

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

**RECENZJA**  
Rozprawy doktorskiej  
**Mgr inż. Katarzyny STRZAŁKOWSKIEJ pt.**

**„MODELOWANIE EMISJI FRAKCJI WYMIAROWYCH CZĄSTEK STAŁYCH DO  
CELÓW OCENY ODDZIAŁYWANIA ZANIECZYSZCZEŃ ZE ŹRÓDEŁ  
MOTORYZACYJNYCH NA ŚRODOWISKO”**

Promotor: Prof. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek

**Podstawa opracowania recenzji:**

**Pismo Prodziekana doc. dra hab. inż. ANDRZEJA WĄSIEWSKIEGO o decyzji Rady Dyscypliny „Inżynieria Mechaniczna” Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej z dnia 22.07.2020 r., do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.**

**WYBÓR TEMATYKI ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Strzałkowskiej dotyczy niezwykle ważnych zagadnień związanych z modelowaniem emisji cząstek stałych emitowanych do środowiska ze źródeł motoryzacyjnych. Z naukowego i praktycznego punktu widzenia jest to aktualny i ważny problem badawczy, którego rozwiązanie może mieć istotny wpływ na zmniejszenie skutków emisji toksycznych składników spalin pochodzących z transportu, a także na dalszy rozwój źródeł napędu pojazdów. Jednocześnie jest to bardzo trudne zadanie do rozwiązania z uwagi na bardzo dużą liczbę niezależnych czynników wpływających na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń komunikacyjnych w środowisku, znacząco utrudniających interpretację wyników bezpośrednich pomiarów. Wymaga to dużego doświadczenia badawczego oraz znajomości teoretycznych podstaw procesu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, jak również znajomości technik pomiarowych oraz zasad modelowania. Podjęta tematyka dysertacji, dotycząca modelowania emisji nie jest wprawdzie nowa, ale zaprezentowana przez Autorkę koncepcja matematycznego powiązania wskaźników emisji gazowych składników spalin pochodzących ze środków transportu ze wskaźnikami emisji cząstek stałych jest bardzo ciekawa i oryginalna. Istotne jest tu także podjęcie próby modelowania emisji poszczególnych frakcji wymiarowych cząstek stałych. Na szczególną uwagę zasługuje uwzględnienie najmniejszej frakcji wymiarowej PM1, która w emisji motoryzacyjnej jest wyjątkowo liczna i stwarza największe problemy zarówno natury pomiarowej, jak i w oddziaływaniu na środowisko. Prace naukowe w tym obszarze wiedzy zasługują na duże uznanie, zwłaszcza, że poruszane zagadnienia wymagały gruntownej wiedzy interdyscyplinarnej z zakresu różnych obszarów nauk podstawowych.

Niezależnie od faktu, że zakres pracy przedstawiony w dysertacji obejmuje etap badań podstawowych w zakresie modelowania, stanowi on istotny krok w kierunku pogłębiania wiedzy na temat procesów rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w środowisku. Mając to na

uwadze należy uznać, że tematyka podjęta przez Autorkę pracy jest w pełni uzasadniona pod względem poznawczym i wnosi nowe wartości naukowe, na które istnieje duże zapotrzebowanie praktyczne.

## **TYTUŁ I UKŁAD TREŚCI ROZPRAWY**

Tytuł rozprawy: „Modelowanie emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych do celów oceny oddziaływania zanieczyszczeń ze źródeł motoryzacyjnych na środowisko” oddaje jej treść i jest zrozumiały nie tylko dla specjalistów. Jest to obszerne dzieło wydane w formie monografii, liczące łącznie 242 strony wraz z rysunkami, tabelami wzorami i fotografiami. Integralną częścią pracy jest załącznik pt.: „Identyfikacja emisji cząstek stałych PM10 i PM2.5” zapisany na nośniku elektronicznym, który liczy 326 stron i zawiera bazę danych wykorzystanych w rozprawie.

Zasadnicza treść rozprawy licząca ok. 190 stron jest zawarta w jedenastu rozdziałach. Kolejność poszczególnych rozdziałów należy uznać za prawidłową, a dobór ich treści wskazuje na znajomość oraz stosowanie przez Autorkę wiedzy z zakresu metodyki i planowania badań naukowych. Na dziewięciu stronach podano spis literatury wykorzystywanej w pracy, który obejmuje 118 pozycji, w tym 89 pozycji wydawniczych i 29 pozycji ze źródeł internetowych. Na pozostałych stronach umieszczono wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń, a także streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis tabel i rysunków.

