



---

**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**

---



**WYDZIAŁ  
INŻYNIERII LĄDOWEJ  
I TRANSPORTU**

**Politechnika Poznańska  
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu**

mgr inż. Kinga Skobiej

**Ocena emisji spalin pojazdów samochodowych  
w warunkach ruchu drogowego**

*Rozprawa doktorska*

Promotor: dr hab. inż. Łukasz Rymaniak, prof. PP  
Promotor pomocniczy: dr inż. Wojciech Cieślik

Poznań, 2023

# Spis treści

Streszczenie .....	4
Abstract .....	6
Wykaz skrótów i symboli .....	8
<b>1. Wprowadzenie .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Problematyka, cel i zakres rozprawy .....</b>	<b>19</b>
<b>3. Możliwości oceny emisji spalin z pojazdów samochodowych</b>	
– <b>przeгляд literatury .....</b>	<b>22</b>
3.1. Zagadnienie oceny emisji spalin dla pojazdów samochodowych w drogowych testach jezdnych.....	22
3.2. Trendy zmian w pomiarach emisji spalin w warunkach drogowych .....	26
<b>4. Metodyka badań .....</b>	<b>34</b>
4.1. Procedury badawcze wykorzystywane w pomiarach emisji spalin w badaniach drogowych.....	34
4.2. Obiekty badań.....	42
4.3. Trasy badawcze .....	43
4.4. Aparatura pomiarowa .....	45
4.5. Procedura wyznaczenia minimalnej emisji spalin w teście drogowym .....	48
<b>5. Wyniki badań własnych i ich analiza .....</b>	<b>50</b>
5.1. Ocena emisji spalin i zużycia energii pojazdów w testach drogowych .....	50
5.1.1. Weryfikacja formalna testów drogowych.....	50
5.1.2. Analiza wyników emisji spalin .....	55
5.1.3. Pomiary energochłonności .....	64
5.2. Kategoryzacja pojazdów pod względem ekologicznym w drogowych testach emisyjnych .....	71
5.2.1. Weryfikacja poprawności wykonania testów drogowych.....	71
5.2.2. Wyniki emisji drogowej pojazdów hybrydowych.....	76
5.2.3. Wyznaczenie minimalnej wartości emisji drogowej spalin .....	82
5.2.4. Kategoria emisyjna pojazdów hybrydowych typu plug-in.....	90
5.3. Analiza emisji spalin pojazdu z napędem hybrydowym dla obecnych i przyszłych testów drogowych .....	93
5.3.1. Charakterystyka tras badawczych .....	93
5.3.2. Charakterystyka parametrów dynamicznych testów .....	96
5.3.3. Porównanie emisji drogowej związków szkodliwych w zróżnicowanych testach drogowych .....	98

<b>6. Wnioski i kierunki dalszych badań</b> .....	109
6.1. Wnioski ogólne.....	109
6.2. Wnioski szczegółowe .....	111
6.3. Kierunki dalszych prac .....	114
<b>Literatura</b> .....	115

## Streszczenie

Jednym z celów środowiskowych Komisji Europejskiej jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku. Niestety, pomimo już obowiązujących regulacji prawnych, sektor motoryzacyjny nadal uważany jest za jedno z głównych źródeł zanieczyszczenia powietrza. Według danych Parlamentu Europejskiego emisja z transportu stanowi 25% światowej emisji dwutlenku węgla, z czego największy udział miał transport drogowy (ok. 75%). Zjawisko to jest szczególnie widoczne w aglomeracjach miejskich, gdzie istnieje bezpośrednie narażenie na szkodliwe skutki złej jakości powietrza. Dlatego konieczna jest jego poprawa. Przykładami rozwiązań, które mogą pomóc w tej kwestii jest popularyzacja pojazdów hybrydowych oraz rozwój elektromobilności. Pojazdy takie charakteryzują się przede wszystkim mniejszym zużyciem energii w porównaniu do konwencjonalnych pojazdów wyposażonych w silniki spalinowe. W pracy podjęto się odpowiedzi na pytanie badawcze w jaki sposób dokonać oceny środowiskowej (m.in. pod względem emisji spalin, ale również zużycia energii) pojazdów samochodowych różnych kategorii w warunkach drogowych. Zakres pracy podzielono na trzy etapy w których dokonano: oceny pojazdów pod względem emisyjnym i zużycia energii w testach drogowych (etap 1), klasyfikacji uzyskiwanych wyników na tle możliwych do uzyskania rezultatów emisji spalin w badaniach drogowych (etap 2) oraz uzyskiwanych wyników emisji spalin w testach drogowych na tle nowych możliwych do wprowadzenia przepisów (etap 3).

W pierwszym etapie pracy dokonano oceny emisji spalin i energochłonności samochodów osobowych o różnych układach napędowych (konwencjonalny pojazd hybrydowy i elektryczny) w czasie ich rzeczywistej eksploatacji. Metodyka badań była zgodna z wymaganiami Komisji Europejskiej dotyczącymi pomiaru emisji spalin w rzeczywistych warunkach jazdy. Umożliwiło to porównawczą ocenę zużycia energii w różnych warunkach ruchu, ze szczególnym uwzględnieniem fazy miejskiej oraz całego testu RDE. Uzyskane wyniki poddano analizie w celu zidentyfikowania zmian wskaźników środowiskowych, jakie nastąpiły wraz z rozwojem technicznym pojazdów. Wyniki badań umożliwiły klasyfikację pojazdów pod względem ekologicznym.

W drugim etapie pracy przeprowadzono wartościowanie samochodów hybrydowych typu plug-in pod kątem ekologicznym. Nowym rozwiązaniem jest wykorzystanie uzyskanych wartości emisji spalin w badaniach drogowych do określenia kategoryzacji tych pojazdów i uzależnienie ich od uzyskania wyników w testach drogowych. Nowatorskim sposobem określenia takiego działania jest również oszacowanie skrajnych wyników emisji spalin dla tego typu pojazdów w zakresie dopuszczalnego rozrzutu wyników badań drogowych.

W trzecim etapie pracy przeanalizowano wpływ długości tras badawczych w odniesieniu do obecnych, ale i przyszłościowych regulacji badań drogowych. Do pomiarów wybrano trzy trasy o kompozycji poszczególnych faz o długości około 30 km, 16 km i 8 km. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na wyciągnięcie wniosków, że obecne wymagania odnośnie testu RDE (w szczególności czas trwania testu) wymuszają długość każdej części wynoszącej 32 km. Skrócenie testu do 60–90 minut spowoduje, że poszczególne fazy mogą trwać 16 km, a główną zaletą takiego rozwiązania będzie bardzo duży wpływ fazy zimnego rozruchu na wyniki emisji w fazie miejskiej. Przyszłościowe deklaracje ustawodawców dotyczące drastycznego zmniejszenia długości faz testu do 8 km, wymuszą testowanie pojazdów hybrydowych w dużej mierze z wykorzystaniem silnika spalinowego.

Analiza wyników prezentowanych w dysertacji umożliwiła odpowiedź na główne pytanie badawcze dotyczące oceny emisji spalin pojazdów samochodowych z różnymi układami napędowymi w warunkach ruchu drogowego, obejmująca zastosowanie procedur homologacyjnych, ich autorskiej skróconej wersji, a także zdefiniowanie kategoryzacji emisyjnej pojazdów.

## **Abstract**

### **Assessment of exhaust emissions of motor vehicles in road traffic conditions**

One of the European Commission's environmental goals is to achieve climate neutrality by 2050. Unfortunately, despite the regulations already in place, the automotive sector is still considered one of the main sources of air pollution. According to the European Parliament, transport emissions account for 25% of global carbon dioxide emissions, with road transport accounting for the largest share (about 75%). This problem is particularly evident in urban agglomerations, where there is direct exposure to the harmful effects of poor air quality. Therefore, it is necessary to improve it. Examples of solutions that can help in this regard are the popularization of hybrid vehicles and the development of electromobility. Such vehicles are characterized primarily by lower energy consumption compared to conventional vehicles equipped with internal combustion engines. The paper undertakes to answer the research question of how to make an environmental assessment (including in terms of exhaust emissions, but also energy consumption) of motor vehicles of different categories under road conditions. The scope of the work was divided into three stages in which the following were carried out: evaluation of vehicles in terms of emissions and energy consumption in on-road tests (stage 1), classification of the results obtained against the possible results of exhaust emissions in on-road tests (stage 2), and the results obtained of exhaust emissions in on-road tests against the new possible regulations (stage 3).

In the first stage of the study, exhaust emissions and energy intensity of passenger cars with different drive systems (conventional hybrid and electric vehicle) were evaluated during their actual operation. The test methodology was in accordance with the European Commission's requirements for measuring exhaust emissions in real-world driving conditions. This enabled a comparative evaluation of energy consumption under different traffic conditions, with a particular focus on the urban phase and the entire RDE test. The results obtained were analyzed to identify changes in environmental indicators that have occurred with the technical development of vehicles. The results made it possible to classify vehicles in terms of environmental performance.

In the second stage of the work, the valuation of plug-in hybrid cars was carried out in terms of environmental performance. A new solution is to use the obtained emission values in road tests to determine the categorization of these vehicles and make them dependent on the results obtained in road tests. A novel way of determining such a measure is also to estimate the extreme emission results for this type of vehicle within the range of acceptable spread of road test results.

In the third stage of the study, the impact of the length of test routes was analyzed in relation to current, but also future road test regulations. Three routes with a composition of individual phases of about 30 km, 16 km and 8 km in length were selected for measurements. The analysis of the obtained results made it possible to draw conclusions that the current requirements for the RDE test (in particular, the duration of the test) force the length of each part of 32 km. Shortening the test to 60-90 minutes will result in individual phases that can last 16 km, and the main advantage of such a solution will be the high impact of the cold-start phase on emission results in the urban phase. Future declarations by lawmakers to drastically reduce the length of the test phases to 8 km will force the testing of hybrid vehicles largely using the internal combustion engine.

