

**POLITECHNIKA WARSZAWSKA**

**WYDZIAŁ SAMOCHODÓW I MASZYN ROBOCZYCH**

**Modelowanie emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych  
do celów oceny oddziaływania zanieczyszczeń ze źródeł  
motoryzacyjnych na środowisko**

**mgr inż. Katarzyna Strzałkowska**

**Promotor**

**prof. dr hab. inż. Zdzisław Chłopek**

**Promotor pomocniczy**

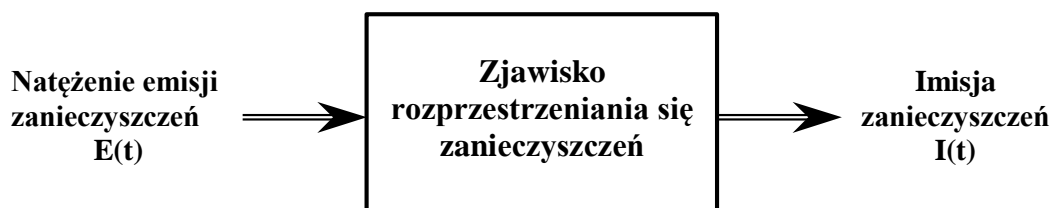
**dr inż. Jakub Lasocki**

**Warszawa, 7.12.2020**

## 1. Wprowadzenie

Za zanieczyszczenie powietrza można uznać każdą substancję będącą w stanie stałym, ciekłym lub gazowym, znajdującą się w nim w stężeniu większym od naturalnego. W powietrzu występują zarówno zanieczyszczenia gazowe (organiczne i nieorganiczne) jak i pyłowe. Zanieczyszczenia pyłowe definiowane są jako faza rozproszona układu dwufazowego, składająca się z ciała stałego zawieszzonego w gazowej fazie rozpraszającej [7, 10]. Źródła zanieczyszczeń, w tym zanieczyszczeń pyłowych, można podzielić na naturalne oraz antropogeniczne. Wśród naturalnych źródeł pyłów wyróżnia się materiały osadowe, wybuchy wulkanów, pożary lasów, aerozole morskie (roślinne, zwierzęce). Antropogeniczne źródła zaś związane są z działalnością bytową oraz gospodarczą ludzi [3, 6, 7].

Niniejsza rozprawa dotyczy modelowania emisji cząstek stałych, zatem należy zdefiniować pojęcie emisji. Emisja jako zjawisko jest to wprowadzanie bezpośrednio lub pośrednio do poszczególnych komponentów środowiska substancji lub energii w postaci ciepła, hałasu, wibracji, pola elektromagnetycznego. Emisja jako wielkość fizyczna to masa substancji wprowadzanej do środowiska. Pojęcie emisji można powiązać z pojęciem imisji. Imisja jest definiowana jako stężenie zanieczyszczenia rozprzestrzenionego w powietrzu atmosferycznym, mierzone na wysokości 1,5 m. Na rysunku 1 zobrazowano zależność przebiegu imisji od natężenia emisji zanieczyszczenia [5, 9].



Rys. 1. Zależność imisji zanieczyszczeń od natężenia emisji zanieczyszczeń [9]

## 2. Zagrożenia środowiska przez cząstki stałe

Cząstki stałe są zanieczyszczeniami niejednorodnymi, a ich oddziaływanie uzależnione jest od składu chemicznego i mineralogicznego, budowy fizycznej oraz wielkości ziaren. Pyły klasyfikowane są ze względu na ich umowne wymiary, uzależnione od średniej średnicy aerodynamicznej cząstek. Wyróżnia się całkowity pył zawieszony – TSP, pył drobny PM10, pył drobny PM2.5, pył PM1 [2 – 8, 10].

Cząstki stałe mają negatywny wpływ zarówno na środowisko przyrodnicze jak i cywilizacyjne. Oddziałują m.in. na gleby, rośliny, wody powierzchniowe i podziemne, widoczność, materiały i ludzi [6, 7].

## 3. Stan prawny związany z ochroną środowiska przed cząstkami stałymi

Problematyka ochrony środowiska została poruszona w wielu dokumentach prawnych [5].

