



**AGH** AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Kraków, 24.03.20226 r.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Energetyki i Paliw

Al. A. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

[wnowak@agh.edu.pl](mailto:wnowak@agh.edu.pl)

## **Recenzja**

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Proniewicza**

#### **„ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF APPLYING AMMONIA AS CARBON FREE FUEL IN INTERNAL COMBUSTION ENGINE DRIVEN AGRICULTURAL VEHICLE PERFORMED IN WHOLE LIFE CYCLE APPROACH”**

#### **Wstęp**

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej z 19.02.2026 (pismo RIE-BD.512.12.2026 z 03.03.2026 r.).

#### **Zasadność tematyki**

Podjęta w rozprawie doktorskiej tematyka wykorzystania amoniaku jako paliwa bezwęglowego w silnikach spalinowych należy do aktualnych i istotnych kierunków badań w obszarze transformacji energetycznej oraz dekarbonizacji sektorów trudnych do elektryfikacji. W szczególności dotyczy to takich obszarów jak rolnictwo i transport ciężki, gdzie dominują jednostki napędowe oparte na silnikach wysokoprężnych.

Współczesny system energetyczny w dalszym ciągu opiera się w przeważającej mierze na paliwach kopalnych, których udział w globalnym zużyciu energii pierwotnej sięga około 85%. Powoduje to istotne emisje gazów cieplarnianych i wymusza poszukiwanie

alternatywnych nośników energii o zerowym lub niskim śladzie węglowym. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabierają paliwa syntetyczne oraz nośniki wodoru. Amoniak stanowi jedno z najbardziej obiecujących rozwiązań w tej grupie ponieważ jako związek chemiczny nie zawiera atomów węgla co oznacza, że jego spalanie nie prowadzi bezpośrednio do emisji CO<sub>2</sub>. Tym samym może być traktowany jako paliwo bezwęglowe w sensie operacyjnym czyli na etapie użytkowania układu energetycznego. Jednocześnie amoniak jest nośnikiem wodoru, który może być wytwarzany z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii co dodatkowo wzmacnia jego potencjał dekarbonizacyjny.

Istotną przewagą amoniaku nad wodorem jest znacznie łatwiejsze magazynowanie i transport. W przeciwieństwie do wodoru wymagającego bardzo niskich temperatur lub wysokich ciśnień amoniak może być przechowywany w stanie ciekłym w relatywnie łagodnych warunkach co czyni go bardziej praktycznym paliwem dla zastosowań mobilnych i rozproszonych. Z punktu widzenia zastosowań silnikowych amoniak wykazuje właściwości umożliwiające jego wykorzystanie w silnikach o zapłonie samoczynnym. Pomimo niższej wartości opałowej w przeliczeniu na jednostkę masy jego charakterystyka spalania pozwala na dostarczenie porównywalnej ilości energii w mieszaninie paliwowo powietrznej. Jednocześnie wymaga on odpowiednich modyfikacji układu spalania ze względu na wysoką temperaturę samozapłonu oraz niską prędkość spalania co uzasadnia prowadzenie badań eksperymentalnych i modelowych w tym zakresie.

Należy podkreślić, że szczególne znaczenie ma aplikacja analizowana w rozprawie czyli wykorzystanie amoniaku w maszynach rolniczych. Sektor rolnictwa charakteryzuje się ograniczoną możliwością elektryfikacji ze względu na wymagania energetyczne oraz warunki eksploatacyjne. Jednocześnie jest to sektor, który już obecnie wykorzystuje amoniak na dużą skalę co stwarza unikalne warunki do jego dalszego wykorzystania jako paliwa energetycznego.

Ważnym aspektem podnoszącym rangę tematu jest również podejście systemowe zastosowane w pracy obejmujące analizę cyklu życia LCA oraz rachunek kosztów cyklu życia LCC. W literaturze brakuje kompleksowych analiz łączących aspekty środowiskowe i ekonomiczne dla zastosowań amoniaku w silnikach spalinowych w sektorze rolniczym co stanowi wyraźnie zidentyfikowaną lukę badawczą.

Podsumowując należy stwierdzić, że tematyka rozprawy jest w pełni uzasadniona zarówno z punktu widzenia aktualnych wyzwań transformacji energetycznej jak i rozwoju nowych paliw bezwęglowych. Naukowy problem został prawidłowo zdefiniowany i rozwinięty za pomocą zaprezentowanych tez pracy. Zarówno cel, jak i zakres badania adekwatnie wynikają z wykonanej analizy literatury naukowej oraz problemu zdefiniowanego przez Doktoranta.