The analysis of the results presented in the dissertation has made it possible to answer the main research question on the evaluation of the exhaust emissions of motor vehicles with different powertrains under traffic conditions, involving the application of the approval procedures, their author's abbreviated version, as well as the definition of the emission categorization of vehicles.

## Wykaz ważniejszych skrótów i symboli

a	<i>acceleration</i> – przyspieszenie
A	faza autostradowa testu drogowego
ACEA	<i>Association des Constructeurs Européens d'Automobile</i> – Stowarzyszenie Europejskich Konstruktorów Samochodów
b	emisja drogowa
c	stężenie
CF	<i>Conformity Factor</i> – współczynnik zgodności
CLEAR	metoda wyznaczania emisji drogowej zanieczyszczeń w testach drogowych wykorzystująca procedurę kategoryzacji mocy
CNG	<i>Compressed Natural Gas</i> – sprężony gaz ziemny
CoV	<i>Coefficient of Variation</i> – wskaźnik zmienności
DI	<i>direct injection</i> – wtrysk bezpośredni
E	natężenie emisji
EC	<i>ecological category</i> – kategoria ekologiczna
EEA	<i>European Environment Agency</i> – Europejska Agencja Środowiska
EEPS	<i>Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer</i> – spektrometr masowy do pomiaru średnic cząstek stałych
EMROAD	metoda wyznaczania emisji drogowej zanieczyszczeń w testach drogowych wykorzystująca procedurę ruchomego okna uśredniania
Euro	normy emisji spalin w Europie
EV	<i>electric vehicle</i> – pojazd elektryczny
FID	<i>Flame Ionization Detector</i> – analizator płomieniowo-jonizacyjny
GPS	<i>Global Positioning System</i> – system nawigacji satelitarnej
HCHO	aldehydy
HEV	<i>hybrid electric vehicle</i> – pojazd hybrydowy
ICE	<i>internal combustion engines</i> – silniki spalinowe
ISC	<i>In-Service Conformity</i> – badania zgodności eksploatacyjnej
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> – Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna
JRC	<i>Joint Research Centre</i> – Europejskie Centrum Badań
LPG	<i>Liquefied Petroleum Gas</i> – gaz propan-butan
MAW	<i>moving average windows</i> – ruchome okna uśredniania
M	faza miejska testu drogowego



MHEV	<i>mild hybrid electric vehicle</i> – pojazd hybrydowy, którego głównym napędem jest silnik spalinowy, a silnik elektryczny działa jedynie wspomagająco
NDIR	<i>Non-Dispersive Infrared</i> – niedispersyjny analizator wykorzystujący promieniowanie podczerwone
NDUV	<i>Non-Dispersive Ultraviolet</i> – niedispersyjny analizator wykorzystujący promieniowanie ultrafioletowe
NEDC	New European Driving Cycle – <i>nowy europejski test jezdny</i>
NOVC-HEV	<i>not off-vehicle chargeable hybrid electric vehicle</i> – hybrydowe pojazdy elektryczne nieładowane zewnątrz
N-RDE	test niespełniający wymagań procedury RDE
NTE	<i>Not-To-Exceed</i> – wartość nieprzekraczalna
OBD	<i>On-Board Diagnostic</i> – system diagnostyki pokładowej
ONZ	Organizacja Narodów Zjednoczonych
OVC-HEV	<i>off-vehicle charging hybrid electric vehicle</i> – hybrydowe pojazdy elektryczne ładowane zewnątrz
P	faza pozamiejska testu drogowego
PEMS	<i>Portable Emissions Measurement Systems</i> – mobilna aparatura do pomiaru emisji spalin
PHEV	<i>plug-in hybrid</i> – hybrydowy pojazd elektryczny, którego akumulator może być ładowany z zewnętrznego źródła energii elektrycznej
PM	<i>Particle Mass</i> – masa cząstek stałych
PMD	<i>Paramagnetic Detector</i> – analizator paramagnetyczny
PN	<i>Particle Number</i> – liczba cząstek stałych
PZPM	Polski Związek Przemysłu Motoryzacyjnego
RDE	<i>Real Driving Emissions</i> – procedura wyznaczania emisji spalin w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego
RF	wskaźnik oceny danych w teście drogowym
$r_k$	wskaźników zwiększenia emisji drogowej zanieczyszczeń
RPA	<i>Relative Positive Acceleration</i> – względne przyspieszenie dodatnie
SOC	<i>state of charge</i> – stopień naładowania akumulatora
TCMV	<i>Technical Committee on Motor Vehicles</i> – Komitet Techniczny Komisji Europejskiej ds. Pojazdów Silnikowych
u	udział czasu pracy
UE	Unia Europejska
v	<i>velocity</i> – prędkość pojazdu
WHO	<i>World Health Organization</i> – Światowa Organizacja Zdrowia
WLTC	<i>Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Cycle</i> – ujednoczony cykl jezdny dla lekkich pojazdów samochodowych

---

WLTP	<i>Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure</i> – ujednolicona procedura badań emisji lekkich pojazdów samochodowych
ZI	zapłon iskrowy
ZS	zapłon samoczynny

# 1. Wprowadzenie

Pogarszający się stan środowiska naturalnego negatywnie wpływa na zdrowie ludzi, poprzez zwiększenie narażenia na szereg zagrożeń toksykologicznych. Wzrastające poziomy zanieczyszczeń atmosferycznych, w tym pyłów zawieszonych, tlenków azotu i innych toksycznych substancji emitowanych przez przemysł, transport i inne działania ludzkie, przyczyniają się do poważnych problemów zdrowotnych. Większe stężenie tych zanieczyszczeń w powietrzu może prowadzić do rozwoju chorób układu oddechowego, takich jak astma, przewlekłej obturacyjnej choroby płuc (POChP) oraz innych schorzeń płucnych. Długotrwała ekspozycja na wysokie stężenia zanieczyszczeń powietrza może również osłabić układ odpornościowy organizmu, zwiększając podatność na infekcje i choroby zakaźne [1].

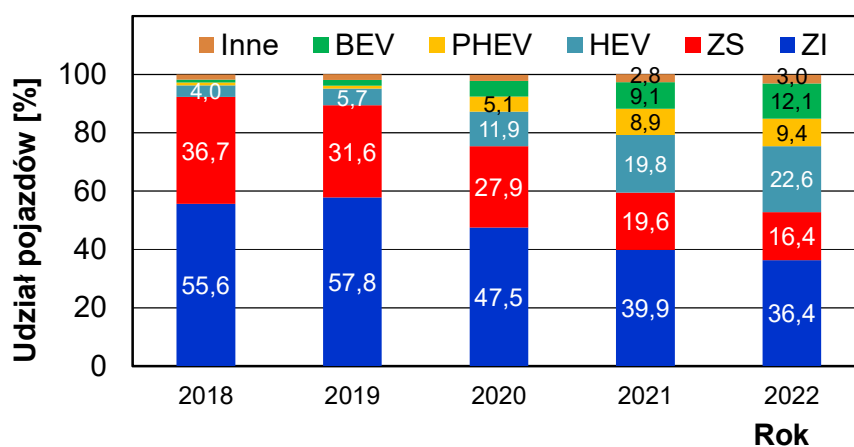
Zanieczyszczenia atmosferyczne stanowią poważne zagrożenie dla zdrowia publicznego i wymagają podjęcia skutecznych działań w celu ograniczenia emisji zanieczyszczeń i ochrony jakości powietrza. Wdrażanie bardziej rygorystycznych norm dotyczących emisji zanieczyszczeń z różnych źródeł, promowanie zrównoważonych źródeł energii, rozwijanie ekologicznych technologii transportu oraz podejmowanie świadomych decyzji w sferze urbanizacji i przemysłu są kluczowymi krokami w walce o zdrowsze, a także bardziej zrównoważone środowisko dla przyszłych pokoleń. Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) od 1987 roku [1] publikuje wytyczne dotyczące jakości powietrza, które mają kluczowe znaczenie dla ochrony zdrowia ludzi. W raporcie z 2021 roku organizacja przedstawiła również wytyczne dotyczące poważnego zagrożenia dla zdrowia człowieka, wynikającego z emisji cząstek stałych i tlenków azotu [2]. Komisja Europejska, w raporcie opublikowanym przez Joint Research Centre (JRC) [3] podkreśla, że niezbędne jest podejmowanie działań mających na celu ograniczenie zanieczyszczeń powietrza do 2030 roku, co przyczyni się do redukcji o 55% liczby przedwczesnych zgonów. Dodatkowo, planuje się zmniejszenie poziomów zanieczyszczeń powietrza do 2050 roku w taki sposób, aby nie stanowiły już zagrożenia dla zdrowia [4]. Te doniesienia są ważnym sygnałem dla społeczeństwa i podkreślają konieczność podejmowania skutecznych działań w celu ochrony środowiska oraz zdrowia publicznego.

Najbardziej dynamicznie zmieniającym się sektorem przemysłu jest transport, który znacząco wpływa na stężenie niebezpiecznych substancji w powietrzu. W celu zmniejszenia ograniczenia negatywnego oddziaływania pojazdów na otoczenie, wprowadza się coraz bardziej restrykcyjne normy emisyjne, a także szuka się rozwiązań, które pozwolą zminimalizować emisję spalin z pojazdów. Jednym z zaproponowanych przez producentów działań, mających na celu ograniczenie emisji spalin w ujęciu globalnym, jest

zastąpienie jak największej liczby pojazdów spalinowych, pojazdami elektrycznymi. Jednak, ze względu na wciąż wysoki koszt akumulatorów, ograniczony zasięg, a także brak rozwiniętej infrastruktury, pojazdy w pełni elektryczne nie są w stanie zastąpić tych o napędzie konwencjonalnym. Coraz większą trudność producentom pojazdów konwencjonalnych sprawiają nowe, bardziej restrykcyjne normy emisji spalin.