Obecnie obowiązującym i najważniejszym aktem prawnym dot. jakości powietrza w UE jest dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z dnia 21 maja 2008 roku w sprawie jakości powietrza i czystsze powietrze dla Europy, tzw. dyrektywa CAFE.

#### **4. Analiza stanu wiedzy na temat modelowania emisji cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych**

Na temat modelowania emisji cząstek stałych PM10, PM2.5 oraz PM1 powstało stosunkowo dużo publikacji, jednak na temat modelowania emisji cząstek stałych jest mniej artykułów. Wyróżnia się dwie grupy modeli emisji cząstek stałych. Pierwszą stanowią modele oparte na zasadzie podobieństwa strukturalnego, w których uwzględnia się zjawiska fizyczne w przedmiocie modelowania. Drugą grupę stanowią modele oparte na zasadzie podobieństwa funkcjonalnego, tzw. behawiorystyczne, w których wykorzystuje się zależności korelacyjne emisji cząstek stałych i zanieczyszczeń gazowych, tj. tlenków azotu (sprowadzonych do dwutlenku azotu), dwutlenku azotu oraz tlenku węgla. Na podstawie dotychczasowych badań nie można jednoznacznie stwierdzić, która grupa modeli ma większą skuteczność. Z uwagi na dowolność doboru wielu współczynników użytych w modelach opartych na zasadzie podobieństwa strukturalnego, wyniki modelowania są trudne do weryfikacji. W modelach behawiorystycznych zaś należy zwrócić uwagę na aktualnie panujące warunki atmosferyczne, ponieważ wyniki mogą być różne np. dla dni z występującym opadem atmosferycznym czy wiatrem.

#### **5. Cel, tezy i zakres pracy**

Celem rozprawy jest opracowanie metodyki oceny emisji cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych z wykorzystaniem modeli emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych.

W ramach realizacji postawionego celu badawczego można sformułować następujące tezy:

1. Istnieje rosnąca zależność emisji zanieczyszczeń od natężenia emisji tych zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych w okolicach tras komunikacyjnych. Umożliwia to wnioskowanie o emisji cząstek stałych PM10 na podstawie znajomości emisji cząstek stałych PM10, wyznaczonej z wykorzystaniem modeli emisji cząstek stałych PM10 zależnych od emisji innych zanieczyszczeń.
2. Skutecznym sposobem oceny emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych jest wykorzystanie modeli emisji cząstek na podstawie znajomości emisji innych zanieczyszczeń motoryzacyjnych, która to emisja może być wyznaczona z wykorzystaniem dobrze zweryfikowanych modeli emisji zanieczyszczeń z samochodowych silników spalinowych.
3. Do modelowania emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych może być wykorzystany fakt silnej korelacji emisji frakcji wymiarowej cząstek stałych oraz emisji tlenku węgla i emisji tlenków azotu.

Zadania badawcze, których wykonanie umożliwi realizację celu pracy i udowodnienie tez naukowych, obejmuje:

- opracowanie koncepcji modelowania emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych,
- opracowanie modeli emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych: PM10 i PM2.5,
- klasyfikację charakteru ruchu pojazdów oraz przestrzennych właściwości dróg,
- identyfikację oraz weryfikację modeli emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych.

## 6. Koncepcja modelowania emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych do celów inwentaryzacji zanieczyszczeń ze źródeł motoryzacyjnych

Modelowanie emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych PM10, PM2.5 oraz PM1 można wykorzystać w celu inwentaryzacji zanieczyszczeń ze źródeł motoryzacyjnych. Znane z literatury modele emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych są tworzone zgodnie z kryterium podobieństwa funkcjonalnego, najczęściej w postaci liniowej. Wśród nich wyróżnia się modele emisji cząstek stałych PM10 zależne od emisji tlenków azotu, dwutlenku azotu bądź tlenku węgla, a także modele emisji PM2.5 zależne od emisji PM10 oraz modele emisji PM1 zależne od emisji PM10 lub PM2.5. Ww. modele są skuteczne tylko w warunkach ich identyfikacji. Modelowanie emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych polega na wyznaczeniu współczynników modeli, które mogą być różne dla poszczególnych rodzajów tras, węzłów komunikacyjnych, warunków rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń oraz okresów modelowania. Dlatego jest istotne statystyczne potraktowanie tego zagadnienia, co skutkuje wyznaczeniem standardu zbiorów modeli emisji dla reprezentatywnych warunków emisji oraz rozprzestrzeniania cząstek stałych [5, 7, 8].