Styl rozprawy jest poprawny, treść pracy jest dobrze zilustrowana rysunkami, a stosowana terminologia jest prawidłowa i nie budzi zastrzeżeń. Praca nawiązuje do aktualnych pozycji literatury, głównie krajowej i europejskiej pochodzącej z ostatnich kilku lat. Na podkreślenie zasługuje tu bardzo duża staranność w wykonaniu rysunków umieszczonych w pracy, zarówno w zakresie użytych metod graficznych, jak i opisów.

Opis stanu wiedzy związanej z postawionym problemem badawczym zajmuje ok. 20 stron, tj. ok. 10% zasadniczej treści rozprawy. Przedstawiono w nim wiedzę ogólną na temat emisji cząstek stałych do środowiska oraz stan prawny i dotychczasowe dokonania w zakresie najnowszych metod modelowania. W tej części pracy wskazano obszary, które wymagają dalszych badań naukowych oraz przedstawiono wnioski uzasadniające podjęcie tematu rozprawy. Ponadto wyjaśniono specjalistyczną terminologię stosowaną w pracy oraz zdefiniowano niektóre z wprowadzonych pojęć. W oddzielnym rozdziale sformułowano tezy oraz naukowy cel badawczy i zakres pracy. Przedstawiono sposób analizy postawionego problemu badawczego oraz plan przewidzianych badań i analiz. W rozdziałach 6 do 8 przedstawiono koncepcję i sposób przeprowadzenia prac nad modelowaniem emisji cząstek stałych oraz metodykę i sposób analizy wyników badań. W rozdziale 9 przeprowadzono analizę prac badawczych, wykonanych przez Autorkę na terenie aglomeracji warszawskiej, dotyczących wpływu emisji motoryzacyjnej na imisję cząstek stałych. Zasadniczą część prac modelowych zawarta jest w rozdziale 10, gdzie Autorka zaprezentowała przyjętą metodykę badań oraz przeprowadziła badania modelowe imisji poszczególnych frakcji cząstek stałych, na podstawie danych ze stacji monitoringu powietrza. W odniesieniu do badania imisji cząstek PM10 były to dane ze stacji działających w Bydgoszczy, Łodzi i Częstochowie, a w odniesieniu do cząstek PM2,5 dane ze stacji w Bydgoszczy, Warszawie i Krakowie. W rozdziale jedenastym zaprezentowano ostateczną interpretację otrzymanych wyników badań doświadczalnych i modelowych oraz sformułowano podstawowe wnioski płynące z przeprowadzonych prac. Wskazano także kierunek dalszych badań, które mogą stanowić kontynuację prac przedstawionych w rozprawie.

## **TEZA, CEL, ZAKRES ORAZ SPOSÓB REALIZACJI PRACY**

Postawiony przez Autorkę naukowy problem badawczy, sprowadza się do opracowania metodyki oceny emisji cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych na podstawie wartości emisji tlenku węgla i tlenków azotu. Ocena ta ma pozwolić także na ocenę frakcji wymiarowych cząstek stałych. Zaproponowana metodyka opiera się wykorzystaniu dostępnych danych (np. ze stacji monitoringu) wartości natężenia emisji zanieczyszczeń gazowych pochodzących z pojazdów i modeli ich rozprzestrzeniania się w środowisku. Na tej podstawie można wyznaczyć imisję tych zanieczyszczeń, co z kolei pozwala pośrednią ocenę emisji cząstek stałych.

Na tej podstawie postawiono główne tezy pracy, które dotyczą sposobu oceny emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych na podstawie korelacji pomiędzy imisją poszczególnych frakcji wymiarowych cząstek stałych oraz imisji tlenku węgla i tlenków azotu

Główne zadania zostały wykonane z zastosowaniem przemyślanego warsztatu badawczego obejmującego przede wszystkim złożony aparat matematyczny, pozwalający na opis istniejących korelacji pomiędzy analizowanymi wielkościami fizycznymi. W pracy zawarta jest też część eksperymentalna, dotycząca badań emisji i imisji zanieczyszczeń komunikacyjnych, których zakres pozwolił na wstępną weryfikację postawionej tezy.

