

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

Poznań, 27.03.2025

R E C E N Z J A
rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Rykały
pt.: „Badanie emisji CO₂ pojazdu osobowego na wybranym przykładzie
z zastosowaniem metod matematycznych”

podstawa opracowania: pismo płk. prof. dr. hab. inż. Michała Kędzierskiego – Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Wojskowej Akademii Technicznej nr 15/RDN/ILGiT/2025 z dnia 18.02.2025 r., do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej wraz z umową i rachunkiem.

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Skażenie środowiska naturalnego, wywołane stosowaniem silników spalinowych, jest częścią globalnej problematyki ekologicznej i jest przedmiotem wielu działań współczesnego człowieka już od dawna. Od półwiecza odnotowuje się jednak wyraźne działania legislacyjne, głównie w zakresie ograniczania emisji związków szkodliwych ze spalin silników (docelowo: Euro 7 i FIT to 55).

Prowadzenie badań dotyczących emisji CO₂ z silników spalinowych nabiera ogromnego znaczenia w kontekście globalnego wysiłku dotyczącego minimalizacji CO₂ do środowiska. Problematyka emisji gazów cieplarnianych w tym CO₂ stanowi w obecnych czasach aktualny problem dotyczący wielu obszarów gospodarki, w szczególności transportu. Proces dekarbonizacji transportu jest złożonym zagadnieniem, składającym się z wielu ukierunkowanych działań. Oprócz najważniejszych i wyraźnie podkreślonych w pracy zmian systemowych, duże znaczenie mają również działania skoncentrowane na pojedynczych użytkownikach dróg. Należy podkreślić, iż zachowania kierowców mają realny wpływ na otoczenie. Z tego powodu kształtowanie ich zachowań ma ogromne znaczenie w kontekście emisji CO₂. Ważną rolę w tym kontekście pełni również świadomość kierowców i potencjał kształtowania ich proekologicznych nawyków. Jednak docelowa skuteczność wszystkich działań dążących do minimalizacji emisji CO₂ zależy od dostępności narzędzi zdolnych do wspomagania kierowców w zakresie ekologicznej jazdy. Dostępne zalecenia w tym zakresie są bardzo ogólnikowe, np. utrzymywanie stałej prędkości, unikanie nagłych przyspieszeń i hamowań czy wcześniejsze planowanie tras przejazdów. Brakuje precyzyjniejszych badań, odpowiadających na pytanie, jak należy prowadzić dany pojazd samochodowy, aby emisja CO₂ była jak najmniejsza.

Wobec wymienionych wyzwań, badania nad kształtowaniem poziomu emisji CO₂ pojazdu osobowego, na poziomie pojedynczego uczestnika ruchu drogowego, są konieczne i zasadne.

W rozprawie został podjęty aktualny i ważny z naukowego oraz praktycznego punktu widzenia problem monitorowania oraz emisji CO₂ w pojazdach osobowych. Zastosowanie interfejsów diagnostycznych OBD umożliwia pozyskanie szczegółowych informacji dotyczących parametrów pracy silnika pojazdu osobowego oraz wartości emisji CO₂ w czasie rzeczywistym. Stanowi to fundament prowadzonych w dysertacji rozważań. Z kolei zastosowanie modelowania matematycznego, a dokładnie regresji wieloczynnikowej oraz regresyjnych drzew decyzyjnych, pozwoliło na udzielenie odpowiedzi na postawiony w pracy problem badawczy. Warto przy tym pokreślić uniwersalność proponowanej koncepcji wykorzystania pokładowych systemów diagnostycznych, pozwalające na zastosowanie opracowanych rozwiązań również w innych typach pojazdów. Z tego powodu prezentowane badania mają dużą wartość poznawczą.

Praca Doktorantki łączy wiedzę z zakresu transportu, szczególnie eksploatacji silników spalinowych z analizą statystyczną oraz modelowaniem matematycznym. Wybór metod modelowania tj. regresja wieloraka oraz drzewa decyzyjne jest uzasadniony i dobrze wpisuje się w najnowsze trendy badań. Wyniki badań prezentowanych w rozprawie przedstawiają duży potencjał do ich dalszego rozwinięcia lub wykorzystania w celach wdrożeniowych.