## 7. Modele emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych

### 7.1. Modele emisji cząstek stałych PM10

Zaproponowane w rozprawie modele utworzone są zgodnie z kryterium podobieństwa funkcjonalnego i zakładają zależność emisji cząstek stałych PM10 od emisji tlenków azotu lub tlenku węgla. Emisję cząstek stałych PM10 można przedstawić w postaci zależności od emisji jednego z rozpatrywanych zanieczyszczeń gazowych. W szczególności można przyjąć:

- liniową funkcję emisji tlenków azotu (model M1):

$$I_{PM10} = a_{01} + a_{11} \cdot I_{NOx} \quad (7.1)$$

- kwadratową funkcję emisji tlenków azotu (model M2):

$$I_{PM10} = a_{02} + a_{12} \cdot I_{NOx} + a_{32} \cdot I_{NOx}^2 \quad (7.2)$$

- liniową funkcję emisji tlenku węgla (model M3):

$$I_{PM10} = a_{03} + a_{23} \cdot I_{CO} \quad (7.3)$$

- kwadratową funkcję emisji tlenku węgla (model M4):

$$I_{PM10} = a_{04} + a_{24} \cdot I_{CO} + a_{44} \cdot I_{CO}^2 \quad (7.4)$$

- wielomian stopnia pierwszego (model M5):

$$I_{PM10} = a_{05} + a_{15} \cdot I_{NOx} + a_{25} \cdot I_{CO} \quad (7.5)$$

- wielomian stopnia drugiego (model M6):

$$I_{PM10} = a_{06} + a_{16} \cdot I_{NOx} + a_{26} \cdot I_{CO} + a_{36} \cdot I_{NOx}^2 + a_{46} \cdot I_{CO}^2 + a_{56} \cdot I_{NOx} \cdot I_{CO} \quad (7.6)$$

## 7.2. Modele emisji cząstek stałych PM2.5

Modele emisji cząstek stałych PM2.5 utworzone są zgodnie z kryterium podobieństwa funkcjonalnego, wykorzystując definicje poszczególnych frakcji wymiarowych cząstek stałych (PM10, PM2.5). Zgodnie z definicją, zbiór cząstek stałych o średnicy mniejszej niż 2,5 µm (PM2.5) jest podzbiorem zbioru cząstek stałych o średnicy poniżej 10 µm (PM10). Dlatego też emisja PM2.5 jest modelowana jako liniowo zależna od emisji PM10:

$$I_{PM2.5} = k_{PM2.5-10} \cdot I_{PM10} \quad (7.7)$$

gdzie:  $k_{PM2.5-10}$  – współczynnik modelu emisji cząstek stałych PM2.5;  $k_{PM2.5-10} \in \langle 0;1 \rangle$ .

## 7.3. Modele emisji cząstek stałych PM1

Modelowanie emisji cząstek stałych PM1 jest analogiczne do modelowania emisji PM2.5. W tym przypadku modele utworzone są zgodnie z kryterium podobieństwa funkcjonalnego, do którego wykorzystywana jest definicja odpowiednich frakcji wymiarowych cząstek stałych (PM1, PM2.5, PM10). Cząstki stałe PM1 stanowią podzbiór zbioru cząstek stałych PM2.5. Dlatego też emisja PM1 modelowana jest jako liniowo zależna od emisji PM2.5:

$$I_{PM1} = k_{PM1-2.5} \cdot I_{PM2.5} \quad (7.8)$$

gdzie:  $k_{PM1-2.5}$  – współczynnik modelu emisji pyłów PM1;  $k_{PM1-2.5} \in \langle 0;1 \rangle$ .