Przedstawione dane z literatury [5] wskazują na dominację pojazdów konwencjonalnych na rynku samochodowym w Unii Europejskiej. Wynika to z faktu, że aż 36,4% nowych samochodów osobowych zarejestrowanych w UE jest wyposażonych w silniki o zapłonie iskrowym, podczas gdy tylko 16,4% stanowią silniki o zapłonie samoczynnym. Warto zauważyć, że pojazdy elektryczne oraz hybrydowe, które są uznawane za bardziej ekologiczne, stanowią 21,6% ogólnej liczby nowych samochodów osobowych w UE. Jednak wciąż pozostają one w mniejszości w porównaniu do tradycyjnych pojazdów konwencjonalnych.

Z podziału pojazdów elektrycznych wynika, że 12,1% nowych samochodów osobowych w UE to pojazdy w pełni elektryczne, podczas gdy 9,4% to hybrydy typu plug-in, które korzystają zarówno z napędu elektrycznego, jak i spalinowego. Mimo, że pojazdy z napędem hybrydowym stanowią 22,6% całkowitej sprzedaży samochodów, to jednak stanowią one jedynie niewielki odsetek w porównaniu do całkowitej populacji nowych samochodów w UE (rys. 1.1)



**Rysunek 1.1.** Struktura pojazdów w Europie w zależności od rodzaju paliwa/napędu (BEV - *battery electric vehicle* – pojazd o napędzie elektrycznym, PHEV – *plug-in hybrid electric vehicle* – pojazd o napędzie hybrydowym z możliwością ładowania z sieci elektrycznej, HEV - *hybrid electric vehicle* – pojazd o napędzie hybrydowym, ZI – pojazd wyposażony w silnik o zapłonie iskrowym, ZS – pojazd wyposażony w silnik o zapłonie samoczynnym) [5]

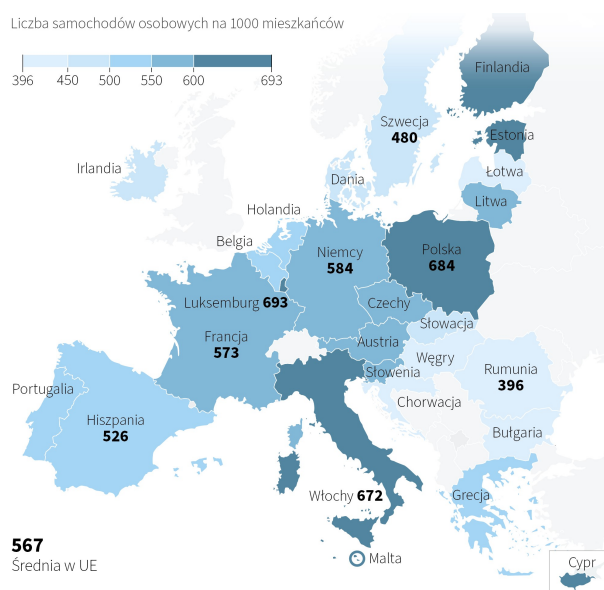
Dane wskazują, że pomimo zwiększenia popularności pojazdów elektrycznych, pojazdy konwencjonalne napędzane tradycyjnymi silnikami spalinowymi, wciąż dominują na rynku samochodowym w Unii Europejskiej. Wprowadzenie bardziej restrykcyjnych

norm emisji zanieczyszczeń, a także zaproponowana w dysertacji metoda kategoryzacji pojazdów mogą być kluczowe dla przyspieszenia transformacji w kierunku ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko naturalne motoryzacji.

Transport jest jednym z głównych sektorów gospodarki, który charakteryzuje się istotną emisją dwutlenku węgla. Według Parlamentu Europejskiego [6], prawie 30% całkowitej emisji na terenie Unii Europejskiej pochodzi właśnie z transportu, w tym aż 72% z transportu drogowego (gdzie samochody osobowe odpowiadają za 60,7% emisji dwutlenku węgla w transporcie drogowym). Dlatego zmniejszenie emisji z transportu o 60% do 2050 roku stało się jednym z głównych celów i wyzwań, jakie postawiono przed producentami nowoczesnych pojazdów [6] przez Unię Europejską.

Zgodnie z raportem [7] opublikowanym przez Polski Związek Przemysłu Motoryzacyjnego, liczba rejestracji nowych samochodów osobowych w Polsce w 2022 roku wyniosła 419,7 tysięcy, co stanowi spadek o 6% w porównaniu z poprzednim rokiem. Spośród tego zestawienia, klienci indywidualni zarejestrowali 121,6 tysięcy nowych pojazdów, co oznacza wzrost o 5,1% w stosunku do roku wcześniejszego. Natomiast liczba pojazdów zarejestrowanych przez klientów instytucjonalnych w minionym roku wyniosła 298,2 tysięcy, co odzwierciedla spadek o 9,9% w porównaniu z 2021 rokiem.

W raporcie odnotowano zwiększenie rejestracji pojazdów segmentów nisko- i zero-emisyjnych oraz pojazdów z segmentu premium. Ponadto, warto zaznaczyć, że Polska wyróżnia się na tle innych państw europejskich, jako jeden z nielicznych krajów, w których liczba samochodów osobowych na 1000 mieszkańców przekracza 650 (rys. 1.2). Średni wiek zarejestrowanych w kraju pojazdów wynosi 14,5 roku.



**Rysunek 1.2.** Liczba samochodów osobowych na 1000 mieszkańców (dane z 2021) [8]

Te dane wskazują na zmieniającą się dynamikę rynku samochodowego w Polsce. Pomimo ogólnego spadku liczby rejestracji nowych pojazdów, obserwuje się rosnący popyt ze strony klientów indywidualnych na nowe samochody. Ponadto, wzrost rejestracji pojazdów segmentów nisko- i zeroemisyjnych oraz pojazdów premium sugeruje, że zmiany zachodzące w preferencjach konsumenckich wpływają na wybór bardziej ekologicznych i ekskluzywnych pojazdów.

W ciągu ostatnich lat niezmiennie najpopularniejszym pojazdem poruszającym się po drogach jest samochód z wyłącznie spalinowym silnikiem. Głównym czynnikiem tego zjawiska jest dobry zasięg pojazdu. Taki rodzaj napędu sprawdza się szczególnie w podróży na dłuższych trasach, poza obszarem miejskim, gdzie infrastruktura stacji tankowania jest wystarczająca. Niemniej jednak, z perspektywy ekologii, zużycie paliwa (bezpośrednio związane z emisją dwutlenku węgla) oraz nadmierna emisja spalin związanych z tym rodzajem napędu, wymagają poszukiwania nowych rozwiązań. Tego typu innowacje umożliwią osiągnięcie coraz bardziej ambitnych celów ustawodawczych związanych z redukcją emisji zanieczyszczeń.

Jednym z proponowanych rozwiązań jest w pełni elektryczny samochód BEV (*Battery Electric Vehicle*), który wykorzystuje jeden lub więcej silników elektrycznych do napędu. Energia potrzebna do zasilania silnika jest magazynowana w akumulatorach. Pojazdy BEV charakteryzują się cichym i bezemisyjnym napędem, jednak ograniczona pojemność akumulatorów oraz czas ładowania sprawiają, że są głównie używane w obszarach miejskich.

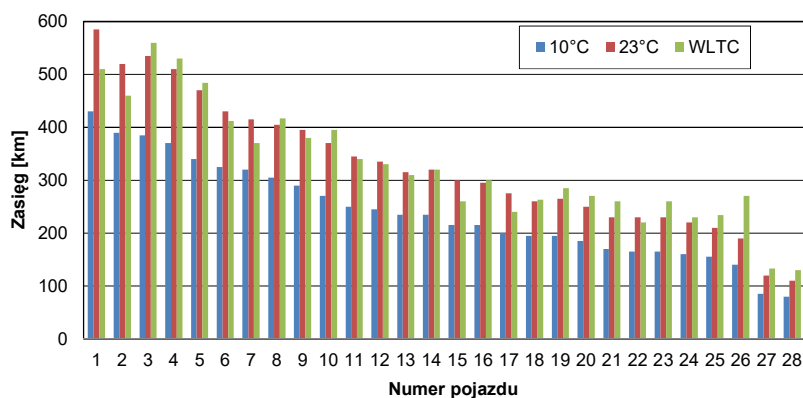
Alternatywnym rozwiązaniem jest hybrydowy samochód HEV (*Hybrid Electric Vehicle*), który wykorzystuje połączenie silnika spalinowego i elektrycznego do napędu. Możliwość korzystania z silnika spalinowego znacząco zwiększa zasięg tego pojazdu, co pozwala na używanie go nie tylko w miastach, ale także na dłuższych trasach poza obszarem miejskim i na autostradach.

Dodatkowo, rozwija się technologia pojazdów hybrydowych typu plug-in PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*), w których zastosowano akumulatory o większej pojemności elektrycznej. Takie pojazdy mogą być ładowane również z sieci energetycznej, co pozwala na ich użytkowanie zarówno w miastach, jak i na obszarach podmiejskich. Wprowadzenie tych różnorodnych rozwiązań napędowych daje możliwość dostosowania pojazdu do różnych warunków użytkowania, jednocześnie przyczyniając się do redukcji emisji zanieczyszczeń powietrza.

