

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Proniewicza

pt. „Economic and environmental analysis of applying ammonia as carbon free fuel in internal combustion engine driven agricultural vehicle performed in whole life cycle approach”

**opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska,
Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej**

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim i ujęta na 77 stronach tekstu wraz z rysunkami i tabelami. Rozprawa obejmuje 6 rozdziałów oraz streszczenie, wykaz ważniejszych skrótów i symboli, bibliografię (66 pozycji), spis rysunków i spis tabel. Struktura ocenianej rozprawy jest prawidłowa, zawiera ona krótkie wprowadzenie, przegląd aktualnego stanu wiedzy, określenie problemu badawczego, celu i zakresu pracy, opis badań, analizę wyników badań oraz podsumowanie i wnioski.

Rozprawa powstała na podstawie czterech współautorskich artykułów, których treść nawiązuje do tytułu pracy oraz tematyki, będącej przedmiotem badań naukowych. Wykaz tych artykułów z podaniem autorów i wydawnictwa został zamieszczony na str. 10 rozprawy, a ich pełne kopie zostały zamieszczone w załączniku. Artykuły te tworzą logiczny i spójny cykl tematyczny określony w tytule rozprawy. Doktorant jest pierwszym autorem wszystkich czterech artykułów. Warto podkreślić jest to, że artykuły te zostały opublikowane w dobrych i bardzo dobrych czasopismach międzynarodowych:

- Journal of Energy Resources Technology – IF=2.4, CS=7.5, D2
- International Journal of Energy Research: IF=4.2, CS=12.1, D1
- Fuel: IF=7.5, CS=14.2, D1
- Energy: IF=9.4, CS=16.5, D1

Baza Wiedzy Politechniki Śląskiej podaje, że Doktorant ma w dorobku łącznie 10 publikacji, w tym 5 artykułów w czasopismach i 5 artykułów konferencyjnych. Prace te mają łącznie 28 cytowań oraz indeks $h=3$. Jak na początkowy etap kariery naukowej doktoranta jest to dorobek imponujący.

1. Wybór tematu rozprawy

Przedmiotem recenzowanej pracy doktorskiej jest analiza możliwości wykorzystania amoniaku jako alternatywnego paliwa w silnikach spalinowych o zapłonie samoczynnym, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań w rolnictwie, w tym w ciągnikach przeznaczonych do prac sadowniczych. Podjęta tematyka wpisuje się w aktualne wyzwania związane z transformacją energetyczną oraz koniecznością redukcji emisji gazów cieplarnianych w

sektorach trudnych do elektryfikacji. Rolnictwo, jako sektor o istotnym znaczeniu gospodarczym, charakteryzuje się znacznym zużyciem paliw kopalnych, co uzasadnia potrzebę poszukiwania alternatywnych nośników energii.

Celem głównym pracy była kompleksowa ocena środowiskowa oraz ekonomiczna zastosowania amoniaku jako paliwa w ciągniku rolniczym, przeprowadzona z wykorzystaniem metod analizy cyklu życia (LCA – Life Cycle Assessment) oraz rachunku kosztów cyklu życia (LCC – Life Cycle Costing). W pracy uwzględniono zarówno aspekty technologiczne związane z pracą silnika, jak i szeroki kontekst systemowy obejmujący produkcję paliwa, jego dystrybucję, użytkowanie oraz zagospodarowanie po zakończeniu eksploatacji.

Uważam wybór tematu recenzowanej rozprawy doktorskiej za trafny, aktualny i innowacyjny. Wiedza i doświadczenia zebrane w trakcie prac nad rozprawą mogą być przydatne w praktyce.

2. Zawartość rozprawy

W rozdziale pierwszym przedstawiono globalne uwarunkowania energetyczne, ze szczególnym uwzględnieniem rosnącego zapotrzebowania na energię oraz dominującej roli paliw kopalnych w jej wytwarzaniu. Wskazano na negatywne konsekwencje środowiskowe, w tym emisję gazów cieplarnianych i postępujące zmiany klimatyczne. Omówiono główne kierunki dekarbonizacji, takie jak poprawa efektywności energetycznej, rozwój odnawialnych źródeł energii oraz elektryfikacja. Podkreślono jednak ograniczenia tych rozwiązań w sektorach takich jak rolnictwo, gdzie zastosowanie napędów elektrycznych jest utrudnione ze względu na charakter pracy maszyn. W rozdziale tym sformułowano również cele i zakres pracy, wskazując na potrzebę kompleksowej oceny możliwości stosowania alternatywnych paliw, w tym amoniaku, z uwzględnieniem zarówno aspektów środowiskowych, jak i ekonomicznych.