Cząstki stałe PM1 stanowią również podzbiór zbioru cząstek stałych PM10, dlatego też ich emisję można traktować jako liniowo zależną od emisji cząstek stałych PM10:

$$I_{PM1} = k_{PM1-10} \cdot I_{PM10} \quad (7.9)$$

gdzie:  $k_{PM1-10}$  – współczynnik modelu emisji pyłów PM1;  $k_{PM1-10} \in \langle 0;1 \rangle$ .

Identyfikacja modeli polega na wyznaczeniu współczynników modeli. Współczynniki zastosowanych modeli emisji cząstek stałych mogą różnić się w zależności od wielkości charakteryzujących źródła emisji zanieczyszczeń oraz warunków ich rozprzestrzeniania.

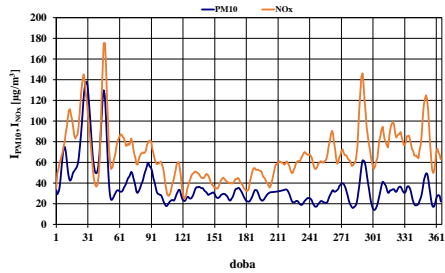
## 8. Identyfikacja modeli emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych

### 8.1. Identyfikacja modeli emisji cząstek stałych PM10

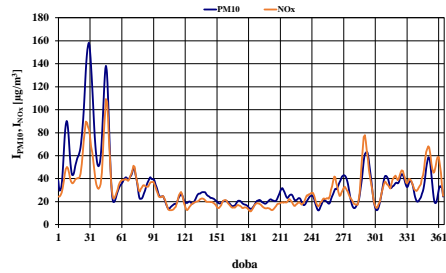
W celu przeprowadzenia modelowania emisji cząstek stałych PM10 wybrano trzy miasta w Polsce, w których są prowadzone pomiary emisji tlenku węgla (CO), tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) oraz cząstek stałych PM10. Miasta te to Bydgoszcz, Łódź oraz Częstochowa. W każdym z nich wybrano po dwie stacje nadzorowania jakości powietrza, jedną komunikacyjną, drugą tła miejskiego.

Identyfikację modeli emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych przeprowadzono w trzech wariantach uwzględniających czas uśredniania wyników pomiarów: badania dzienne, badania tygodniowe, badania roczne.

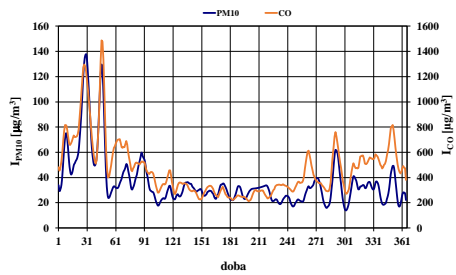
Na rysunkach 8.1 – 8.8 przedstawiono przykładowe zależności dla stacji komunikacyjnych oraz dla stacji tła miejskiego dla badań rocznych.



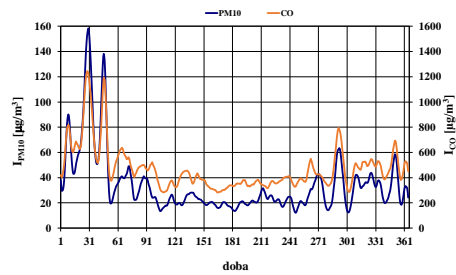
Rys. 8.1. Imisja cząstek stałych PM10 i tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) na stacji nadzorowania jakości powietrza przy pl. Poznańskim w Bydgoszczy (2017)



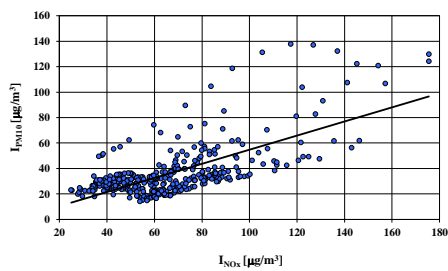
Rys. 8.2. Imisja cząstek stałych PM10 i tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) na stacji nadzorowania jakości powietrza przy ul. Warszawskiej w Bydgoszczy (2017)



