniego i bezpośredniego, gdyż przecież ciekawi nas różnica efektywności stosowania różnych systemów wtrysku; **takiego porównania zabrakło – dlaczego?**

6.6. Badania doświadczalne silnika spalinowego

Rozdział 11 dysertacji poświęcono omówieniu badań eksperymentalnych, stanowiskowych. Zawarto tutaj opis stanowiska badawczego i dość szczegółowy opis obiektu badań – jednocylindrowego silnika Holida ($V_s = 418$ cm³, lic. Hondy). Na kolejnych 11 zdjęciach pokazano elementy konstrukcyjne silnika oraz miejsca umieszczenia czujników pomiarowych. Tytuł rozdziału sugeruje także informacje o aparaturze pomiarowej, czego jednak w tekście się nie znajduje. Rzeczywiście w tekście mogą takie dane trochę „przeszkadzać”, ale powinny one się znaleźć w pracy, choćby w załączniku, aby zapewnić możliwość odtworzenia badań lub weryfikacji i oceny dokładności pomiarów. W badaniach doświadczalnych, szczególnie złożonych maszyn, jakimi są silniki spalinowe, ważna jest ocena dokładności i powtarzalności pomiarów, uzasadniająca wyciąganie wniosków uogólniających. Wprawdzie użyta aparatura jest bardzo dobrej jakości i dokładności pomiarowej, potwierdzonej w wielu badaniach prowadzonych w Laboratorium Silnikowym Politechniki Krakowskiej, ale skrócona ocena dokładności i powtarzalności badań była wskazana ze względu na poprawność i kompletność metodyczną.

Metodyka badań omówiona została w rozdziale 11.2. Badania były wykonywane przy prędkości obrotowej $n = 2500$ obr/min, przy zmiennym uchyleniu przepustnicy (12,5...50,0%), przy ciśnieniu wtrysku wodoru do kanału dolotowego 0,3 MPa i 5,0 MPa – przy wtrysku do cylindra. Zużycie wodoru mierzono pośrednio przez zmianę masy wodoru w butli ciśnieniowej. Pomiar zużycia powietrza wykonywany był standardowym przepływomierzem masowym (rodzaj, typ?). Sterowanie silnikiem i pomiarem odbywało się własnym oprogramowaniem w środowisku LabView.

Wyniki pomiarów dla przypadku zewnętrznego tworzenia mieszanki zebrano w tablicy 11.2; przedstawiono 7 punktów operacyjnych różniących się obciążeniem, współczynnikiem nadmiaru powietrza (1,4...1,97) i różnym kątem zapłonu. Odpowiadające tym punktom operacyjnym przebiegi ciśnienia w cylindrze przedstawiono na rys. 11.15...11.20. Nie jest dla mnie jasne, po co Doktorant przedstawiał te przebiegi zarówno w formie wykresów rozwiniętych, jak i wykresów zamkniętych ($f(V)$). Dodatkowe problemy odczytu powoduje niewielkie zróżnicowanie użytych kolorów dla kolejnych krzywych.

W tym fragmencie niestety także występuje skłonność Autora do opisywania zaobserwowanych wartości bez choćby uproszczonej interpretacji występujących zmienności i zależności od obciążenia lub innych parametrów regulacyjnych.

W rozdziale 11.4 procedura badawcza została powtórzona dla wtrysku wodoru do cylindra. Wyniki badań zebrano w tablicy 11.3, a przebiegi ciśnienia w cylindrze – na rysunkach 11.19...11.25 (uwaga: brak rysunku 11.20). Krzywe na tych rysunkach są trudno rozróżnialne, gdyż rysunki 11.19 i 11.21 są czarno-białe, a na pozostałych różnice kolorów są nieznaczne.

W tablicy 11.4 zebrano wyniki pomiarów dla dzielonej dawki wtryskowej, część wodoru wtryskiwano przed zapłonem (od ok. 62,0 – 90,6%), pozostała część – po zapłonie. Niestety nie znalazłem w tym miejscu graficznego porównania przebiegów ciśnienia w cylindrze oraz interpretacji występujących różnic i ich prawdopodobnych przyczyn. Próbę takiego porównania znalazłem w rozdziale 11.5, ale sprowadza się on raczej do wskazania na zarejestrowane wartości wybranych wskaźników i ich bardzo ogólnikową interpretację.