Reasumując stwierdzam, że temat recenzowanej rozprawy doktorskiej jest aktualny i odpowiadający na zapotrzebowanie w dziedzinie transportu. Ponadto dobrze wpisuje się w obecne trendy związane z jego zrównoważonym rozwojem. Podjęty przez Doktorantkę problem badawczy jest jak najbardziej uzasadniony, a sformułowanie tematu właściwe.

2. CHARAKTERYSTYKA I OCENA ROZPRAWY

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Magdaleny Rykały liczy 168 stron i składa się z 6 głównych rozdziałów o rozbudowanej strukturze, składającej się łącznie z 23 podrozdziałów, poprzedzonych spisem treści, streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz wykazem ważniejszych skrótów i oznaczeń. Ponadto w pracy zawarte jest 65 rysunków i 46 tabel, a także spis bibliografii, zawierający 130 pozycji literaturowych i opracowań, w tym 62 pozycje literaturowe zagraniczne. Spośród nich znaczna większość została napisana w języku angielskim.

Autorka przeprowadziła analizę stanu zagadnienia problematyki emisji CO₂ z pojazdów osobowych w odniesieniu do dostępnych badań. Omówiła rodzaje gazów cieplarnianych, wyjaśniła ich wpływ na środowisko naturalne w kontekście postępujących zmian klimatu i w jaki sposób tematyka związana z gazami cieplarnianymi, a zwłaszcza z CO₂, wpisuje się w obecne cele polityki klimatycznej, kształtowanej przez UE. Określiła również aktualne wymagania dotyczące emisji CO₂ w krajach UE, ze szczególnym uwzględnieniem Polski. Ponadto Autorka wskazała obszary tematyczne dotyczące emisji CO₂ w kontekście pojazdów samochodowych z silnikami spalinowymi. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury stwierdziła, że najbardziej znaczącymi czynnikami w kontekście modelowania emisyjności pojazdów samochodach są: styl jazdy kierowców, zużycie paliwa oraz systemy diagnostyczne.

W konsekwencji swoich rozważań Autorka sformułowała problem badawczy (pytanie badawcze): „**W jaki sposób można wpływać na emisję dwutlenku węgla z pojazdów osobowych na poziomie pojedynczego użytkownika?**”.

Dla jego odpowiedzi określiła problemy cząstkowe:

1. Jakie mierzalne i sterowalne na poziomie użytkownika pojazdu osobowego czynniki mają największy wpływ na poziom emisji CO₂?

2. W jaki sposób wbudowane systemy diagnostyczne w pojeździe mogą wspierać monitorowanie emisji CO₂ i jakie mają znaczenie dla modelowania parametrów eksploatacyjnych pojazdów?
3. Jakie praktyczne rekomendacje wynikają z uzyskanych modeli dla pojedynczego użytkownika ruchu oraz strategii obniżenia emisji gazów cieplarnianych w kontekście zrównoważonego rozwoju?

Głównym celem rozprawy było **opracowanie modelu oceny kształtowania poziomu emisji CO₂ na podstawie informacji pozyskanych z interfejsów diagnostycznych**.

Sformułowana została także teza badawcza zakładająca, że **możliwe jest opracowanie modelu matematycznego kształtowania poziomu emisji CO₂ z wykorzystaniem dostępnych w pojeździe osobowym systemów dla pojedynczego użytkownika**.

Dla jej zweryfikowania zrealizowano cele szczegółowe, takie jak:

1. Określenie mierzalnych i sterowalnych czynników mających wpływ na poziom emisji CO₂ na poziomie użytkownika pojazdu samochodowego oraz ich analiza.
2. Zbadanie roli systemów diagnostycznych w monitorowaniu i analizie emisji CO₂ oraz opracowanie modeli emisji CO₂ w odniesieniu do poszczególnych trybów jazdy z wykorzystaniem interfejsu OBD wraz z określeniem wpływu wybranych parametrów eksploatacyjnych pojazdu na wyznaczanie poziomu emisji CO₂.
3. Opracowanie rekomendacji dla pojedynczego użytkownika ruchu oraz wytycznych redukcji gazów cieplarnianych w odniesieniu do strategii zrównoważonego rozwoju.