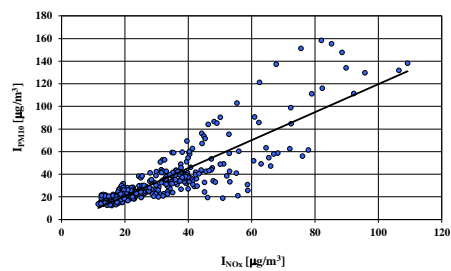
Rys. 8.3. Imisja cząstek stałych PM10 i tlenku węgla (CO) na stacji nadzorowania jakości powietrza przy pl. Poznańskim w Bydgoszczy (2017)



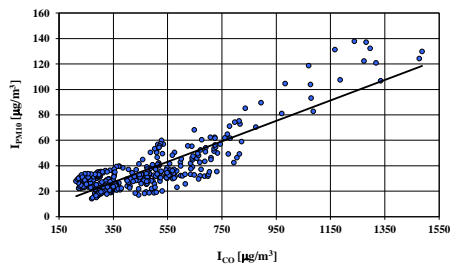
Rys. 8.4. Imisja cząstek stałych PM10 i tlenku węgla (CO) na stacji nadzorowania jakości powietrza przy ul. Warszawskiej w Bydgoszczy (2017)



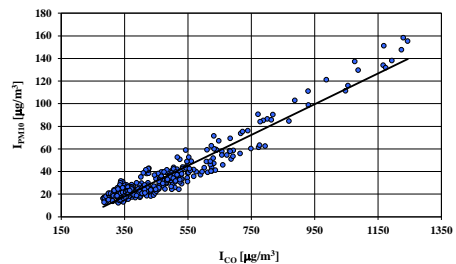
Rys. 8.5. Zależność korelacyjna imisji cząstek stałych PM10 i tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) na stacji nadzorowania jakości powietrza przy pl. Poznańskim w Bydgoszczy (2017)



Rys. 8.6. Zależność korelacyjna imisji cząstek stałych PM10 i tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) na stacji nadzorowania jakości powietrza przy ul. Warszawskiej w Bydgoszczy (2017)



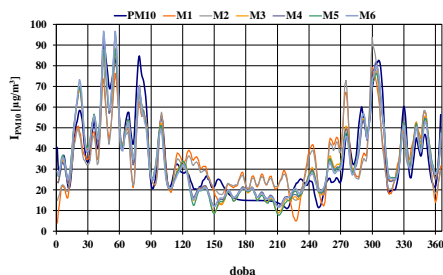
Rys. 8.7. Zależność korelacyjna imisji cząstek stałych PM10 i tlenku węgla (CO) na stacji nadzorowania jakości powietrza przy pl. Poznańskim w Bydgoszczy (2017)



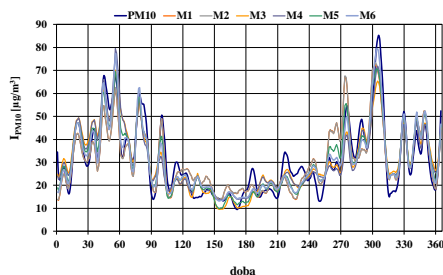
Rys. 8.8. Zależność korelacyjna imisji cząstek stałych PM10 i tlenku węgla (CO) na stacji nadzorowania jakości powietrza przy ul. Warszawskiej w Bydgoszczy (2017)

Analizując wykresy przedstawiające przykładowe zależności dla stacji komunikacyjnych oraz dla stacji tła miejskiego dla badań rocznych można zaobserwować silną oraz bardzo silną korelację imisji cząstek stałych PM10 i tlenku węgla oraz cząstek stałych PM10 i tlenków

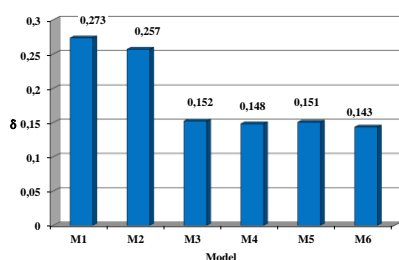
azotu. Rysunki od 8.9 do 8.12 przedstawiają wyniki symulacji emisji cząstek stałych PM10 z zastosowaniem modeli M1 – M6 dla stacji komunikacyjnej i stacji tła miejskiego.