Wymienione składniki stanowią spójną procedurę zgodną z metodycznymi podstawami prowadzenia badań naukowych, a wykorzystanie różnych narzędzi badawczych oraz wiedzy z różnych obszarów nauki świadczy o zdolności Autorki pracy do samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Tego typu podejście stanowi obecnie rzadkość, ponieważ większość rozpraw doktorskich, realizowanych w ostatnich latach w obszarze wiedzy związanej z techniką realizuje zwykle konkretny cel użyteczny, a prowadzone badania mają charakter badań aplikacyjnych. W tym zakresie przyjęty przez Autorkę rozprawy sposób rozwiązania problemu naukowego jest wyjątkowy i świadczy o dojrzałości badawczej.

## **OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY**

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Katarzyny Strzałkowskiej jest bardzo wartościowa merytorycznie, ze względu na poruszone ważne kwestie zarówno z zakresu eksploatacji maszyn cieplnych, jak i ochrony środowiska. Są to złożone zagadnienia dotyczące teorii silników spalinowych, związane z procesem spalania i tworzeniem się toksycznych składników spalin, jak i problemem emisji i oddziaływania spalin na środowisku. Podczas realizacji postawionego celu naukowego Autorka pracy poruszyła dwa złożone problemy poznawcze, z których pierwszy dotyczy fizycznego rozpoznania mechaniki tworzenia, rozprzestrzeniania się i wnikania toksycznych składników spalin do środowiska, a drugi opracowania aparatu matematycznego, pozwalającego na modelowanie wymienionych zjawisk. Należy tu podkreślić, że zjawiska te obarczone są dużą liczbą niezależnych czynników zakłócających, uniemożliwiając stosowanie prostych i powtarzalnych zależności. W związku z tym do ich analizy wymagana jest nie tylko dobra znajomość praw statystycznych, ale także dobre przygotowanie teoretyczne, wspomagane intuicją i doświadczeniem badawczym. Niezbędna była także umiejętność posługiwania się nowoczesnymi narzędziami inżynierskimi, takimi jak wyspecjalizowane oprogramowanie komputerowe oraz znajomość współczesnych technik symulacyjnych, które to składniki były niezbędne do realizacji postawionych celów naukowych. Uzupełnieniem kompetencji Autorki rozprawy była także znajomość podstaw metodyki badań naukowych, co niewątpliwie przyczyniło się do skrócenia cyklu analiz teoretycznych i badań doświadczalnych oraz umożliwiło wyciągnięcie prawidłowych wniosków.

Dużą, merytoryczną wartością pracy składającą się na dorobek Doktorantki jest zaproponowanie koncepcji modelowania emisji dla rozpatrywanych frakcji wymiarowych cząstek stałych oraz przedstawienie dla nich propozycji modeli emisji. Ta część pracy, zawarta w rozdziałach 6 i 7, jest kluczowa z punktu widzenia postawionego celu badawczego i wymagała dobrego przygotowania teoretycznego oraz dużego doświadczenia badawczego. Podobnie cenne są wyniki przeprowadzonych analiz zawarte w rozdziale 8, oparte na badaniach zależności pomiędzy emisją komunikacyjną, a emisją poszczególnych składników spalin, na wybranych odcinkach sieci drogowej. Kontynuacją tych badań były samodzielnie przeprowadzone badania doświadczalne opisane w rozdziale 9. Ta część pracy pozwoliła na wstępną weryfikację opracowanych algorytmów obliczeniowych i naukowej analizy związków istniejących pomiędzy emisją poszczególnych składników toksycznych spalin pochodzących ze środków transportu, a emisją tych związków, mierzoną przez stacje monitoringu powietrza.

Przeprowadzenie samodzielnej analizy wyników tych badań i umiejętność ich świadomego używania w pracach nad budową modelu matematycznego opisującego analizowane zjawiska świadczy o dojrzałości naukowej Doktorantki. W dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn wymienione metody analizy technicznej można zaliczyć do grupy niestandardowych technik prowadzenia badań naukowych. Realizacja poszczególnych etapów pracy dowodzi, że zaproponowana przez Doktoranta procedura postępowania przy rozwiązaniu postawionego celu badawczego została oparta o zasady zgodne z metodycznymi podstawami prowadzenia badań naukowych

Zasadnicze badania modelowe, oparte na koncepcji zaproponowanej przez Doktorantkę, przeprowadzono w oparciu o wyniki pomiarów zarejestrowanych w miejskich stacjach monitoringu powietrza znajdujących się w Bydgoszczy, Częstochowie, Krakowie, Łodzi i Warszawie. Wybór ten podyktowany był możliwością dostępu do danych pochodzących zarówno ze stacji nadzorujących emisję komunikacyjną, jak i stacji nadzorujących miejskie tło emisyjne. Korzystano ze zbiorów danych dotyczących badań dziennych, tygodniowych i rocznych. W celu uzyskania pożądanej dokładności wyników modelowania do obróbki danych wykorzystywano specjalistyczne narzędzia statystyczne np. uzupełnianie brakujących danych metodą interpolacji, czy też filtrację danych, tj. usuwanie szumów o dużych częstotliwościach za pomocą nierekurencyjnego filtra I i II rzędu.