Wskazano na kluczową zaletę amoniaku, jaką jest brak atomów węgla w cząsteczce, co eliminuje emisję dwutlenku węgla podczas spalania. Omówiono również stosunkowo korzystne właściwości magazynowania i transportu w porównaniu z wodorem. Jednocześnie przedstawiono także ograniczenia wykorzystania amoniaku, w tym niską prędkość spalania, wysoką temperaturę samozapłonu oraz trudności związane z inicjacją procesu spalania. Szczególną uwagę zwrócono na emisję tlenków azotu (NO_x), które stanowią istotne zagrożenie środowiskowe. W rozdziale omówiono także strategie techniczne umożliwiające wykorzystanie amoniaku w silnikach, w tym zastosowanie układów dwupaliwowych (dual-fuel), gdzie amoniak stanowi paliwo główne, a paliwo konwencjonalne pełni funkcję inicjującą zapłon.

W rozdziale drugim przedstawiono przegląd technologii produkcji amoniaku, ze szczególnym uwzględnieniem ich wpływu na środowisko. Omówiono klasyczne metody produkcji oparte na reformingu parowym metanu (SMR), określane jako produkcja „szarego” amoniaku, charakteryzujące się wysokimi emisjami CO₂. Następnie przedstawiono alternatywne ścieżki produkcji, takie jak:

- amoniak „niebieski” (z zastosowaniem technologii wychwytywania i składowania CO₂ – CCS),
- amoniak „zielony” (produkowany z wykorzystaniem wodoru otrzymanego w procesie elektrolizy zasilanej energią odnawialną),

- amoniak „różowy” (z wykorzystaniem energii jądrowej).

Wykazano, że całkowity wpływ środowiskowy amoniaku jest w dużej mierze determinowany przez źródło energii wykorzystywane w procesie jego produkcji.

Rozdział ten zawiera też szczegółowy opis zastosowanej metodyki badawczej. W części dotyczącej analizy LCA (Life Cycle Assessment) określono granice systemu (well to wheel - od wydobycia do użycia), jednostkę funkcjonalną oraz kategorie wpływu środowiskowego, takie jak zmiana klimatu, wpływ na zdrowie ludzi, ekosystemy oraz zużycie zasobów. Rozdział drugi omawia w skrócie pierwszy artykuł cyklu.

W rozdziale trzecim zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym, przystosowanego do zasilania amoniakiem. Analizie poddano parametry pracy, takie jak sprawność, zużycie paliwa oraz emisje zanieczyszczeń w różnych warunkach obciążenia. Wyniki wykazały, że:

- zastosowanie amoniaku prowadzi do istotnej redukcji emisji CO₂, przy jednoczesnym wzroście emisji NO_x,
- sprawność silnika jest porównywalna z silnikiem zasilanym olejem napędowym przy wysokich obciążeniach, natomiast niższa w warunkach częściowego obciążenia,
- zużycie paliwa jest wyższe ze względu na niższą wartość opałową amoniaku.

Wykazano, że parametry pracy silnika są silnie uzależnione od warunków eksploatacyjnych oraz konfiguracji układu zasilania. Rozdział trzeci omawia drugi artykuł cyklu.

Rozdział czwarty zawiera wyniki analizy cyklu życia (LCA) ciągnika sadowniczego zasilanego amoniakiem. Wykazano, że zastosowanie amoniaku jako paliwa może prowadzić do redukcji emisji gazów cieplarnianych, szczególnie w przypadku wykorzystania niskoemisyjnych ścieżek produkcji (zielony i różowy amoniak). Jednocześnie stwierdzono, że:

- wpływ na zdrowie ludzi jest wyższy w porównaniu z paliwami konwencjonalnymi,
- wpływ na ekosystemy również ulega zwiększeniu,
- głównym źródłem negatywnego oddziaływania jest faza eksploatacji, w której emitowane są związki azotu.