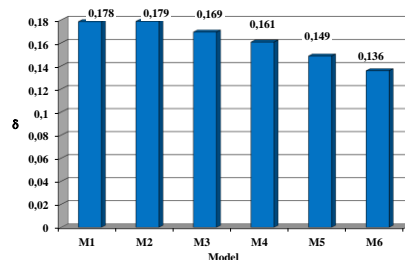
Rys. 8.9. Wyniki symulacji emisji cząstek stałych PM10 z zastosowaniem modeli M1 – M6, stacja nadzorowania jakości powietrza – pl. Poznański w Bydgoszczy (2015)



Rys. 8.10. Wyniki symulacji emisji cząstek stałych PM10 z zastosowaniem modeli M1 – M6, stacja nadzorowania jakości powietrza – ul. Warszawska w Bydgoszczy (2015)



Rys. 8.11. Różnica średniokwadratowa wyników symulacji z zastosowaniem modeli M1 – M6 i wyników pomiarów emisji cząstek stałych PM10, stacja nadzorowania jakości powietrza – pl. Poznański w Bydgoszczy (2015)



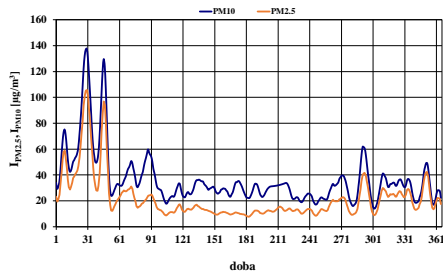
Rys. 8.12. Różnica średniokwadratowa wyników symulacji z zastosowaniem modeli M1 – M6 i wyników pomiarów emisji cząstek stałych PM10, stacja nadzorowania jakości powietrza – ul. Warszawska w Bydgoszczy (2015)

Analizując wykresy zaobserwowano, że najdokładniejszym modelem emisji cząstek stałych PM10 jest model M6. Jest to model w postaci zależności emisji cząstek stałych PM10 od emisji obydwu rozpatrywanych zanieczyszczeń gazowych: tlenku węgla i tlenków azotu (wielomianu stopnia drugiego). Zaobserwowano również zbliżoną dokładność modeli M3, M4 i M5.

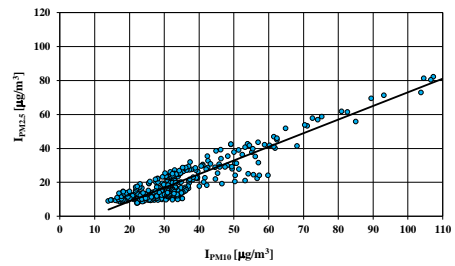
## 8.2. Identyfikacja modeli emisji cząstek stałych PM2.5

W celu przeprowadzenia modelowania emisji cząstek stałych PM2.5 wybrano trzy miasta w Polsce, w których prowadzone są pomiary emisji cząstek stałych PM10 oraz PM2.5. Miasta te to Bydgoszcz, Warszawa i Kraków. W każdym z nich wybrano po dwie stacje nadzorowania jakości powietrza, jedną komunikacyjną, drugą tła miejskiego. Identyfikację modeli emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych przeprowadzono w trzech wariantach uwzględniających czas uśredniania wyników pomiarów tak jak dla badań emisji cząstek stałych PM10.

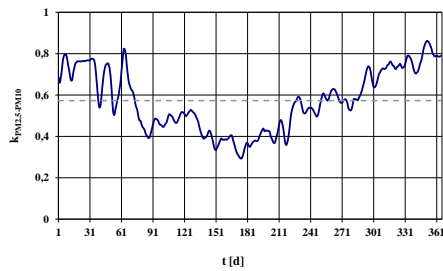
Na rysunkach od 8.13 do 8.18 przedstawiono przykładowe zależności dla stacji komunikacyjnych oraz dla stacji tła miejskiego dla badań rocznych.