Standardowe obliczenia numeryczne pozwalały na wykonanie wykresów przedstawiających: przebiegi emisji cząstek stałych i tlenków azotu, przebiegi emisji cząstek stałych i tlenku węgla, zależność korelacyjną emisji cząstek stałych i tlenków azotu, zależność korelacyjną emisji cząstek stałych i tlenku węgla i emisję cząstek stałych jako funkcję emisji tlenków azotu oraz tlenku węgla.

Przeprowadzono także badania symulacyjne emisji cząstek stałych PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> z wykorzystaniem sześciu opracowanych modeli (M1 ÷ M6), opisanych w rozdziale 7. Współczynniki tych modeli wyznaczono przy wykorzystaniu programu MS Excel oraz StatSoft Statistica. Wyniki modelowania pozwoliły na obliczenie odpowiednich współczynników korelacji.

W podsumowaniu przeprowadzonych analiz i badań należy stwierdzić, że uzyskane wyniki badań symulacyjnych potwierdziły przydatność, opracowanej przez Autorkę rozprawy, metodyki oceny emisji cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych z wykorzystaniem modeli emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych. W ramach prac zaproponowano i zidentyfikowano modele emisji cząstek stałych i tym samym wykonano zaplanowany zakres badań. Potwierdzono tezy pracy oraz wykazano skuteczności opracowanych modeli emisji cząstek stałych.

Cenną wiedzą jest także doświadczenie pozyskane przez Autorkę pracy, wskazujące kierunek dalszych badań. Wnioski w tym zakresie wskazują, że przeprowadzenie znacznie

większej liczby badań dotyczących zarówno jakości powietrza, jak i aktualnego natężenia ruchu drogowego, uwzględnienie aktualnych warunków atmosferycznych oraz oddziaływanie tła zanieczyszczeń pochodzących z innych źródeł niż ruch drogowy, mogą się stać podstawą do wyznaczenia bardziej uniwersalnych współczynników modelowania emisji cząstek stałych.

Uważam, że największa wartość prac analitycznych, badawczych i symulacyjnych przedstawionych w recenzowanej rozprawie dotyczy:

- Podjęcia próby stworzenia nowej koncepcji modelowania emisji cząstek stałych pochodzących z transportu z uwzględnieniem ich frakcji wymiarowych,
- Uporządkowania pojęć i nomenklatury stosowanych w pracach dotyczących modelowania emisji toksycznych składników spalin,
- Zebrania i uporządkowania aktów prawnych dotyczących emisji cząstek stałych,
- Zebrania wiedzy dotyczącej stosowanych metod modelowania emisji cząstek stałych,
- Opracowania modeli emisji cząstek stałych dla analizowanych frakcji wymiarowych,
- Przeprowadzenia badań doświadczalnych służących do wstępnej weryfikacji zaproponowanego modelu,
- Przeprowadzenia syntetycznej analizy i weryfikacji naukowej ogromnego materiału badawczego, liczącego kilkaset stron,
- Opracowania metodyki przygotowania danych ze stacji monitoringu powietrza do użycia w modelach matematycznych,
- Opracowania modelu emisji cząstek stałych, uwzględniającego ich frakcje wymiarowe, w którym mogą być wykorzystane standardowe dane pochodzące ze stacji monitoringu powietrza,
- Przeprowadzenia badań symulacyjnych, których wyniki potwierdziły postawione tezy,
- Sformułowania wniosków z przeprowadzonych prac badawczych i modelowych, których wartość merytoryczna ma istotne znaczenie w planowaniu dalszych działań dotyczących modelowania emisji.