## **Układ pracy**

Rozprawa doktorska ma charakter cyklu powiązanych tematycznie publikacji naukowych uzupełnionych komentarzem autorskim integrującym przedstawione wyniki badań. Taka struktura jest w pełni uzasadniona ze względu na złożoność analizowanego zagadnienia oraz interdyscyplinarny charakter pracy obejmujący aspekty energetyczne środowiskowe oraz ekonomiczne.

Trzon rozprawy stanowią cztery artykuły naukowe opublikowane w czasopismach o uznanej renomie, które dokumentują kolejne etapy badań nad wykorzystaniem amoniaku jako paliwa bezwęglowego w silnikach spalinowych. Artykuły te zostały załączone do pracy doktorskiej. We wszystkich tych artykułach Doktorant występuje jako pierwszy współautor.

I. Proniewicz, M., Petela, K., Szlęk, A., & Adamczyk, W. (2024). Life cycle assessment of selected ammonia production technologies from the perspective of ammonia as a fuel for heavy-duty vehicle. *Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the Asme*, 146, Article 3, 030905. <https://doi.org/10.1115/1.4064371> (IF = 2.4)

II. Proniewicz, M., Petela, K., Szlęk, A., Przybyła, G., Nadimi Karamjavan, E., Ziółkowski, Ł., Løvås, T., & Adamczyk, W. (2023). Energy and exergy assessments of a diesel, biodiesel and ammonia-fueled compression ignition engine. *International Journal of Energy Research*, 2023, 9920670. <https://doi.org/10.1155/2023/9920670> (IF = 4.2)

III. Proniewicz, M., Petela, K., & Szlęk, A. (2025). Life cycle assessment of ammonia as carbon-free fuel in internal combustion engine-driven orchard vehicle. *Fuel*, 400, 135809. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135809> (IF = 7.5)

IV. Proniewicz, M., Petela, K., & Szlęk, A. (2025). Life cycle costing of an ammonia-fueled internal combustion engine-driven orchard vehicle. *Energy*, 334, 137814. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137814> (IF = 9.4)

1. Artykuł pierwszy dotyczy analizy cyklu życia wybranych technologii produkcji amoniaku z perspektywy jego wykorzystania jako paliwa w pojazdach ciężkich. Praca ta stanowi podstawę do oceny wpływu sposobu wytwarzania amoniaku na jego całkowity ślad środowiskowy.
2. Artykuł drugi koncentruje się na analizie energetycznej i egzergicznej silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego amoniakiem w porównaniu z paliwami konwencjonalnymi. W artykule tym przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, które stanowią kluczowe dane wejściowe do dalszych analiz środowiskowych.
3. Artykuł trzeci obejmuje kompleksową analizę cyklu życia zastosowania amoniaku jako paliwa w mini ciągniku sadowniczym. Jest to zasadnicza część rozprawy, w której dokonano porównania wariantu amoniakalnego z referencyjnym układem dieslowym w ujęciu środowiskowym.
4. Artykuł czwarty dotyczy rachunku kosztów cyklu życia dla analizowanego rozwiązania technicznego i stanowi uzupełnienie oceny środowiskowej o aspekt ekonomiczny umożliwiającą kompleksową ocenę zasadności wdrożenia technologii.

Układ pracy został podporządkowany logice prowadzonej analizy i obejmuje sześć rozdziałów, które integrują wyniki zawarte w publikacjach. Rozdział pierwszy wprowadza w tematykę pracy przedstawiając tło badawcze cele oraz zidentyfikowaną lukę badawczą. Rozdział drugi rozwija zagadnienie produkcji amoniaku i odpowiada zakresowi pierwszego artykułu. Rozdział trzeci prezentuje wyniki badań eksperymentalnych silnika co bezpośrednio odpowiada drugiej publikacji. Rozdział czwarty stanowi syntezę analiz środowiskowych LCA i opiera się na wynikach trzeciego artykułu. Rozdział piąty poświęcony jest analizie ekonomicznej LCC i odpowiada czwartej publikacji. Całość zamyka rozdział szósty zawierający podsumowanie oraz wnioski końcowe.

Taki układ pracy zapewnia spójność metodologiczną oraz umożliwia przejście od analizy technologii produkcji paliwa poprzez badania eksperymentalne, aż do kompleksowej oceny środowiskowej i ekonomicznej systemu energetycznego opartego na amoniaku.

### **Elementy nowości naukowej i praktycznej rozprawy doktorskiej**

Przedłożona rozprawa doktorska wnosi istotny wkład zarówno do rozwoju wiedzy naukowej jak i do praktyki inżynierskiej w obszarze wykorzystania paliw bezwęglowych w zastosowaniach mobilnych. Nowość pracy należy rozpatrywać w ujęciu kompleksowym obejmującym integrację badań eksperymentalnych, analiz środowiskowych oraz ocen ekonomicznych.