Następny rozdział dotyczył metodyki przeprowadzonych badań, przedstawiono teoretyczne aspekty modelowania, a także je opisano z uwzględnieniem występujących w nich zjawisk fizycznych oraz stanowiących ich podstawę zależności matematycznych. Na podstawie opisanych wejść i wyjść modelu Autorka prezentuje opracowany algorytm planowanych badań wraz z wyszczególnieniem stosowanych metod badawczych. Opisano teoretycznie wybrane metody modelowania emisji CO₂ wykorzystane w dysertacji, tj. regresji wieloczynnikowej oraz regresyjnych drzew decyzyjnych.

Kolejny rozdział dotyczy modelowania emisji CO₂ z pojazdu osobowego do środowiska. Po wstępnej analizie danych, podzielono obserwacje na trzy jednorodne grupy obserwacji, wykorzystując w tym celu analizę skupień (metodę k-średnich). W ten sposób wyodrębniono podgrupy związane z pracą silnika podczas ruszania pojazdu i jazdy z małymi prędkościami (tryb ruszania pojazdu), podczas jazdy miejskiej oraz pozamiejskiej. Następnie skonstruowano modele regresji wieloczynnikowej, dokonując ich oceny i porównania. Ponadto stwierdzono, że niezależnie od trybu jazdy, każdorazowy wzrost prędkości jazdy powoduje zmniejszenie emisji CO₂ do środowiska. Dla oceny wpływu wytypowanych czynników na emisję CO₂ Autorka stosuje modele drzew decyzyjnych z wykorzystaniem algorytmu CART, model lasu losowego oraz drzew wzmacnianych. Na podstawie rankingu predyktorów zauważono, że największy wpływ na emisję CO₂ w trybie ruszania oraz w trybie miejskim ma prędkość pojazdu oraz względne obciążenie silnika.

W zakończeniu pracy Autorka przedstawiła podsumowanie z przeprowadzonych badań oraz sformułowała wnioski końcowe, a także określiła kierunki dalszych badań.

Osiągnięcia pracy:

Najważniejszym osiągnięciem Autorki było zastosowanie wybranych metod modelowania matematycznego w celu modelowania emisji CO₂ z wykorzystaniem danych pochodzących z powszechnie stosowanych w pojazdach osobowych systemów diagnostyki pokładowej. Omawiane podejście łączy aspekty teoretyczne w postaci zastosowania metod statystyki w modelowaniu matematycznym emisji CO₂ z aspektami praktycznymi dotyczącymi pracy silników spalinowych oraz układów występujących w pojazdach

samochodowych. Zastosowanie różnych modeli pozwala uznać, że jest to kompleksowe podejście, łączące klasyczne metody analityczne z nowoczesnymi technikami uczenia maszynowego. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie bardziej precyzyjnych i zróżnicowanych wniosków dotyczących zależności między czynnikami a poziomem emisji. Zastosowanie różnych modeli pozwala także na ocenę ich skuteczności i wybór najlepszego rozwiązania dla analizowanego problemu.

A ponadto:

1. Wobec powyższego, kluczowe znaczenie ma monitorowanie oraz analiza emisji CO₂ w pojazdach osobowych. Zastosowanie interfejsów diagnostycznych OBD umożliwia pozyskanie szczegółowych informacji dotyczących parametrów pracy silnika pojazdu osobowego oraz wartości emisji CO₂ w czasie rzeczywistym. Stanowi to fundament prowadzonych w dysertacji rozważań. Z kolei zastosowanie modelowania matematycznego, a dokładnie regresji wieloczynnikowej oraz regresyjnych drzew decyzyjnych, pozwoliło na udzielenie odpowiedzi na postawiony w pracy problem badawczy. Warto przy tym pokreślić uniwersalność proponowanej koncepcji wykorzystania pokładowych systemów diagnostycznych, pozwalające na zastawianie opracowanych rozwiązań również w innych typach pojazdów. Z tego powodu prezentowane badania mają dużą wartość poznawczą.
2. Sformalizowanie zagadnień związanych z modelowaniem emisji CO₂.
3. Kompleksowa analiza procesów wpływających na wielkość emisji CO₂ z transportu drogowego.