Jak już podkreślono we wstępie recenzji, w rozprawie poruszono wiele różnych zagadnień dotyczących wiedzy związanej z emisją toksycznych składników spalin oraz związanej z modelowaniem złożonych zjawisk fizycznych. Wymagało to od Doktorantki zarówno gruntownej wiedzy z obszaru nauk podstawowych, jak i znajomości zagadnień specjalistycznych. Do realizacji programu badań użyto nowoczesnego aparatu badawczego, wymagającego dobrego przygotowania inżynierskiego i naukowego z zakresu wielu dyscyplin naukowych, jak również połączenia wielu metod badawczych o zakresie interdyscyplinarnym. Na podkreślenie zasługuje duża wiedza i doświadczenie Doktorantki w zakresie stosowania złożonych procedur matematycznych, głównie z zakresu statystyki, służących do analizy i obróbki danych, pochodzących z ogromnego materiału badawczego. Dotyczy to także wiedzy z zakresu obsługi specjalistycznych programów obliczeniowych.

Wszystkie wymienione powyżej elementy rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Katarzyny Strzałkowskiej, stanowią o jej dużej wartości merytorycznej, a na podkreślenie zasługuje pionierski oraz interdyscyplinarny charakter prowadzonych badań analitycznych i modelowych. Z tych względów przedstawioną rozprawę należy uznać za oryginalny dorobek naukowy Doktorantki, stanowiący istotny wkład w dziedzinę nauki dotyczącej dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn (obecnie inżynieria mechaniczna).

Analizując treść rozprawy nasuwają się pewne uwagi, które jednak w żaden sposób nie umniejszają jej pozytywnej wartości merytorycznej. Przykład stanowić może umieszczenie analiz emisji oraz imisji poszczególnych frakcji wymiarowych cząstek stałych w dwóch oddzielnych, krótkich rozdziałach 6 i 7, natomiast równie krótki materiał badawczy dotyczący tego tematu umieszczono w oddzielnym rozdziale 8. Ponieważ treść wymienionych

rozdziałów jest ze sobą spójna i często zależna od siebie, proponowałbym połączenie ich w jeden rozdział o odpowiednio rozłożonej narracji.

W podsumowaniu pracy stwierdzono, że nie udało się wyznaczyć uniwersalnych współczynników pozwalających na jednoznaczną ocenę wpływu źródeł motoryzacyjnych na wartości emisji cząstek stałych w powietrzu, to jednak ogromny materiał badawczy zawarty w pracy daje przesłanki do opracowania tego typu współczynników. Z tego powodu już na obecnym etapie realizacji tematu ze wszech miar byłoby wskazane opisanie sposobu praktycznego wykorzystania zawartej wiedzy, jako narzędzia diagnostycznego służącego do oceny stanu środowiska.

W pracy zauważono nieliczne usterki o charakterze redakcyjnym lub drobne usterki o charakterze pomyłek literowych, które nie mają wpływu na wysoką ocenę merytoryczną rozprawy.

## WNIOSKI KOŃCOWE

Recenzowana praca doktorska autorstwa **Pani mgr inż. Katarzyny Strzałkowskiej** dotyczy bardzo aktualnego problemu badawczego związanego z emisją do środowiska cząstek stałych pochodzących ze środków transportu. Opracowana koncepcja modelowania emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych, która powstała na podstawie analizy ogromnego materiału badawczego, nosi w sobie cechy nowości i może znaleźć praktyczne zastosowanie do oceny stanu środowiska. W omawianej dziedzinie praca zawiera ponadto istotne wartości naukowe związane z ważnym problemem dotyczącym wpływu działalności człowieka na środowisko, a uzyskane wyniki rozważań i badań mają dużą wartość dla praktyki technicznej. Stanowi to oryginalny dorobek naukowy Doktorantki.

Uważam, że recenzowana praca doktorska pt.: „Modelowanie emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych do celów oceny oddziaływania zanieczyszczeń ze źródeł motoryzacyjnych na środowisko”, której autorem jest **Pani mgr inż. Katarzyna Strzałkowska** spełnia warunki stawiane dysertacjom doktorskim zgodnie z wymaganiami obowiązującej w tym zakresie „**Ustawy o stopniach i tytule naukowym**” (Ustawa z dnia 14 marca 2003 r.) ze zmianami z dnia 18.03.2011 r.

Rozprawa ta może być dopuszczona do publicznej obrony i stanowić podstawę do nadania **Pani mgr inż. Katarzynie Strzałkowskiej** stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, a obecnie inżynieria mechaniczna.

Biorąc pod uwagę dużą wartość merytoryczną recenzowanej dysertacji, która powstała na podstawie analizy ogromnego materiału badawczego, jak również wysoko ocenione nowoczesne metody rozwiązywania złożonych problemów naukowych, składam **wniosek o wyróżnienie pracy**.

Kraków, dnia 8. 09. 2020 r.