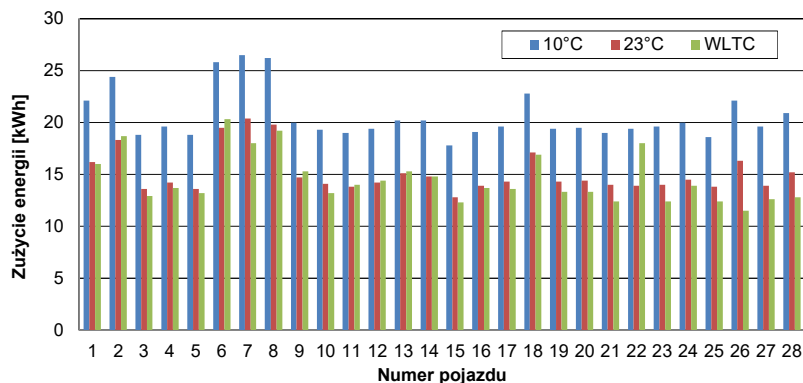
Powyższe opisy stosowanych na rynku napędów wskazują, że obecnie nie ma rozwiązania pozbawionego wad. Ciągły rozwój pojazdów BEV i PHEV przyczynia się do zwiększenia ich zasięgu, jednakże uzyskiwane wartości wciąż są dalekie od możliwości silników spalinowych. Na rysunku 1.3a porównano zasięg i zużycie energii przykładowych pojazdów elektrycznych [9]. Uzyskane dane wskazują na znaczące różnice między zasięgiem pojazdów elektrycznych w zależności od temperatury zewnętrznej, w

której są użytkowane. Dla temperatury otoczenia mniejszej niż  $10^{\circ}\text{C}$  zasięg jest mniejszy o około 30% w porównaniu do temperatury otoczenia wynoszącej  $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$ . Zasięg pojazdów elektrycznych jest bardzo zróżnicowany i zależy głównie od pojemności energetycznej zastosowanego akumulatora oraz masy pojazdu. Jednak zużycie energii w podobnych testach drogowych (rys. 1.3b) oscyluje w stałych granicach – około 20 kWh dla testu w temperaturach około  $10^{\circ}\text{C}$  oraz 15 kWh dla testów w temperaturze około  $25^{\circ}\text{C}$  oraz testów homologacyjnych WLTC (*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle*).

a)



b)



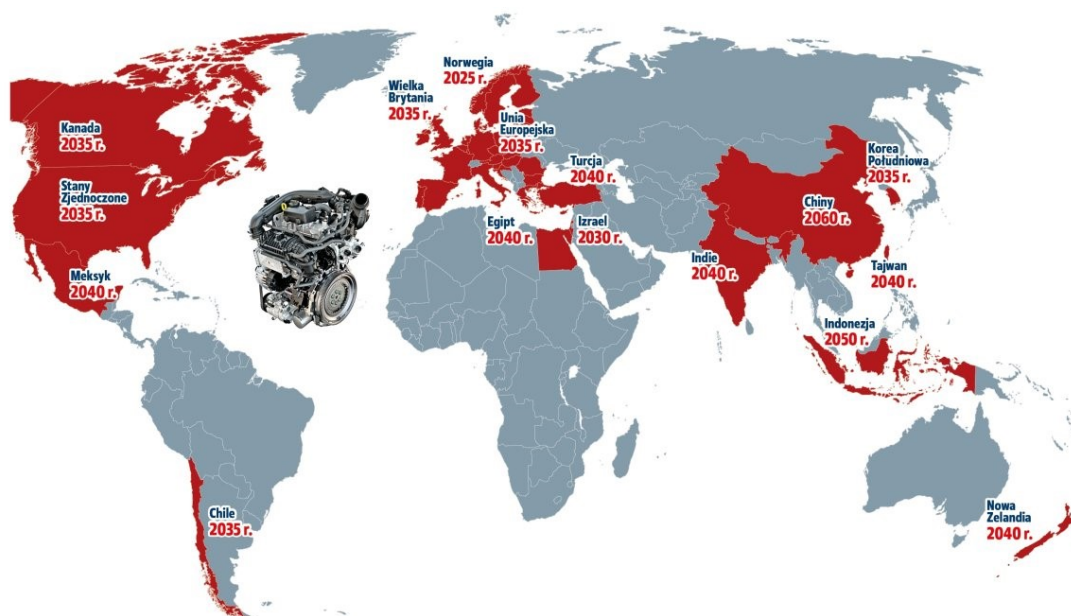
**Rysunek 1.3.** Porównanie zasięgu (a) oraz zużycia energii (b) pojazdów w zależności od temperatury zewnętrznej w stosunku do testu homologacyjnego [9]

W kierunku osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 roku, Unia Europejska podejmuje działania w celu ograniczenia emisji z pojazdów. Wsparcie Parlamentu Europejskiego dla propozycji Komisji Europejskiej dotyczącej wprowadzenia zerowej emisji z nowych samochodów osobowych i dostawczych do 2035 roku wyznacza istotny krok w tej strategii. Zakłada się osiągnięcie pośrednich celów redukcji emisji do 2030 roku na poziomie 55% dla samochodów osobowych i 50% dla pojazdów dostawczych.

Wprowadzenie ograniczenia używania silników spalinowych od 2035 roku będzie miało istotny wpływ na rynek motoryzacyjny. Prognozuje się, że liczba nowych pojazdów z silnikami spalinowymi zmniejszy się o 23 miliony, a 41 milionów pozosta-

łych nadal będzie sprzedawane z jednostkami spalinowymi lub jako pojazdy z napędem hybrydowym, które korzystają z silników spalinowych w połączeniu z innymi źródłami energii.

Proces eliminacji silników spalinowych będzie kontynuowany, aż do osiągnięcia globalnego zakazu stosowania tych jednostek. Prognozuje się, że w 2060 roku, zakaz ten obejmie 50,1 milionów pojazdów. Wówczas tylko 13,9 milionów nowych samochodów będzie w dalszym ciągu napędzanych silnikami korzystającymi z paliw kopalnych [10]. Wprowadzone środki i cele redukcji emisji mają na celu znacząco zmniejszyć wpływ transportu na zmiany klimatu i przyspieszyć transformację branży motoryzacyjnej w kierunku bardziej zrównoważonych rozwiązań. Na rysunku 1.4 przedstawiono prognozowany rozwój tego procesu w kolejnych dekadach [10].



**Rysunek 1.4.** Zakazy sprzedaży samochodów z silnikiem spalinowym [10]

W Chinach, które stanowią zarówno największy rynek samochodowy na świecie, jak i największego emitera dwutlenku węgla, podejmuje się działania mające na celu zrównoważenie ekspansji motoryzacji z ochroną środowiska. Od 2035 roku planuje się, aby połowa wszystkich nowych samochodów wprowadzanych na rynek należała do kategorii "new energy vehicles" (pojazdy elektryczne, wodorowe oraz hybrydy typu plug-in) [11]. Pozostałe 50% pojazdów może stanowić zwykłe hybrydy, w których nadal będzie możliwe połączenie silnika spalinowego z elektrycznym.

Pojazdy elektryczne, mimo braku lokalnej emisji związków szkodliwych spalin wciąż nie są ekologicznym rozwiązaniem. Badania [12] sugerują, że pojemność baterii stanowi zasób, który powinien być lepiej rozdzielany pomiędzy większą liczbę pojazdów hybrydowych, niż mniejszą w pojazdach elektrycznych, aby obniżyć emisję CO<sub>2</sub>



w cyklu życia transportu do 2030 roku. Autorzy podkreślają, że pojazdy z napędem hybrydowym przeważają nad elektrycznymi, w kontekście emisji pośrednich. Wynika to z nadmiernie dużej pojemności baterii w pojazdach elektrycznych, co prowadzi do zbędnego obciążenia, obniżenia efektywności energetycznej i zwiększonych emisji. Dlatego ważne jest lepsze wykorzystanie pojemności baterii przez większą liczbę jednostek hybrydowych, zwłaszcza tych z ulepszonymi silnikami spalinowymi, co przyczyni się do redukcji emisji CO<sub>2</sub> na cykl życia pojazdów drogowych w nadchodzącej dekadzie. W artykule [13] autorzy podkreślają negatywny wpływ pojazdów elektrycznych na środowisko, włączając w to pośrednie emisje gazów cieplarnianych z produkcji baterii i zanieczyszczenia związane z produkcją energii. Autorzy argumentują, że aby pojazdy elektryczne mogły skutecznie zwalczać zanieczyszczenie powietrza, energia elektryczna powinna być produkowana z odnawialnych źródeł. W pracy [14] podkreśla się znaczenie korzystania z odnawialnych źródeł energii dla pojazdów elektrycznych, aby rzeczywiście zmniejszyć emisje, ponieważ elektryczność pochodząca z paliw kopalnych może prowadzić do wyższych emisji niż w przypadku samochodów konwencjonalnych.

W związku z tym na potrzeby pracy doktorskiej grupą badanych pojazdów były przede wszystkim pojazdy z napędem hybrydowym, które dzięki dwóm źródłom napędu stanowią pośrednie rozwiązanie, pomiędzy elektrycznymi a konwencjonalnymi pojazdami.

Mimo wprowadzenia zakazów sprzedaży pojazdów spalinowych w niektórych krajach, globalny rynek samochodów konwencjonalnych pozostanie nadal dostępny. Jednak wraz z kolejnymi zakazami sprzedaży tego typu pojazdów w różnych regionach, ich udział na rynku będzie stopniowo maleć. Istnieje jednak znaczny potencjał w pojazdach o różnych rodzajach napędów – od konwencjonalnych przez hybrydowe po elektryczne – do ograniczenia obciążenia środowiska.