W ramach analizy szczegółowej pracy dostrzeżono jej następujące wady:

Pewnym mankamentem rozprawy jest ograniczenie zakresu badań do jednego pojazdu, co może wpływać na ogólną reprezentatywność uzyskanych wyników. Badanie pojedynczego egzemplarza nie pozwala na uwzględnienie zmienności wynikającej z różnic w konstrukcji, stanie technicznym czy sposobie eksploatacji innych pojazdów. W konsekwencji, wnioski wyciągnięte na podstawie analizowanego przypadku mogą nie być w pełni uogólnione na szerszą populację pojazdów o podobnych parametrach. Zastosowanie większej liczby pojazdów pozwoliłoby na bardziej kompleksową ocenę wpływu różnych czynników na emisję CO₂ oraz zwiększyłoby wiarygodność wyników. Ponadto, różnorodność badanych egzemplarzy umożliwiłaby identyfikację ewentualnych odchyłeń i anomalii, które mogłyby wpłynąć na interpretację uzyskanych danych. Niemniej jednak, zastosowanie jednego pojazdu pozwoliło na przeprowadzenie szczegółowej analizy emisji w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych i stanowi solidną podstawę do dalszych badań. W przyszłości warto rozszerzyć zakres badań, aby uwzględnić większą liczbę pojazdów i tym samym zwiększyć wartość poznawczą pracy.

W zaproponowanych modelach wartości emisji CO₂ dodatkowo pomnożyłbym przez współczynnik Conformity Factor (CF) dla danej technologii emisyjnej pojazdów. Współczynnik CF wykorzystuje się podczas badań homologacyjnych w testach w rzeczywistej eksploatacji pojazdów, tzw. RDE (Real Driving Emissions).

Ponadto zastosowanie złożonych zarówno pod względem interpretacji wyników, jak i wymagań obliczeniowych modeli opartych na uczeniu maszynowym, takich jak lasy losowe czy drzewa wzmocnione może utrudniać jednoznaczne wyjaśnienie wpływu poszczególnych czynników na emisję CO₂, szczególnie w przypadku dużej liczby zmiennych zależnych. Dodatkowo, wykorzystanie wielu metod analitycznych może prowadzić do rozbieżnych wyników, co wymaga dodatkowej analizy w celu wyboru najbardziej wiarygodnego modelu.

Pozostałe uwagi:

1. Znaczna objętość dysertacji, wynikająca m.in. z „podręcznikowego” charakteru niektórych rozdziałów (rozdział 2 i częściowo 4).
2. Sugerowałbym odrębną numerację rysunków i tabel w poszczególnych rozdziałach, np. w trzecim: Rys. 3.1; Rys. 3.2 itd.; Tabela 3.1; 3.2 itd.; oraz prostszy zapis cytowanej literatury zamiast [6], [28], [34], [121] na → [6, 28, 34, 121].
3. Brak konsekwencji w stosowaniu jednostek układu SI, np. tona.
4. Mimo starannego zredagowania rozdziału 6 pt.: „Zakończenie”, sugerowałbym bardziej przejrzyste zakończenie tej pracy przez dodanie syntetycznych wniosków w następującej konfiguracji:
 - wnioski ogólne (czy zrealizowano cele pracy i czy udowodniono tezy),
 - wnioski szczegółowe,
 - wnioski metodyczne,
 - wnioski utylitarne,
 - wnioski perspektywiczne (kierunki dalszych badań).