Zastosowanie systemów oczyszczania spalin, takich jak selektywna redukcja katalityczna (SCR), pozwala na ograniczenie emisji NO_x, jednak nie eliminuje ich całkowicie. Rozdział czwarty omawia trzeci artykuł cyklu.

W rozdziale piątym przedstawiono wyniki analizy kosztów cyklu życia (LCC – Life Cycle Costing) ciągnika sadowniczego zasilanego amoniakiem w porównaniu do ciągnika klasycznego zasilanego olejem napędowym. Wykazano, że zastosowanie amoniaku wiąże się z:

- wyższymi kosztami inwestycyjnymi, wynikającymi z konieczności modyfikacji silnika i instalacji paliwowej,
- niepewnością kosztów eksploatacyjnych, zależnych od ceny amoniaku oraz kosztów jego produkcji.

Podkreślono, że opłacalność technologii amoniakalnej jest silnie uzależniona od czynników zewnętrznych, takich jak polityka energetyczna, ceny energii oraz rozwój infrastruktury. Rozdział piąty omawia czwarty artykuł cyklu.

W końcowym rozdziale szóstym sformułowano najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz. Stwierdzono, że amoniak posiada istotny potencjał jako paliwo alternatywne w rolnictwie, szczególnie w kontekście ograniczania emisji CO₂. Jednocześnie jego zastosowanie wiąże się z wyzwaniami technologicznymi i środowiskowymi, przede wszystkim w zakresie emisji związków azotu. Wskazano konieczność dalszych badań nad:

- optymalizacją procesu spalania amoniaku,
- redukcją emisji NO_x,
- rozwojem efektywnych systemów oczyszczania spalin,
- obniżeniem kosztów produkcji amoniaku z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii.

Podsumowując, praca stanowi kompleksowe opracowanie dotyczące możliwości wykorzystania amoniaku jako paliwa w sektorze rolniczym, łącząc analizę technologiczną, środowiskową i ekonomiczną. Uzyskane wyniki wskazują, że amoniak może odegrać istotną rolę w procesie transformacji energetycznej, jednak jego wdrożenie wymaga dalszego rozwoju technologicznego oraz odpowiednich uwarunkowań rynkowych i regulacyjnych.

3. Ocena rozprawy

Jednym z atutów rozprawy jest podjęcie aktualnego i praktycznie istotnego problemu badawczego, związanego z poszukiwaniem ekologicznych i ekonomicznych paliw alternatywnych do silników spalinowych.

Zamierzony przez autora cel rozprawy wymagał zaprojektowania planu badań modelowych (środowiskowych LCA i ekonomicznych LCC), zbudowania i użycia stanowiska silnikowego, wyszukania w literaturze danych do badań modelowych LCA i LCC, przeprowadzenia licznych złożonych testów modelowych i silnikowych oraz przeanalizowania i opracowania wyników. Cel pracy został w pełni osiągnięty i uzyskane wyniki analiz modelowych i badań doświadczalnych stanowią wartościowy i oryginalny dorobek naukowy autora.

Plan realizacji badań został prawidłowo opracowany. Poszczególne części składowe pracy zostały zaprezentowane w sposób logiczny i czytelny. Zarówno analiza poszczególnych problemów jak i wyciągane wnioski są prawidłowe.

Oceniana rozprawa doktorska stanowi znaczący wkład naukowy w rozwój technologii ekologicznych źródeł energii, szczególnie w kontekście zastosowania amoniaku jako paliwa alternatywnego w silnikach spalinowych o zapłonie samoczynnym. Dzięki szczegółowym badaniom modelowym i eksperymentalnym praca ta dostarcza szeregu cennych informacji na temat optymalizacji cyklu życia ciągnika ogrodniczego, co jest kluczowe dla dalszego rozwoju ekologicznych technologii silnikowych.

Praca jest napisana bardzo dobrym językiem angielskim, w sposób jasny i komunikatywny oraz świadczy o dużej wiedzy i samodzielności badawczej doktoranta. Istnieje możliwość dalszego rozwoju zaproponowanej koncepcji oraz po spełnieniu szeregu wymagań także wdrożenia do praktyki eksploatacyjnej.