### **Oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**

Do najważniejszych osiągnięć o charakterze naukowym należy zaliczyć przede wszystkim opracowanie spójnej metodyki oceny wykorzystania amoniaku jako paliwa w silniku o zapłonie samoczynnym w ujęciu pełnego cyklu życia. Autor nie ogranicza się do analizy pojedynczego etapu lecz integruje proces produkcji paliwa jego wykorzystanie w silniku oraz skutki środowiskowe i ekonomiczne w jednym modelu analitycznym.

Istotnym elementem nowości jest powiązanie danych eksperymentalnych z badaniami silnikowymi z analizą LCA. W pracy wykorzystano rzeczywiste pomiary emisji dla układu dwupaliwowego amoniak biodiesel co znacząco podnosi wiarygodność wyników i odróżnia tę pracę od wielu analiz literaturowych opartych wyłącznie na danych modelowych.

Kolejnym elementem nowatorskim jest jednoczesne uwzględnienie różnych ścieżek produkcji amoniaku w analizie porównawczej. Autor analizuje warianty szary niebieski oraz odnawialny co pozwala na wykazanie, że amoniak jako paliwo bezwęgłowe musi być oceniany w kontekście całego łańcucha wartości, a nie tylko etapu spalania.

Na szczególne podkreślenie zasługuje również uwzględnienie emisji podtlenku azotu jako kluczowego czynnika wpływającego na bilans klimatyczny. Wykazano, że obecność  $N_2O$  może istotnie ograniczać korzyści dekarbonizacyjne co stanowi ważny wkład do dyskusji nad realnym potencjałem paliw azotowych.

Nowością naukową jest także rozszerzenie analizy o rachunek kosztów cyklu życia LCC zintegrowany z analizą środowiskową. Takie podejście pozwala na jednoczesną ocenę efektywności ekologicznej i ekonomicznej co wciąż pozostaje rzadkością w badaniach nad paliwami alternatywnymi.

Dodatkowo praca wypełnia zidentyfikowaną lukę badawczą dotyczącą zastosowania amoniaku w sektorze rolniczym w szczególności dla mini ciągników sadowniczych, dla których brakowało dotychczas kompleksowych analiz.

### **Praktyczne zastosowanie uzyskanych wyników badań**

W aspekcie aplikacyjnym rozprawa dostarcza konkretnych wniosków dotyczących możliwości wdrożenia amoniaku jako paliwa w rzeczywistych układach napędowych.

Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdzają techniczną wykonalność zastosowania amoniaku w silniku o zapłonie samoczynnym przy wykorzystaniu układu dwupaliwowego.

Istotnym osiągnięciem praktycznym jest określenie rzeczywistego potencjału redukcji emisji gazów cieplarnianych. Wykazano, że redukcja emisji na etapie eksploatacji jest umiarkowana, a w ujęciu pełnego cyklu życia może osiągać poziom około 40% przy zastosowaniu niskoemisyjnych źródeł produkcji amoniaku.

Praca dostarcza również cennych informacji dotyczących ograniczeń technologicznych takich jak emisje NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> oraz N<sub>2</sub>O, które wymagają zastosowania dodatkowych układów oczyszczania spalin. Wskazanie tych barier ma istotne znaczenie dla dalszego rozwoju technologii.

W wymiarze ekonomicznym autor wykazał, że główną barierą wdrożeniową jest wysoki koszt inwestycyjny pojazdów zasilanych amoniakiem, który może być kilkukrotnie wyższy niż w przypadku rozwiązań konwencjonalnych. Jednocześnie wskazano warunki brzegowe, przy których technologia może stać się konkurencyjna co stanowi ważną wskazówkę dla decydentów i inwestorów.

Na uwagę zasługuje także wskazanie potencjalnych mechanizmów wsparcia takich jak subsydia inwestycyjne czy uwzględnienie kosztów emisji CO<sub>2</sub>, które mogą przyspieszyć wdrożenie analizowanej technologii.

Podsumowując rozprawa łączy wysoki poziom naukowy z wyraźnym potencjałem aplikacyjnym dostarczając zarówno nowych metod analizy jak i praktycznych wniosków dla transformacji energetycznej w sektorze rolniczym i transportowym.

### **Poziom warsztatowy**

Poziom warsztatowy rozprawy doktorskiej należy ocenić jako wysoki i adekwatny do wymagań stawianych pracom w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Autor wykazuje dobre przygotowanie metodologiczne oraz umiejętność prowadzenia badań o charakterze eksperymentalnym, modelowym i analitycznym.