Przedstawiona praca doktorska zawiera kompleksową ocenę ekologiczną wspomnianych rodzajów napędów, skupiając się szczególnie na pojazdach hybrydowych, które stanowią technologię pozwalającą na skuteczną transformację napędów w motoryzacji. Analiza ta jest skoncentrowana na emisji zanieczyszczeń (lub zużycia energii) wyłącznie w testach drogowych, które są uznawane za odzwierciedlenie rzeczywistej eksploatacji pojazdów. Podjęcie tematyki oceny pojazdów w drogowych testach emisyjnych wynika z rosnących oczekiwań społecznych dotyczących dokładnego podawania informacji na temat emisji pojazdów samochodowych. Wiele razy podniesiono zarzuty, że testy emisyjne, zwłaszcza testy homologacyjne, nie odzwierciedlają rzeczywistej emisji zanieczyszczeń z pojazdów, a podawane informacje o zużyciu paliwa znacząco odbiegają od rzeczywistych wartości uzyskiwanych podczas eksploatacji pojazdów. Badania RDE, przeprowadzane na drogach publicznych, umożliwiają testowanie pojazdów w realistycznych warunkach ruchu drogowego, uwzględniających różnorodność tras,

prędkości i sytuacje drogowe, co znacząco lepiej oddaje rzeczywiste warunki eksploatacji niż kontrolowane testy laboratoryjne, takie jak NEDC (NEDC - *New European Driving Cycle*) czy WLTC (WLTC - *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle*) na hamowniach. RDE uwzględnia także zmienne warunki atmosferyczne, niezależnie od określonych warunków pogodowych, co pozwala na ocenę wpływu czynników, takich jak deszcz, śnieg czy temperatura na emisję i zużycie paliwa – aspekty te są istotne, ze względu na ich wpływ na zachowanie pojazdów na drogach. Dodatkowo, badania RDE biorą pod uwagę różnorodność stylów jazdy kierowców, co uwzględnia indywidualne nawyki i style jazdy, które mogą wpływać na emisję spalin i zużycie paliwa. Jest to trudne do uwzględnienia w testach laboratoryjnych, gdzie warunki są ustandaryzowane. Warto podkreślić, że badania RDE pozwalają również na lepsze zrozumienie eksploatacji pojazdów w rzeczywistym ruchu, co ma istotne znaczenie z perspektywy oceny ich wpływu na środowisko naturalne oraz zdrowie publiczne. Badania te są bardziej reprezentatywne dla codziennego użytkowania pojazdów niż testy laboratoryjne, co przekłada się na ich większą miarodajność. Takie podejście pozwala na realną ocenę wpływu poszczególnych rodzajów pojazdów na środowisko naturalne. To może pomóc w podejmowaniu przyszłych decyzji dotyczących strategii ekologicznej motoryzacji.

## 2. Problematyka, cel i zakres rozprawy

Dla transportu samochodowego, prawodawstwo Unii Europejskiej na lata 2021–2025 ograniczyło emisję dwutlenku węgla do poziomu 95 g/km dla nowych pojazdów w flocie producenta [15, 16]. Od 2025 roku planowane jest zmniejszenie tego limitu o 15%, a od 2030 roku – o 37,5% [17]. Normy emisji spalin ustalane są na całym świecie w celu kontroli emitowanych zanieczyszczeń z pojazdów samochodowych. Wartości emisji spalin są mierzone w warunkach w ustalonym teście homologacyjnym obowiązującym dla danego obszaru/państwa/wspólnoty.

W celu ograniczenia emisji zanieczyszczeń z pojazdów od 2019 roku wprowadzono normę Euro 6 [18, 19], a homologacyjny test badawczy NEDC (*New European Driving Cycle*) [20], zastąpiono testem WLTC (*Worldwide harmonized Light duty vehicles Test Cycle*) [20]. Test WLTC miał w sposób bardziej wiarygodny odwzorowywać rzeczywiste warunki użytkowania samochodów osobowych. Zmiana ta nie spowodowała zmniejszenia różnic w uzyskiwanych wynikach emisji w testach homologacyjnych i ruchu drogowym. Przykładem są tutaj większe wartości emisji tlenków azotu, cząstek stałych oraz tlenku węgla dla pojazdów zasilanych silnikami ZS [21–24]. Jest to spowodowane przede wszystkim warunkami drogowymi, zachowaniem na drodze, warunkami środowiskowymi i udziałem poszczególnych faz trasy [28, 26]. Aby uwzględnić różnice między testami homologacyjnymi, a warunkami drogowymi od 2017 roku wprowadzono procedurę badań w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego (RDE). Wartości limitów oparto na wskaźniku *conformity factor* (CF) [27], który dla  $\text{NO}_x$  wynosił 1,5 (Euro 6d-temp) [28], a w kolejnej normie (Euro 6d) wynosi  $\text{CF}_{\text{NO}_x} = 1,43$  oraz  $\text{CF}_{\text{PN}} = 1,5$  [29]. Na posiedzeniu 5 lipca 2022 roku Komitetu Technicznego Komisji Europejskiej ds. Pojazdów Silnikowych (TCMV – *Technical Committee on Motor Vehicles*) zatwierdzono zmiany do rozporządzenia UE 2017/1151 w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji z samochodów osobowych [29]. Od września 2023 roku dodany jest nowy etap Euro 6e, który wprowadza zmiany do procedury testowej RDE. Nowe rozporządzenie redefiniuje współczynniki zgodności. Wartości zostały zmniejszone zgodnie ze sprawozdaniem JRC z 2021 roku w sprawie współczynników zgodności [31]. Norma Euro 6e obejmuje skorygowany wskaźnik  $\text{CF}_{\text{NO}_x} = 1,10$  (zmniejszenie z 1,43) oraz obniżony wskaźnik  $\text{CF}_{\text{PN}} = 1,43$  (zmniejszenie z 1,5). Współczynnik CO w testach emisyjnych odnosi się do ilości tlenku węgla (CO) emitowanego przez pojazd silnikowy podczas spalania paliwa. W najnowszej normie, obowiązuje limit 1,0 g/km dla silników benzynowych oraz 0,5 g/km dla pojazdów o zapłonie samoczynnym.

Biorąc pod uwagę politykę zrównoważonego rozwoju oraz sytuację na rynku motoryzacyjnym, istnieje potrzeba rzetelnego podejścia do oceny, nie tylko zużycia paliwa, ale również emisji szkodliwych substancji podczas rzeczywistego użytkowania pojazdów. Szczegółowe badania są niezbędne w obliczu rosnącej liczby danych wpływających na eksploatację pojazdów, w celu odpowiedniego ich wyboru przez klientów czy też realizacji polityki transportowej i kierowania ruchem. Przykładem jest ocena energetycznego zapotrzebowania pojazdów elektrycznych i hybrydowych, gdzie konieczne jest wzięcie pod uwagę warunków zewnętrznych w celu dokładnego określenia tego parametru.

Wdrożenie bardziej realistycznych testów emisyjnych oraz ocena efektywności energetycznej pojazdów elektrycznych i innych pojazdów z zaawansowanymi napędami są nie tylko ważne z perspektywy ekologicznej, ale także mają kluczowe znaczenie dla kształtowania bardziej zrównoważonej przyszłości motoryzacji. Dążenie do precyzyjnych i rzetelnych danych emisyjnych oraz zużycia paliwa w rzeczywistych warunkach użytkowania pojazdów jest nieodłącznym elementem tworzenia polityk proekologicznych oraz zachęcania do wyboru przyjaznych środowisku rozwiązań transportowych.

Takie postępowanie dotyczące restrykcyjnego poglądu na emisję spalin miało również wpływ na sformułowanie ogólnego nurtu badawczego pracy, którym była ocena środowiskowa (m.in. pod względem emisji spalin, ale również zużycia energii) pojazdów samochodowych różnych kategorii w warunkach drogowych. Na tej podstawie sformułowano cel pracy:

**Celem rozprawy jest ocena emisji spalin pojazdów samochodowych z różnymi układami napędowymi w warunkach ruchu drogowego, obejmująca zastosowanie procedur homologacyjnych, ich autorskiej skróconej wersji, a także zdefiniowanie kategoryzacji emisyjnej pojazdów.**

Na podstawie przedstawionej genezy i problematyki zdefiniowano zadania badawcze, podzielone na trzy etapy:

**Etap 1:** Określenie rzeczywistego poziomu emisji spalin (lub zużycia energii) dla pojazdów najbardziej reprezentatywnych w grupie samochodów osobowych oraz tych, które są w kręgu zainteresowań przyszłych klientów.

**Etap 2:** Dla określonego poziomu wyjściowego emisji spalin wyznaczono wartości minimalne i maksymalne, które są możliwe do osiągnięcia w teście drogowym; jest to odpowiedź na pytanie: czy testy drogowe odzwierciedlają rzeczywisty poziom emisji spalin i jakie są możliwe do osiągnięcia najmniejsze wartości emisji drogowej poszczególnych związków szkodliwych. To działanie posłużyło do zaproponowania kategoryzacji badanych pojazdów hybrydowych.

**Etap 3:** Porównanie wartości emisji drogowej związków szkodliwych spalin w testach drogowych obecnie obowiązujących z wartościami możliwymi do uzyskania w zmienionych testach drogowych zaproponowanych przez Autorkę, które są przewidywane do wprowadzenia w przyszłości.

Przedstawiony nurt badawczy pozwolił na sprecyzowanie **celów cząstkowych**:

- Ocena emisji spalin i energochłonności samochodów osobowych o różnych układach napędowych (konwencjonalny, pojazdy hybrydowe i elektryczny) podczas ich rzeczywistej eksploatacji.
- Opracowanie procedury według której można ocenić, czy wykonany jezdny test emisyjny dla pojazdu jest wiarygodny, a jednocześnie wskazać przedział prawdopodobieństwa spełnienia wymagań w ruchu drogowym. Zadanie takie jest zbieżne z zadaniami optymalizacyjnymi, w których należy określić wartości ekstremalne, a także wyznaczyć wskaźniki, do których należy porównywać uzyskane wyniki emisyjne. W pracy wprowadzono wartościowanie pojazdów w testach drogowych, na podstawie którego ułatwione jest szacowanie klasy ekologicznej pojazdu (tzw. kategoryzacja pojazdów). Procedurę taką zaprezentowano dla pojazdów typu hybrydowego plug-in, ze względu na dwa źródła napędu, a więc zastosowano uniwersalność procedury.
- Określenie wpływu zapowiadanych zmian w odniesieniu do procedury RDE (m.in. skrócenie testów emisyjnych) na wyniki emisji spalin pojazdów samochodowych, a jednocześnie określenie wpływu zwiększonego udziału fazy zimnego rozruchu w tych testach na emisję związków szkodliwych spalin.