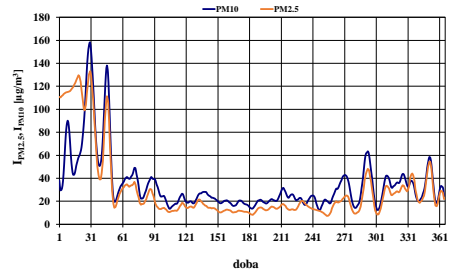
Rys. 8.13. Imisja cząstek stałych PM10 i PM2.5 na stacji nadzorowania jakości powietrza przy pl. Poznańskim w Bydgoszczy (2017)



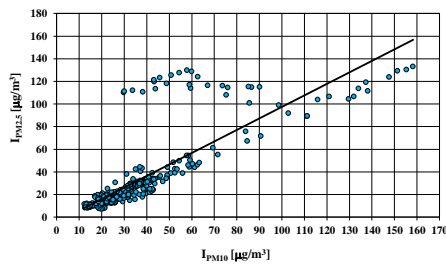
Rys. 8.14. Zależność korelacyjna emisji cząstek stałych PM10 i PM2.5 na stacji nadzorowania jakości powietrza przy pl. Poznańskim w Bydgoszczy (2017)



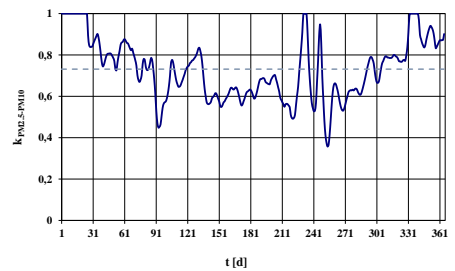
Rys. 8.15. Przebieg oraz wartość średnia współczynnika k modelu emisji cząstek stałych PM2.5 na stacji nadzorowania jakości powietrza przy pl. Poznańskim w Bydgoszczy (2017)



Rys. 8.16. Imisja cząstek stałych PM10 i PM2.5 na stacji nadzorowania jakości powietrza przy ul. Warszawskiej w Bydgoszczy (2017)



Rys. 8.17. Zależność korelacyjna emisji cząstek stałych PM10 i PM2.5 na stacji nadzorowania jakości powietrza przy ul. Warszawskiej w Bydgoszczy (2017)



Rys. 8.18. Przebieg oraz wartość średnia współczynnika k modelu emisji cząstek stałych PM2.5 na stacji nadzorowania jakości powietrza przy ul. Warszawskiej w Bydgoszczy (2017)

Analizując wykresy przedstawiające przykładowe zależności dla stacji komunikacyjnych oraz dla stacji tła miejskiego dla badań rocznych (2017 rok), można zaobserwować silną oraz bardzo silną korelację emisji cząstek stałych PM10 i PM2.5. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona dla stacji komunikacyjnych był w granicach od 0,87 do 1,00, zaś dla stacji tła miejskiego od 0,81 do 1,00. Analizując przebiegi emisji cząstek stałych PM10 i PM2.5 na stacjach komunikacyjnych i tła miejskiego w 2017 roku można zaobserwować, że największe wartości emisji występują w miesiącach zimowych, głównie na początku roku. W miesiącach letnich wartości są znacznie mniejsze.



## 9. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań empirycznych oraz rozważań teoretycznych dowiedziono tezy postawione w rozprawie:

- Istnieje rosnąca zależność emisji zanieczyszczeń od natężenia emisji tych zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych w okolicach tras komunikacyjnych. Umożliwia to wnioskowanie o emisji cząstek stałych PM10 na podstawie znajomości emisji cząstek stałych PM10, wyznaczonej z wykorzystaniem modeli emisji cząstek stałych PM10 zależnych od emisji tlenku węgla i emisji tlenków azotu.
- Skutecznym sposobem oceny emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych może być wykorzystanie modeli emisji cząstek na podstawie znajomości emisji innych zanieczyszczeń motoryzacyjnych (tlenków azotu i tlenku węgla), która to emisja może być wyznaczona z wykorzystaniem dobrze zweryfikowanych modeli emisji zanieczyszczeń z samochodowych silników spalinowych. Jednak należałoby przeprowadzić rozszerzone badania pozwalające wyznaczyć współczynniki modeli emisji, uwzględniające charakter i natężenie ruchu samochodowego, a także aktualne warunki atmosferyczne.
- Po przeanalizowaniu charakteru ruchu pojazdów, natężenia ruchu, a także warunków rozprzestrzeniania zanieczyszczeń w pobliżu stacji nadzorowania jakości powietrza stwierdzono, że istnieje możliwość wykorzystania do identyfikacji modeli emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych klasyfikacji charakteru ruchu pojazdów oraz przestrzennych właściwości dróg, jednak wyniki te nie są jednoznaczne i należałoby przeprowadzić znacznie większą liczbę badań identyfikacji modeli emisji cząstek stałych, dla większej liczby stacji nadzorowania jakości powietrza.
- Do modelowania emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych może być wykorzystany fakt silnej korelacji emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych oraz emisji tlenku węgla i emisji tlenków azotu. Opracowano modele emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych oraz przeprowadzono identyfikację ww. modeli. Na podstawie wyników identyfikacji stwierdzono, że istnieje istotna statystycznie korelacja emisji cząstek stałych PM10 i emisji tlenku węgla oraz korelacja emisji cząstek stałych PM10 i emisji tlenków azotu. Ponadto istnieje bardzo silna korelacja emisji cząstek stałych PM10 i PM2.5.