Na szczególne podkreślenie zasługuje poprawność doboru metod badawczych. W pracy zastosowano uznane i ugruntowane podejścia, takie jak analiza cyklu życia LCA oraz rachunek kosztów cyklu życia LCC zgodne z normami ISO oraz wytycznymi ILCD co świadczy o dojrzałości warsztatowej autora. Metody te zostały właściwie zaadaptowane do specyfiki analizowanego układu technicznego. Wysoko należy ocenić sposób integracji badań eksperymentalnych z analizami systemowymi. Autor wykorzystał rzeczywiste dane pomiarowe dotyczące emisji silnika zasilanego amoniakiem co stanowi istotną wartość pracy. Zastosowana aparatura pomiarowa oraz zakres rejestrowanych parametrów wskazują na właściwe zaprojektowanie stanowiska badawczego.

Poprawnie zdefiniowano granice systemu oraz jednostkę funkcjonalną co ma kluczowe znaczenie dla wiarygodności analiz LCA. Przyjęcie jednostki eksploatacji ciągnika jest

uzasadnione charakterem analizowanego zastosowania i świadczy o umiejętności dostosowania metod do realnych warunków pracy systemu.

Na uwagę zasługuje także szeroki zakres analiz obejmujący różne ścieżki produkcji amoniaku oraz ich konsekwencje środowiskowe i ekonomiczne. Autor wykazuje umiejętność krytycznej analizy danych literaturowych oraz ich właściwego wykorzystania w modelowaniu procesów technologicznych.

Strona obliczeniowa pracy jest spójna i logiczna. Autor konsekwentnie stosuje przyjęte założenia oraz przeprowadza analizy w sposób przejrzysty co umożliwia śledzenie toku rozumowania. Wyniki prezentowane są w sposób czytelny zarówno w formie tabelarycznej jak i graficznej co ułatwia ich interpretację.

Pewnym elementem, który można wskazać jako wymagający dalszego rozwinięcia jest bardziej pogłębiona analiza niepewności szczególnie w odniesieniu do danych ekonomicznych oraz zmienności parametrów rynkowych. Nie wpływa to jednak istotnie na ogólną wysoką ocenę poziomu warsztatowego pracy.

Podsumowując autor wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych na wysokim poziomie poprawnego stosowania zaawansowanych narzędzi analitycznych oraz krytycznej interpretacji uzyskanych wyników co w pełni potwierdza jego kompetencje jako badacza.

### **Uwagi krytyczne**

Pomimo wysokiego poziomu naukowego oraz warsztatowego rozprawy należy wskazać szereg uwag krytycznych, które mogą przyczynić się do dalszego udoskonalenia pracy oraz doprecyzowania niektórych aspektów analizy.

1. W pierwszej kolejności należy zwrócić uwagę na ograniczony zakres analizy niepewności. W pracy przedstawiono wyniki analiz środowiskowych i ekonomicznych w sposób deterministyczny, podczas gdy zarówno dane wejściowe jak i parametry rynkowe cechują się znaczną zmiennością. Dotyczy to w szczególności cen energii kosztów produkcji amoniaku oraz parametrów emisji. Rozszerzenie analizy o podejście probabilistyczne lub scenariuszowe pozwoliłoby na pełniejsze zobrazowanie ryzyka inwestycyjnego i środowiskowego.
2. Kolejną kwestią jest przyjęcie założeń dotyczących ścieżek produkcji amoniaku. Choć autor analizuje kilka wariantów wytwarzania to jednak przyjęte parametry technologiczne mają charakter uśredniony i odnoszą się do warunków europejskich. Brakuje głębszej dyskusji wpływu lokalizacji instalacji dostępności energii odnawialnej oraz skali produkcji na wyniki końcowe analizy.
3. W zakresie badań eksperymentalnych należy wskazać, że testy silnikowe zostały przeprowadzone dla jednego typu jednostki napędowej oraz w ograniczonym zakresie warunków pracy. O ile jest to zrozumiałe z punktu widzenia możliwości badawczych to jednak ogranicza możliwość uogólnienia wyników na inne klasy maszyn i zastosowań. W szczególności brakuje odniesienia do pracy w warunkach dynamicznych oraz długookresowej eksploatacji.
4. Istotnym zagadnieniem wymagającym szerszej analizy jest emisja związków azotu w tym NO<sub>x</sub> oraz N<sub>2</sub>O. Autor słusznie identyfikuje ich znaczenie jednak analiza

ogranicza się głównie do poziomu ilościowego. Brakuje pogłębionej dyskusji mechanizmów powstawania tych związków oraz możliwości ich redukcji na poziomie konstrukcji silnika i systemów oczyszczania spalin.