Mimo tych uwag krytycznych, niektórych dyskusyjnych, wysoko oceniam poziom merytoryczny rozprawy, zarówno ze względu na intelektualny wkład Autorki, jak i na zakres włożonej przez Nią pracy. Na podkreślenie zasługuje oryginalne i twórcze podejście do modelowania emisji CO₂ wprowadzanych przez motoryzację do środowiska naturalnego. Kandydatka posiada wysokie umiejętności budowania matematycznych modeli w celu modelowania emisji CO₂, z wykorzystaniem danych pochodzących z powszechnie stosowanych w pojazdach osobowych systemów diagnostyki pokładowej. Cechuje Ją przy tym wyjątkowa dokładność w stosowaniu sformalizowanego ich opisu. Zastosowana metodyka i otrzymane wnioski stanowią w znacznej części oryginalny wkład Autorki.

Reasumując, wszystkie wymienione tutaj elementy pracy stanowią o jej dużej wartości merytorycznej, a zwłaszcza na uwagę zasługują następujące elementy pracy:

- uzasadnienie podjęcia tematu, które wynika z wnikliwej analizy stanu wiedzy,
- precyzyjne zdefiniowanie przedmiotu badań i celu rozprawy,
- wysoki poziom merytoryczny pracy i profesjonalne podejście do rozważanej tematyki,
- konsekwencja w definiowaniu pojęć naukowych i duży nacisk na poprawne i jednoznaczne stosowanie terminów i określeń naukowych z szeroko pojętego obszaru modelowania emisji CO₂ z pojazdu samochodowego,
- umiejętność korzystania z literatury specjalistycznej, w tym pozycji literatury światowej,
- dbałość o poziom merytoryczny i edytorski pracy,
- przejrzysta i logicznie ułożona struktura pracy oraz jej cel i zakres.

Autorka w dysertacji podjęła się bardzo trudnego i ambitnego zadania, które z oczywistych względów nie wyczerpuje całości zagadnień związanych z modelowaniem emisji CO₂ z pojazdu samochodowego. Liczba czynników wpływających na te zjawiska jest znaczna, co bardzo komplikuje zagadnienie. Trudne jest zdecydowane wydzielenie wpływu jednego czynnika, ponieważ należy liczyć się z interakcją innych. Należy przy tym zaznaczyć, że obecny stan wiedzy o niektórych czynnikach jest niewystarczający do pełnego ustalenia ich wpływu, stąd też tylko wybrane czynniki należy brać pod uwagę, dając możliwość uzupełnienia ich w dalszej pracy badawczej. Wynika z tego konieczność dalszych badań i analiz, które pozwolą w sposób jednoznaczny określić przydatność zaproponowanej procedury modelowania emisji CO₂ z zastosowaniem regresji wielorakiej oraz drzew decyzyjnych w trzech charakterystycznych trybach: podczas ruszania pojazdu, w trybie jazdy miejskiej oraz pozamiejskiej.

3. PODSUMOWANIE

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

- Autorka dokonała wyjątkowo trafnego wyboru tematyki swojej pracy, a jej zakres spełnia stawiane wymagania, określone dla rozpraw doktorskich,
- zasadnicze cele pracy zostały w pełni osiągnięte w zakresie przyjętym przez Doktorantkę, bowiem uzasadnione zostały twierdzenia Autorki ujęte w tezie pracy, a prezentowane wyniki są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych studiach i eksperymentach własnych i mogą służyć do dalszych prac,
- formalny układ pracy jest prawidłowy,
- dysertacja dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy i praktyki, a w niektórych elementach wnosi do nich nowe treści,
- znaczna akumulacja należycie ustalonych faktów sprawia, że zostało spełnione kryterium logicznej poprawności pracy.

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

Stwierdzam zatem, że praca mgr inż. Magdaleny Rykały pt.: „Badanie emisji CO₂ pojazdu osobowego na wybranym przykładzie z zastosowaniem metod matematycznych” (promotor: plk dr hab. inż. Anna Borucka, prof. WAT; promotor pomocniczy: pplk dr inż. Małgorzata Grzelak) spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w myśl Ustawy z dnia 20 lipca 2018 – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r., poz. 85 z późn. zm.) i stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej, Geodezji i Transportu o przyjęcie rozprawy i o dopuszczenie Autorki do publicznej obrony.