Na pozytywną ocenę zasługuje jasna i logiczna struktura rozprawy, która ułatwia śledzenie toku rozumowania Autora. Pomimo znacznego stopnia złożoności zagadnienia, praca została napisana w sposób czytelny i konsekwentny.

Podsumowując stwierdzam, że autor sformułował oryginalny i aktualny problem naukowy, przeprowadził własne oryginalne i rozległe badania modelowe i doświadczalne na podstawie których sformułował wnioski o dużej wartości poznawczej i praktycznej.

Doktorant wykazał opanowanie warsztatu naukowego i umiejętność prowadzenia samodzielnych badań naukowych, analizy wyników i wnioskowania. Doktorant posiadał umiejętność pisania rozprawy naukowej z jasno sformulowanym tytułem, celem, tezą i zakresem pracy oraz zwięzłym, przejrzystym i precyzyjnym opisem metodologii badań i wyników.

4. Pytania i uwagi szczegółowe

1. W badaniach doświadczalnych tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym mierzono zużycie paliwa i emisję składników spalin w celu określenia jego osiągow i wpływu na środowisko. Dlaczego nie wyznaczono wykresu indykatorowego, podstawowego pomiaru służącego do diagnostyki cyklu roboczego silnika. Bez wglądu w ten wykres nic nie wiadomo o przebiegu procesu spalania amoniaku w silniku. Zmierzone przez autorów parametry efektywne (zewnętrzne) nie są właściwym narzędziem do oceny procesu spalania paliw alternatywnych.
2. W spalinach zmierzono znaczącą obecność niespalonego amoniaku co wskazuje na jego niezupełne spalanie. Jest to przypuszczalnie wynikiem bardzo małej prędkości spalania i wygaszania płomienia, szczególnie przy zmniejszaniu obciążenia. Wyniki pomiarów przedstawione w Tabeli 8 artykułu pokazują, że wraz ze zmniejszaniem obciążenia szybciej zmniejsza się procentowy udział amoniaku w ładunku w komorze spalania niż w spalinach. Dowodzi to więc pośrednio teorii z wygaszaniem płomienia. Brak wykresu indykatorowego nie pozwala niestety na dokładniejsze wyjaśnienie obserwowanych zjawisk, ale przypuszczalnie przy zasilaniu silnika amoniakiem parametry wtrysku paliwa inicjującego zapłon nie są optymalne.
3. W analizie ekonomicznej przedstawionej w rozdziale piątym wykorzystano dane kosztowe z rynku USA, dlaczego nie wykonano tej analizy w oparciu o dane polskie lub europejskie.
4. Praca w 3/4 dotyczy zagadnień technicznych i środowiskowych, a tylko w 1/4 zagadnieniom ekonomicznym, tak więc jej tytuł powinien raczej zaczynać się od „Environmental and economic analysis”. Tak ujęty tytuł lepiej lokuje pracę w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

5. Wniosek końcowy

Reasumując, uważam, że rozprawa, lokująca się tematycznie w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza wysoki poziom wiedzy i umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych Doktoranta. Rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą Ustawę o stopniach i tytułach naukowych, stawiam więc wniosek o jej przyjęcie i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Usterki pracy są drugorzędne i nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę pod względem postawienia problemu badawczego, zrealizowania programu badań, analizy

wyników i napisania przejrzystej rozprawy naukowej. Dlatego stawiam wniosek o wyróżnienie tej pracy, ze względu na:

1. Ważny, aktualny i oryginalny problem badawczy;
2. Duży zakres modelowych i doświadczalnych prac badawczych;
3. Bardzo staranne i wnikliwe przeanalizowanie wyników badań złożonego problemu naukowego. Zakres pracy i poziom warsztatu naukowego przewyższa wartości uznawane powszechnie za standardowe;
4. Uzyskanie oryginalnych wyników naukowych o dużych wartościach poznawczych, z perspektywą ich wykorzystania w praktyce.
5. Opublikowanie wyników badań w czterech bardzo dobrych czasopismach międzynarodowych.

Podpisał Andrzej Teodorczyk