5. W części środowiskowej pracy należałoby również szerzej omówić wpływ innych kategorii oddziaływania takich jak toksyczność czy wpływ na jakość powietrza lokalnego. Skoncentrowanie się na wybranych kategoriach ReCiPe jest uzasadnione metodologicznie jednak ogranicza pełny obraz oddziaływania technologii.
6. W zakresie analizy ekonomicznej pewnym ograniczeniem jest uproszczone podejście do modelowania kosztów inwestycyjnych oraz eksploatacyjnych. W szczególności nie uwzględniono w sposób szczegółowy kosztów infrastruktury paliwowej magazynowania amoniaku oraz wymagań bezpieczeństwa, które mogą istotnie wpływać na opłacalność wdrożenia.
7. Dodatkowo można wskazać na stosunkowo ograniczoną analizę porównawczą z innymi alternatywnymi paliwami bezwęglowymi takimi jak wodór czy paliwa syntetyczne. Szersze odniesienie do konkurencyjnych technologii pozwoliłoby lepiej osadzić wyniki pracy w kontekście transformacji energetycznej.

Od strony redakcyjnej praca jest przygotowana poprawnie jednak miejscami można zauważyć nadmierną skrótowość w interpretacji wyników oraz brak jednoznacznego wskazania, które czynniki mają kluczowy wpływ na końcowe wnioski.

Podsumowując przedstawione uwagi krytyczne nie podważają wartości naukowej rozprawy lecz wskazują kierunki jej dalszego rozwijania oraz pogłębiania analiz co jest naturalnym elementem prac badawczych na tym poziomie zaawansowania.

### **Wnioski końcowe**

Reasumując, stwierdzam, iż tematyka 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” jest aktualna i w pełni uzasadniona zarówno z punktu widzenia wyzwań transformacji energetycznej jak i rozwoju paliw bezwęglowych w sektorach trudnych do dekarbonizacji.

Praca mieści się w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych i praktycznych recenzowanej rozprawy zaliczam:

- podjęcie aktualnej i istotnej problematyki badawczej związanej z dekarbonizacją sektorów trudnych do elektryfikacji poprzez wykorzystanie amoniaku jako paliwa bezwęglowego,
- kompleksowe podejście badawcze polegające na integracji analiz środowiskowych typu LCA z analizą ekonomiczną LCC oraz wynikami badań eksperymentalnych. Takie ujęcie pozwala na całościową ocenę technologii w pełnym cyklu życia co stanowi istotną wartość naukową i aplikacyjną.
- Istotnym walorem pracy jest wykorzystanie rzeczywistych danych eksperymentalnych dotyczących pracy silnika zasilanego amoniakiem co znacząco zwiększa wiarygodność uzyskanych wyników i wyróżnia pracę na tle analiz opartych wyłącznie na modelowaniu.

- Szeroki zakres analiz obejmujący różne ścieżki produkcji amoniaku co pozwala na krytyczną ocenę jego rzeczywistego potencjału dekarbonizacyjnego w zależności od źródła wodoru.
- Identyfikacja kluczowych ograniczeń technologicznych związanych z emisjami związków azotu w tym N<sub>2</sub>O co wnosi istotny wkład do dyskusji nad rzeczywistym bilansem środowiskowym paliw bezwęglowych.
- Skoncentrowanie analiz na konkretnym zastosowaniu praktycznym jakim jest mini ciągnik sadowniczy co zwiększa jej znaczenie aplikacyjne i umożliwia formułowanie wniosków o charakterze wdrożeniowym.

Wysoko należy ocenić poprawność metodyczną prowadzonych analiz oraz zastosowanie uznanych standardów badawczych w zakresie LCA i LCC co świadczy o dojrzałości warsztatowej autora.

Na podkreślenie zasługuje również czytelna i logiczna struktura pracy oparta na cyklu publikacji naukowych co zapewnia przejrzystość prezentacji wyników oraz ich spójność metodologiczną.

Całość pracy charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym oraz wyraźnym potencjałem aplikacyjnym co czyni ją wartościowym wkładem w rozwój badań nad alternatywnymi paliwami w energetyce i transporcie.

Reasumując stwierdzam, że oceniona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym. Wobec powyższego *wnioskuję, by Wysoka Rada Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej dopuściła mgr inż. Mateusza Proniewicza do dalszego etapu postępowania doktorskiego.*

Podpisał Wojciech Nowak