Wprowadzenie wartościowania emisji spalin w testach drogowych, oparte na kategoryzacji i uzależnieniu od rozkładu prawdopodobieństwa osiągniętych wyników, stanowi nowe i nierozwiązane zagadnienie w kontekście oceny emisji spalin w trakcie testów drogowych. Wykorzystanie takiej innowacyjnej metody pozwoliło na oszacowanie ekstremalnych wyników emisji spalin dla danego pojazdu, uwzględniając dopuszczalne rozrzuty wyników testów drogowych. To podejście wymagało wykorzystania matematycznego aparatu optymalizacyjnego w celu wyznaczenia wartości minimalnej i maksymalnej emisji spalin oraz zużycia paliwa. Następnie sformułowano możliwość osiągnięcia takich wyników dla pojazdów o określonych źródłach napędu.

### **3. Możliwości oceny emisji spalin z pojazdów samochodowych – przegląd literatury**

#### **3.1. Zagadnienie oceny emisji spalin dla pojazdów samochodowych w drogowych testach jezdnych**

W ciągu ostatnich lat, badania emisji zanieczyszczeń w zakresie rzeczywistej eksploatacji pojazdów (RDE) oraz pomiary zużycia paliwa stały się kluczowym elementem analizy ekologicznej pojazdów. Metodologia badań RDE jest uznawana za skuteczną w uzyskiwaniu wiarygodnych danych dotyczących emisji spalin, które są zależne od niemal wszystkich parametrów eksploatacyjnych pojazdów i ich napędów. W związku z tym, coraz więcej prac naukowych skupia się na wartościach zużycia paliwa oraz procedurach badawczych, w tym porównaniach cykli badań dla silników spalinowych [32]. Ta rozwijająca się dziedzina badań przyczynia się do coraz lepszego zrozumienia wpływu pojazdów na środowisko oraz umożliwia dokładniejszą ocenę poziomu emisji spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

Zmniejszanie emisji spalin z pojazdów stało się kluczowym obszarem zainteresowania wielu badaczy w ostatnich latach. Analizują oni różne zmiany konstrukcyjne silników, zwłaszcza dla silników ZS [33], aby przewidzieć procentowe zmiany w emisji z pojazdów [34, 35]. Inni naukowcy, jak np. Winkler i jego zespół [36], skupiają się na pytaniu, do jakiego poziomu można zredukować emisję szkodliwych związków w spalinach z różnych źródeł. Zgodnie z wnioskami tych badań, redukcja emisji z innych źródeł niż transport, takich jak wytwarzanie energii, ogrzewanie domów, czy sprzęt terenowy, może mieć większy wpływ na jakość powietrza niż zmniejszanie emisji z pojazdów. To wskazuje na kompleksowy charakter problemu i konieczność podejmowania działań na wielu frontach, w celu poprawy jakości powietrza i ochrony środowiska.

Badania dotyczące emisji spalin z pojazdów samochodowych zostały przeprowadzone w różnych krajach, wykorzystując różnorodne urządzenia pomiarowe. Wykonywano je również w różnorodnych warunkach atmosferycznych oraz na różnych trasach badawczych. Wyznaczanie końcowych wartości emisji spalin również odbywało się z użyciem różnych metod pomiarowych: niektórzy autorzy stosowali metodę bezpośrednią (emisja = masa / dystans), podczas gdy inni korzystali z metody MAW (*Moving Averaging Windows*) [37]. Przykłady badań pojazdów w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego różnych autorów zajmujących się tą tematyką z wykorzystaniem aparatury PEMS (PEMS - *Portable Emissions Measurement Systems*) podano w dalszej czę-

ści rozdziału. Jednocześnie w zakończeniu tych rozważań wykonano tabelaryczne podsumowanie w odniesieniu również do wymagań prawnych przepisów dotyczących badań RDE.

Wang z zespołem [38] przeprowadził badania 39 pojazdów (18 – emission class China-5, 21 – emission class China-6, w tym 6 pojazdów hybrydowych), głównie pod kątem emisji spalin w zależności od warunków dynamicznych testów (RPA (RPA - *Relative Positive Acceleration*) oraz 95-procentowy centyl iloczynu prędkości i dodatniego przyspieszenia). Obliczeń dokonano z wykorzystaniem algorytmu MAW, a uzyskane wyniki CF dotyczące emisji tlenków azotu i liczby cząstek stałych ( $CF < 2,1$ ) świadczą o spełnieniu wymagań ekologicznych badanych pojazdów. Stwierdzono proporcjonalną zależność między emisją drogową  $NO_x$  i PN, a względnym przyspieszeniem dodatnim oraz 95. centylem iloczynu prędkości i dodatniego przyspieszenia.

Suarez-Bertoa z zespołem [39] badał 19 pojazdów pod kątem emisyjnym o różnych napędach (ZI, ZS, CNG) na czterech trasach badawczych (Włochy), a tylko dwie z nich były zgodne z wymaganiami RDE. W podsumowaniu stwierdzono, że pojazdy z silnikiem ZS (Euro 6d-temp) wykazują znacznie mniejszą emisję  $NO_x$  niż wcześniejsze pojazdy z silnikiem ZS (Euro 6) w testach zgodnych z RDE oraz w niektórych testach nie spełniających procedury RDE. Zwrócono uwagę, że znacznie większe wartości emisji spalin podczas testów dynamicznych (również dla silników benzynowych) wskazują, że istnieje konieczność ich zmniejszenia.

W badaniach Prati i innych [40] obiektem badawczym był pojazd hybrydowy (z silnikiem ZI), w którym badano emisję spalin oraz zużycie energii elektrycznej w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego (Włochy). Badania prowadzono dla różnych stopni naładowania akumulatora oraz przy włączonej i wyłączonej klimatyzacji (5 kombinacji, powtarzane dwukrotnie). Wykorzystano dwie trasy badawcze (zgodną z wymaganiami RDE oraz trasę miejską). Tylko połowa badań podczas testu spełniała wymagania odnoszące się do warunków dynamicznych testu. Stwierdzono, że w zależności od stopnia naładowania akumulatora (SOC (SOC - *State Of Charge*) = 15–80%) uzyskuje się maksymalne różnice w wartościach emisji spalin i zużyciu energii w zakresie od 35% do 40%. Włączenie klimatyzacji skutkuje zwiększonym zużyciem paliwa w trybie hybrydowym o 28%.

Pignatta i Balazadeh [41] w badaniach w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego wykorzystali 6 samochodów (Euro 4) na 4 trasach badawczych. Jednakże wydaje się, że uzyskane wyniki odnoszą się tylko i wyłącznie do charakterystyki tras badawczych wybranych przez autorów. Trasy o długości 2,2 km oraz 6,9 km nie pozwalają porównywać wyników emisji spalin, a jednocześnie autorzy porównywali jedynie okres pracy gorącego silnika. Uzyskane wyniki i ich rozrzut na różnych trasach badawczych w przypadku emisji tlenków azotu wynosił aż 300%, a dokładność pomiarowa wynosiła  $\pm 30\%$  uzyskiwanych wartości.

Badania prowadzone przez Sarkan i innych [42] potwierdzają zwiększoną emisję spalin w pojazdach starszych (Euro 4), a jednocześnie wskazują na znacznie większą emisję tlenków azotu w przypadku zmiany systemu zasilania z benzynowego na LPG (*Liquefied Petroleum Gas*). Wyniki badań podane przez autorów świadczą o ponad 3-krotnym zwiększeniu emisji  $\text{NO}_x$  w teście RDE podczas zasilania gazem LPG. Emisja drogowa pozostałych składników spalin była podobna w przypadku zasilania benzyną i LPG.

Autorzy w publikacji [43] porównali 13 lekkich pojazdów Euro 6b (8 z silnikami ZS i 5 z silnikami ZI) zarówno w laboratorium na hamowni podwoziowej, jak i w warunkach drogowych z wykorzystaniem PEMS. Z kolei autorzy publikacji [44] podjęli próbę określenia źródeł różnicowania wyników zużycia paliwa uzyskanych w laboratorium i w teście drogowym. W tym celu monitorowali zużycie paliwa przez jeden pojazd w ciągu roku, wykorzystując do tego 20 różnych kierowców. Autorzy prac [45, 46] również skupili się na badaniu emisji spalin z samochodów osobowych napędzanych silnikami spalinowymi. Zwrócili uwagę na konieczność uwzględniania emisji z zimnego rozruchu podczas jazdy w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego. Autorzy pracy [47] przedstawili przegląd europejskich przepisów dotyczących samochodów osobowych. Skupiały się one na relacjach między rzeczywistą emisją zanieczyszczeń z jazdy, a lokalną jakością powietrza. Badanie to jest poprawne głównie w odniesieniu do pojazdów z napędem konwencjonalnym; pokazuje jednak potrzebę opracowania alternatywnych rozwiązań, zwłaszcza w Europie.

Niestety, nadal jest zbyt mało takich porównań dla hybrydowych pojazdów elektrycznych (HEV), hybrydowych pojazdów elektrycznych typu plug-in (PHEV) i pojazdów elektrycznych (EV). W pracy [31] autorzy określili zużycie paliwa i emisję spalin przez lekkie pojazdy konwencjonalne i hybrydowe z napędem elektrycznym w różnych cyklach jazdy. Autorzy [48] badali dwa pojazdy z napędem hybrydowym z napędem benzynowym w warunkach laboratoryjnych o różnych cyklach i trybach jazdy oraz w temperaturach letnich i zimowych. Zaobserwowali oni, że wartości emisji dwutlenku węgla są wyższe niż w przypadku pojazdów z silnikiem spalinowym. Niektóre specyficzne, wybierane przez użytkownika tryby jazdy i wymagające wzorce jazdy, szczególnie w niższych temperaturach otoczenia, mogą prowadzić do nadmiernych wyników emisji spalin w ramach homologacji typu.