Celem rozprawy było opracowanie metodyki oceny emisji cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych z wykorzystaniem modeli emisji frakcji wymiarowych cząstek stałych. Wg autorki pracy cel został częściowo osiągnięty. Opracowano i zidentyfikowano modele emisji cząstek stałych. Dowiedziono tezy pracy oraz wykonano zaplanowany zakres badań, który umożliwił zrealizowanie przyjętego celu. Dowiedziono skuteczności modeli emisji cząstek stałych. Jednak wyniki pokazały, że aby wyznaczyć uniwersalne współczynniki modeli emisji cząstek stałych, należałoby przeprowadzić znacznie większą liczbę badań na stacjach nadzorowania jakości powietrza uwzględniających aktualne natężenie ruchu samochodowego oraz jego charakter. Ponadto badania powinny uwzględniać aktualne warunki atmosferyczne. Dodatkowo należałoby skategoryzować i określić tło zanieczyszczeń, jakie pochodzą z innych źródeł niż transport.

## Piśmiennictwo

- [1] Badyda A. J., Dąbrowiecki P., Lubiński W., Czechowski P. O., Majewski G., *Exposure to Traffic-Related Air Pollutants as a Risk of Airway Obstruction*, Respiratory Regulation – Clinical Advances, Chapter 5, 35–45, 2013.
- [2] Chłopek Z., *Identyfikacja modeli emisji cząstek stałych PM<sub>2.5</sub> i PM<sub>1</sub>*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 1(87)/2012, 26–31.
- [3] Chłopek Z., *Modele behawiorystyczne emisji cząstek stałych PM<sub>10</sub> ze źródeł transportu drogowego*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej 1(82)/2011, 111–118.
- [4] Chłopek Z., *Ocena stanu zagrożenia środowiska przez cząstki stałe PM<sub>2,5</sub> ze źródeł transportu drogowego*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej 1(82)/2011, 101–110.
- [5] Chłopek Z., *Sprawozdanie z projektu badawczego ministerstwa nauki i szkolnictwa wyższego N N509 083637 – Modelowanie emisji cząstek stałych PM<sub>10</sub> ze źródeł motoryzacyjnych do celów oceny oddziaływania transportu drogowego na środowisko*, Warszawa 2012.
- [6] Chłopek Z., Jakubowski A., *Badania emisji cząstek stałych z układu hamulcowego pojazdu samochodowego*, Eksploatacja i Niezawodność 4(4)/2009, 45–52.
- [7] Chłopek Z., Skibiński F., *Wprowadzenie w tematykę emisji cząstek stałych PM<sub>2,5</sub> powodowanych transportem samochodowym*, Transport Samochodowy 3/2010, 73–87.
- [8] Chłopek Z., Szczepański T., *Ocena zagrożenia środowiska cząstkami stałymi ze źródeł cywilizacyjnych*, Inżynieria Ekologiczna 30/2012, 174–193.
- [9] Chłopek Z., Żegota M., *Badania emisji cząstek stałych PM<sub>10</sub>*, Rozdział monografii „Edukacja ekologiczna. Podstawy działań naprawczych w środowisku”, Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej, Nałęczów 2004, 114–120.
- [10] Juda–Rezler K., *Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza na środowisko*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.