Rozdział 11.5 zawierający wnioski z badań stanowiskowych wymagają dodatkowej dyskusji. W 2-gim akapicie rozdziału Autor napisał: „Badania prowadzone podczas zasilania silniki...” – chyba powinno być „dla zasilania” lub „przy zasilaniu”, ale na pewno nie „podczas”. Te badania „...wykazały istotne ograniczenie...” – jakie ograniczenia, na ile istotne i w jakim zakresie, w jaki sposób wykazały? Dalej:... kryterium oceny było zachowanie prawidłowego procesu spalania...” – **a jak Doktorant definiuje prawidłowy przebieg spalania i jak wyznacza takie kryterium?** Pisz dalej: „W oparciu o to kryterium...”, a czytelnik ciągle nie wie jak Doktorant to kryterium ustalił. Dalej pojawia się pojęcie „... anomalie spalania” – czy to są każde możliwe zaburzenia spalania, czy chodzi o spalanie stukowe, którego rozpoznanie można oprzeć na znanych procedurach i zależnościach (które akurat tutaj powinno się chyba przytoczyć, albo choćby wspomnieć. To „kryterium” przywoływane jest także w kolejnym akapicie.

Doktorant także napisał: „...bogatszą mieszanką ... silnik mógł być zasilany wyłącznie podczas pracy z małym obciążeniem...” – **skąd ten wniosek, co to znaczy „małe obciążenie”, jak „małe”?**

Na s. 91 Autor napisał: „Opracowana koncepcja systemu spalania...” – czy rzeczywiście to jest koncepcja systemu spalania, czy tylko miejsca i sposobu dozowania paliwa? Dalej napisał: „Konieczność podziału dawki... wystąpiła także podczas pracy silnika z mniejszym obciążeniem...” – skąd taka konieczność wynikła i przy jakim obciążeniu wystąpiła, nie zostało określone w sposób ilościowy.

Ostatnie zdanie w tym rozdziale brzmi: „Najważniejszy wniosek... jest związany z możliwością uzyskania znacznego rozszerzenia pola pracy silnika...” – to jest trudne do interpretacji uogólnienie.

W podsumowaniu (rozd. 12) Doktorant napisał, że: wyniki... potwierdziły osiągnięcie postawionego w pracy naukowego celu badawczego”. Ale w rozdz. 6 taki naukowy cel badawczy nie został sformułowany całkiem jednoznacznie, a raczej jako sprawdzenie koncepcji nowego systemu spalania. Tym niemniej cel poznawczy w zakresie wykazania celowości i zakresu stosowania wtrysku wodoru jednoczęściowego i wtrysku dzielonego został osiągnięty. Wykazano też możliwość wpływania (kontroli?) na przebieg zmian ciśnienia w cylindrze przez stosowanie wtrysku dawką podzieloną, szczególnie w zakresie większych obciążeń (dawek) przy wtrysku do komory spalania.

Podsumowanie zawiera wnioski o charakterze poznawczym (akapit 1), wnioski metodyczne (akapit 2), wnioski aplikacyjne (akapit 3) i wnioski prognostyczne (akapit 4), choć ich postać uogólniona powinna opierać się na wcześniejszej analizie ilościowej, szczególnie w zakresie zależności przyczynowo-skutkowych, czego w tej pracy trochę brakuje.

7. Uwagi szczegółowe dotyczące treści i redakcji pracy

W przedłożonej rozprawie stwierdziłem pewne nieścisłości, błędy oraz braki edytorskie, które wymieniam poniżej:

- 1) W rozdziale 4 (4.1, 4.2), przy rozważaniach na temat zapalności mieszanek o różnych składach wskazane było poruszenie pojęcia energii aktywacji i jej zależności od stężenia reagentów oraz ich temperatury.
- 2) W rozdziale 7, na wykresie 7.2 (s. 30) podana jest zależność $W_o(\lambda)$, a powinna być wartość opałowa mieszanki $W_m(\lambda)$;
- 3) Autor napisał: „... duża wartość współczynnika dyfuzji $D=0,63 \text{ cm}^2/\text{s}$, gdzie (gdy) dla benzyny wynosi ...” (s. 24);
- 4) Jest: „... aby wartość ... nie przekraczała wartości...” (s. 34) – logicznie błędne;
- 5) Jest: „Z punktu widzenia celów zmierzających do zmniejszenia emisji CO_2 ...” (s. 28) – cel nie może zmierzać?
- 6) Tab. 7.1. wartość opałowa benzyny nie jest 32856 MJ/m^3 , a $32,856...$ (s. 29);
- 7) W liczbach podawanych w tekście, tablicach i na rysunkach występują różne ilości miejsc znaczących (np. s. 29, 30, 31, 59, 80-83), czasami nadmierna ich liczba (np. s. 38, 37, 50, 59);
- 8) Wielokrotnie na wykresach podawany jest nagłówek będący powieleniem podpisu – chyba zbędnie (s. 30, 31, 59, 60, 61, 63, 64, 80-83, 86-89);
- 9) Wielokrotnie łącznik zastosowano jako myślnik (np. s. 37);
- 10) W niektórych wzorach pisano znak mnożenia (wzór 9.2, 9.4, 9.6), w innych go pomijano (wz. 9.3, 9.10, 9.11, 9.12, 9.14, 9.15, 9.16) – niekonsekwencja edytorska;
- 11) Na rys. 9.2 na osi Y podano λ [ms] – λ jest bezwymiarowa lub [kg/kg]; dobrze jest w tabelce poniżej rysunku;
- 12) Po numerach podrozdziałów czasem jest kropka, czasem nie.
- 13) Rys. 10.6 – taki sam kolor dla 2 różnych krzywych – trudno się to analizuje.
- 14) Liczne „wiszące” litery;
- 15) Braki interpunkcyjne, nieliczne przypadki interpunkcji nadmiarowej (s. 15, 27);
- 16) Po nr nie robi się kropki (s. 21);
- 17) Brak spacji między liczbą a jednostką;
- 18) Brak wcięć akapitowych (s. 12 2x, s. 90);
- 19) Przywołanie źródła za kropką kończącą zdanie (s. 16 3x, 26);
- 20) *Poprzez* zamiast *przez* (s. 19, 27);
- 21) Zwroty obcojęzyczne powinny być pisane kursywą (s. 19, 20, 28).

Zauważone braki i niekonsekwencje redakcyjne mają charakter porządkowy i w żaden sposób nie umniejszają wartości naukowej i poznawczej przedłożonej pracy.

8. Podsumowanie oceny

Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi opracowanie zwarte opisujące kolejne etapy podjętych badań nad zastosowaniem zasilania silnika tłokowego mieszaniną wodorowo-powietrzną oraz poszukiwania najkorzystniejszego miejsca i sposobu sterowania wtryskiem wodoru. Zgodnie z zapisami Ustawy *Prawo o Szkolnictwie Wyższym* rozprawa doktorska ma prezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie, która reprezentuje, oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (art. 187, pkt. 1).

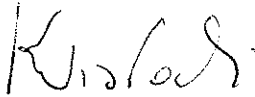
Doktorant przeprowadził dość obszernie studia problematyki naukowej dotyczącej podejmowanego tematu, dokonał syntezy dostępnej wiedzy i zdiagnozował występujące w niej braki. Na tej podstawie sformułował problem badawczy, przeprowadził analizę możliwych do zastosowania metod badawczych, wybrał określonych charakter badań i przyjął odpowiednią metodykę badawczą, uzyskał zestaw wyników badań i sformułował wnioski końcowe. Można zatem stwierdzić, że udowodnił swoją wiedzę teoretyczną i spełnił wymagania dotyczące samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Ponadto, wykonane przez Doktoranta studia i badania są aktualne, i stanowią istotny wkład w rozwój wiedzy silnikowej i pogłębienia jej praktycznego zastosowania, szczególnie w zakresie wtryskowego zasilania silnika tłokowego paliwem wodorowym.

Można także stwierdzić, że Doktorant w sposób oryginalny rozwiązał problem naukowy polegający na krytycznej badawczej ocenie możliwości i korzyści wynikających z zasilania tłokowego silnika spalinowego wodorem przez zastosowanie jego wtrysku do kolektora dolotowego lub bezpośrednio do cylindra z wykorzystaniem dawki jednolitej lub dzielonej. Tym samym spełnił wymagania zapisane w Ustawie, w art. 187, pkt. 2, a także przepisów wcześniejszych, obowiązujących w czasie otwarcia przewodu doktorskiego, tj. wskazanej w piśmie Dziekana Ustawy z dnia 14.03.2003 r. (Dz. U. z 2016 r. poz. 882) oraz Rozporządzenia MNiSzW z dnia 26 września 2016 r. (Dz. U. z dnia 30 września 2016 r., poz. 1586)

Uważam także, że warstwa metodologiczna przeprowadzonych badań spełnia wymagania stawiane pracom naukowym w dziedzinie nauk technicznych i kwalifikuje je jako dowód samodzielności naukowej i badawczej, gdyż przedstawiona do oceny praca ma cechy i strukturę naukowej pracy promocyjnej.

9. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę konstatacje przedstawione w punkcie 8 tej opinii wyrażam swoje przekonanie, że Kandydat nabył wystarczające kwalifikacje do samodzielnego prowadzenia naukowej pracy badawczej, i popieram wniosek o nadanie panu magistrowi inż. Łukaszowi Rodakowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.


Krzysztof Wisłocki