Zagadnienie zapotrzebowania energetycznego pojazdów elektrycznych jest niezwykle ważne, ze względu na małą pojemność elektryczną akumulatorów – a co za tym idzie małym zasięgiem tych samochodów. Autorzy Modi i inni w publikacji [9] zajęli się oszacowaniem zużycia energii w czasie rzeczywistym, tak aby określić zasięg pojazdu wykorzystując sieć neuronową. Opracowano rozwiązanie oparte na sieciach neuronowych do wyznaczania zużycia energii przez pojazdy elektryczne z uwzględnieniem trzech parametrów zewnętrznych: wzniesienia drogi, siły i prędkości pojazdu. W prze-



ciwieństwie do poprzednich metod, które wymagają albo danych producenta, albo danych rzeczywistych, które wymagają zastosowania specjalnych czujników na pojazdach elektrycznych, proponowane podejście wymaga tylko trzech parametrów, które można łatwo uzyskać, przez co oszacowanie zużycia energii w pojazdach elektrycznych może być łatwiejsze. Burski i inni w pracy [49] przedstawili wyniki badań terenowych oceniających zużycie energii w pojazdach na terenie wybranych krajów Unii Europejskiej: Polski, Niemiec oraz Francji. Z danych otrzymanych przez autorów wynika, że na autostradach w różnych państwach powierzchnia strat energii kinetycznej jest różna ze względu na różnice w infrastrukturze transportowej. Wpływa to bezpośrednio na zasięg pojazdu elektrycznego. Problemem planowania tras dla flot elektrycznych pojazdów zajęli się Basso i inni w pracy [50]. Przedstawili oni metodę dokładnego szacowania zużycia energii oraz projektowania przewozów tak, by uwzględnić niezbędny czas na ładowanie pojazdu. W artykule zastosowano dwuetapowe podejście integrujące znajdowanie oraz planowaniem tras. Wyniki pokazują, że szacowanie energii i czasu, które przedstawiono przez autorów, jest dokładniejsze niż istniejące metody.

W artykule [51] oszacowano potencjalne zapotrzebowanie energetyczne dla pojazdów elektrycznych na podstawie modelu obejmującego zużycie energii w warunkach ruchu drogowego. Publikacja [52] zawiera badania, w jaki sposób efektywność energetyczna pojazdu EV zależy od stylu jazdy kierowcy oraz infrastruktury w rzeczywistych warunkach ruchu. Przedstawiona analiza nie jest w stanie odróżnić wpływu środowiska fizycznego (powtarzające się zatony, krzywizny drogi) od wpływu stylu jazdy specyficznego dla danej osoby. Mimo, iż badanie nie skupiało się bezpośrednio na analizie zachowań kierowców związanych z ekologiczną jazdą, autorzy stwierdzają, że ekologiczna jazda może mieć znaczący wpływ na zużycie energii w pojazdach elektrycznych. Noura i inni [53] porównali zużycie energii samochodu o zapłonie samoczynnym oraz samochodu elektrycznego. Z badań wynika, że wydajność pojazdu elektrycznego jest trzy razy większa, niż dla pojazdu o napędzie konwencjonalnym.

Podobną tematyką, ale w ujęciu bardzo szerokiego zakresu badań, zajęto się w ramach projektu Initial Green Vehicle Index Roadmap [54], gdzie założeniem było opracowanie podstaw do całościowej oceny pojazdów pod względem emisji związków szkodliwych, zużycia paliwa oraz energii. Projekt podzielony na etapy w latach 2019–2030 zakładał badania emisji spalin w testach homologacyjnych (NEDC, WLTC i RDE) i na tej podstawie klasyfikację pojazdów w skali 10-stopniowej dwóch indeksów Clean Air Index i Energy Efficiency Index, co przekładałoby się na ocenę od zera do 5 gwiazdek.

W badaniach nad emisją spalin, zużyciem paliwa oraz energetycznymi aspektami pojazdów, istnieje kluczowa potrzeba uwzględnienia ich warunków eksploatacji. Metodologia badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji stanowi niezbędny element analizy ekologicznej pojazdów, , uwzględniając szeroki zakres parametrów eksploatacyjnych

i konstrukcyjnych obiektów. Jednakże, badacze podkreślają również konieczność uwzględnienia innych źródeł emisji, takich jak wytwarzanie energii czy ogrzewanie domów, które mogą mieć znaczący wpływ na jakość powietrza.

Mimo, że badania nad emisją pojazdów są prowadzone w różnych warunkach i przy użyciu różnych metod pomiarowych, istnieje potrzeba dalszych prac, dających możliwość porównań między różnymi typami napędów, takimi jak hybrydowe pojazdy elektryczne, hybrydowe pojazdy typu plug-in i konstrukcje elektryczne. Ponadto, zapotrzebowanie energetyczne pojazdów elektrycznych jest tematem kluczowym, zwłaszcza w kontekście ograniczonej pojemności akumulatorów, a styl jazdy kierowcy może mieć istotny wpływ na zużycie energii. W związku z tym, podejmowany w rozprawie obszar badań stanowi istotny wkład w rozwijające się dyskusje nad ekologicznymi właściwościami pojazdów oraz może dostarczyć ważnych informacji do kontekstu kategoryzacji pojazdów pod względem ich wpływu na środowisko.

### **3.2. Trendy zmian w pomiarach emisji spalin w warunkach drogowych**

Normy emisji spalin są ustanawiane prawie na całym świecie w celu kontroli ilości emitowanych zanieczyszczeń przez pojazdy samochodowe. Wartości emisji spalin są mierzone w określonych warunkach testu homologacyjnego, który jest częścią procesu certyfikacji pojazdu i odpowiada za ocenę jego właściwości ekologicznych. Test ten jest jednakowy w konkretnych obszarach/państwach dla wszystkich samochodów osobowych z danym rodzajem napędu, co umożliwia porównywanie uzyskanych wyników między nimi.

Badania drogowe stają się coraz bardziej istotne w procesie homologacji i skupiają się na wykonywaniu pomiarów emisji spalin w rzeczywistych warunkach ruchu [55–59]. Takie działania pozwalają lepiej odzwierciedlić rzeczywiste warunki eksploatacji pojazdu pod kątem aspektów ekologicznych. Mimo, że testy drogowe muszą spełniać określone wymagania, pozwalają na pewną elastyczność, co powoduje, że wyniki mogą wykazywać pewien stopień rozrzutu, chociaż spełniają one normy testów homologacyjnych.

W artykule [58] przeprowadzono analizę jakościową i ilościową emisji związków szkodliwych spalin w różnych testach badawczych. Autorzy zauważyli, że wartości względnej emisji drogowej zależą bardziej od dystansu testu niż od czasu jego trwania. Wyniki uzyskane w różnych testach drogowych są głównie zależne od jego rodzaju i są większe w krótszych testach w porównaniu z procedurą RDE. Analiza ta potwierdziła również, że istnieje możliwość skrócenia testów drogowych o około 20%, bez znaczą-

cego wpływu na wyniki emisji związków szkodliwych. Jest to dowód na rosnące znaczenie wyników testów drogowych, które muszą być weryfikowane pod kątem zarówno parametrów statycznych, jak i dynamicznych.

Autorzy raportu [43] wykonali badania emisji spalin w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego 11 samochodów (ZI, ZS) na 22 trasach zgodnych z RDE oraz 41 trasach niezgodnych z wymaganiami RDE. Uzyskane wyniki emisji drogowej  $\text{NO}_x$  i PN były zbliżone do siebie (z błędem 10%) niezależnie od rodzaju napędu i testu drogowego. Jednak uwzględnienie tylko zimnego rozruchu silnika uwidacznia duże rozbieżności: dla silnika ZS zmienność liczby cząstek stałych to zakres  $2 \cdot 10^9$ – $5 \cdot 10^{11}$  1/km, a zakres zmienności  $\text{NO}_x$  to 400–650 mg/km. Dla silnika ZI podczas testu RDE uwzględniającego zimny rozruch zakres zmienności PN to  $5 \cdot 10^{12}$ – $10 \cdot 10^{12}$  1/km, a  $\text{NO}_x$  to 20–80 mg/km. Największe wartości dotyczą testów niezgodnych z procedurą RDE, jednakże autorzy nie podają szczegółów dotyczących tych testów.

Gebisa z zespołem [59] w przeglądowym artykule określili główne czynniki, które wpływają na niepoprawność opracowywanych testów badawczych w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego. Przeanalizowali dane kilkudziesięciu autorów dotyczących badań emisyjnych w różnych testach laboratoryjnych i drogowych. Stwierdzili, że głównym czynnikiem mającym wpływ na znaczące różnice w emisji spalin między wynikami w teście WLTC oraz wynikami uzyskiwanymi w rzeczywistych warunkach była:

- charakterystyka lokalnych trasy badawczych,
- mała próbka danych badawczych zebrana z małej populacji samochodów,
- zbyt małe różnice między poszczególnymi fazami trasy badawczej.

W większości przypadków wartości emisji zanieczyszczeń w testach drogowych przekraczały wartości uzyskiwane na hamowni podwoziowej, a głównymi wskazanymi czynnikami były:

- niska temperatura otoczenia,
- zróżnicowane nachylenie drogi,
- podobieństwo udziału faz w teście,
- zróżnicowane warunki dynamiczne,
- wykorzystywanie innych algorytmów obliczeniowych (MAW, dane bez obróbki),
- niepewność pomiarowa użytych przyrządów.

W raporcie „Real Driving Emission and Fuel Consumption” Rosenblatt z zespołem [60] opisuje badania emisji spalin pojazdów wykonane w latach 2010–2019 na grupie kilkuset samochodów osobowych (zasilanych różnymi paliwami). Badania wykonywano w warunkach laboratoryjnych w testach badawczych, ale także porównawczo, w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego. Konkluzją artykułu jest stwierdzenie, że kluczowy jest właściwy wybór testu badawczego, który odzwierciedli rzeczywiste zachowanie podczas jazdy. Trasa w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego powinna

być tak opracowana, aby odzwierciedlała rzeczywiste zachowanie się pojazdu. Testy emisyjne prowadzone w warunkach rzeczywistych pomagają zapewnić zgodność pojazdów z docelowymi założeniami w całym zakresie eksploatacji.

Giechaskiel [61] zwraca uwagę na fakt, że nowe samochody w testach RDE spełniają wymagania emisyjne, jednak w warunkach niewiele różniących się od wymaganych, mogą emitować znacznie więcej związków szkodliwych. Dotyczy to szczególnie zimnego rozruchu w niskich temperaturach otoczenia, szczególnie w warunkach miejskich. Obniżenie temperatury zewnętrznej w krótkim teście RDE skutkuje 50-procentowym wzrostem emisji  $\text{NO}_x$ , 2-krotnym zwiększeniem emisji CO, a także 10-krotnym zwiększeniem emisji NMHC (*non-methane hydrocarbons*).

Podobnym tematem zajmował się Ehrenberger [62], badając pojazd o napędzie hybrydowym w różnych temperaturach otoczenia w testach RDE oraz WLTC. Stwierdził, że emisja drogowa CO w temperaturze  $-7^\circ\text{C}$  jest 2-, a nawet 3-krotnie większa w teście WLTC w odniesieniu do temperatury  $23^\circ\text{C}$ . Emisja  $\text{NO}_x$  w niskich temperaturach otoczenia jest 2-krotnie większa, a emisja liczby cząstek stałych około 4-krotnie większa. Podane wyniki dotyczą pojazdu o SOC = 100%, natomiast dla SOC = 0% wyniki były porównywalne (jedynie dla CO różniły się 5-krotnie). Autorzy wnioskowali pośrednio zmiany emisji spalin w odniesieniu do testów RDE, gdyż przyjęli zasadę porównywania pomiędzy testami WLTC ( $23^\circ\text{C}$  i  $-7^\circ\text{C}$ ), przyjmując podobieństwo zmian w testach RDE, które były wykonywane tylko w temperaturze  $23^\circ\text{C}$ .

Lujan i inni [63] wykorzystali procedurę RDE do badań silników na dynamicznej hamowni silnikowej. Wygenerowano 6 testów RDE (przy innych założeniach będących ekwiwalentem dla pojazdu), zgodnych z wymaganiami, które różniły się warunkami dynamicznymi. Największe różnice zaobserwowano w emisji tlenków azotu: 17% – w fazie miejskiej, 31% – w fazie pozamiejskiej i 27% w fazie autostradowej. Z badań wynika, że różnice dla wykorzystywanego pojedynczego obiektu badawczego w testach badawczych (spełniających wymagania RDE) mogą różnić się o kilkadziesiąt procent.

Niektórzy badacze wykorzystują procedurę RDE tylko do porównywania uzyskiwanych wyników emisyjnych, bez egzekwowania dopuszczalnych warunków dynamicznych takich pomiarów. Takie sytuacja ma miejsce w przypadku wielowątkowego porównania pojazdu, np. w testach NEDC oraz w warunkach drogowych przy zasilaniu równymi paliwami. W badaniach zespołu Lejda i innych [64] brak jest odniesienia do wszystkich procedur RDE, co pewnie wynika z badań pojazdu o klasie emisyjnej Euro 3. Jednakże warunki podziału trasy badawczej zostały uwzględnione, to wątpliwości budzi brak jednoznacznego rozgraniczenia faz testu na miejską pozamiejską i autostradową.

Suarez-Bertoa z innymi [65] wykorzystali procedurę RDE do analizy związków szkodliwych spalin, takich jak  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  oraz  $\text{CH}_4$ . Obiektami badawczymi były pojazdy zasilane silnikami ZI, ZS oraz CNG. Wykazano zwiększoną emisję  $\text{NH}_3$  szczególnie

z pojazdów z silnikiem CNG (62–66 mg/km) i benzynowym (23–48 mg/km), dla pojazdu z silnikiem ZS wartość ta wynosiła 2–17 mg/km. Emisja N<sub>2</sub>O była obserwowana jedynie w pojazdach z silnikiem ZS i wynosiła 5–27 mg/km.

Przyszłościowe zmiany dotyczące procedur realizacji testów RDE [34] można ująć w następujących punktach (wykorzystując podstawowe dane również zawarte w tabelicy 3.1):

- wprowadzenie nowych zanieczyszczeń (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, PN D < 23 nm) [43, 65],
- wykorzystanie generatorów tras RDE (lokalnie), umożliwiające większą dyskretyzację warunków pracy pojazdów [66],
- skrócenie faz testu RDE [67],
- zmniejszenie CF dla wszystkich związków, w szczególności dla NO<sub>x</sub> do wartości 1,1 [31],
- uwzględnienie fazy zimnego rozruchu silnika w limitach emisji [67, 69],
- pojazd powinien charakteryzować się zerowymi lub niemal zerowymi emisjami w obszarach miejskich, co powinno być zapewnione za pomocą połączenia RDE oraz OBD [19],
- możliwość porównywania zużycia paliwa i energii dla pojazdów konwencjonalnych, hybrydowych i elektrycznych [70–73],
- uwzględnienie pierwszego rozruchu silnika w fazie pozamiejskiej lub autostradowej dla pojazdów PHEV [74],
- rozwijanie koncepcji RDE+ (narzędzie wirtualne, łączące warunki środowiskowe, wyposażenie badawcze i możliwość testowania pojazdu w warunkach hamowniowych) [66].

**Tablica 3.1.** Charakterystyka tras badawczych wykorzystywana w badaniach różnych autorów

Źródło	Silnik	Norma Euro	Test	Dystans [km]	Czas [min]	Miejska		Pozamiejska		Autostradowa	
						S [km]	u [%]	S [km]	u [%]	S [km]	u [%]
Lejda i inni [64]	ZI, CNG	Euro 3	N-RDE	32,9	39,9	11	33,4	10,1	30,7	11,8	35,8
Šarkan i inni [42]	ZI, LPG	Euro 4	RDE	69,4	95	21,5	31	26,5	38	21,4	31
Pignatta i inni [41]	ZI	Euro 4	Miasto	2,2	4,7	2,2					
Du i inni [69]	ZI		RDE	75,4		24,6	32,6	24,4	32,4	26,4	35
Akard i inni [73]	ZI		N-RDE	37,4–39,9							
Bodisco, Zare [75]	ZI	Euro 6	RDE	88,6		26,8	30,3	25,1	28,3	36,7	41,4
Kadijk i inni [76]	ZS	Euro 5b	RDE	71,9	105,6						
	ZS	Euro 6	RDE	70,3–75,2	96,6–108,1						
	ZS	Euro 6b	RDE	69,1–69,8	93,6–107,6						
Yang i inni [26]	ZI, ZS	Euro 6b	N-RDE	59,6		19,1	32	22,7	29,3	17,7	29,7
Rosenblatt i inni [60]	ZI, ZS	Euro 6b	RDE	84,7	96	32,9	39	32	38	19,8	23
	ZS	Euro 6	RDE	85			42		31		27
			Miasto	40			90		10		
			Autostrada	104			17		53		30
	ZS, ZI		RDE	90	90–120						
	ZI, HEV		RDE	96	101		34,5		35,5		30
N-RDE			38	41		35,7		34,2		30	

**Tablica 3.1 cd.** Charakterystyka tras badawczych wykorzystywana w badaniach różnych autorów

Źródło	Silnik	Norma Euro	Test	Dystans [km]	Czas [min]	Miejska		Pozamiejska		Autostradowa	
						S [km]	u [%]	S [km]	u [%]	S [km]	u [%]
Ziółkowski i inni [77]	HEV	Euro 6c	RDE	70,3	91	29,7	42,5	17,7	24,9	22,9	32,6
Prati i inni [40]	PHEV	Euro 6	RDE	57,9–66,4	92,2–105,5	19,1–22,4	30,7–36,2	19,2–21,9	30,5–35,5	17,8–22,9	29,3–38,7
			Miasto	25,1–26,7	77,7–85,2	25,1–26,7	100				
Sokolnicka i inni [79]	ZI	Euro 6	RDE	79,2	109,6	34,2		19,5		25,5	
Suarez-Bertoa i inni [39]	ZI, ZS	Euro 6b–Euro 6d-temp	RDE	79–94	98–112	32–37		25–27		22–30	
Giechaskiel i inni [61]	ZI	Euro 6d-temp-Evap	RDE	96–99	111–114	26,5–27,8	23,8–24,3				
			RDE krótki	50	60	12,8	25,6				
			RDE	100	118	38,5	38,5				
Suarez-Bertoa i inni [64]	ZI, ZS, CNG	Euro 6–Euro 6d-temp	RDE	79–104	94–114	31–41		25–29		23–34	
Suarez-Bertoa i inni [39]	ZI, ZS, CNG	Euro 6–Euro 6d-temp	RDE	79–94	98–112	32–37	33–40	25–27	29–32	22–30	28–32
			N-RDE	79–94	94–104	31–34	36–39	25–28	27–32	23–32	29–34
			Autostrada	139	136	44	32	18	13	80	58

**Tablica 3.1 cd.** Charakterystyka tras badawczych wykorzystywana w badaniach różnych autorów

Źródło	Silnik	Norma Euro	Test	Dystans [km]	Czas [min]	Miejska		Pozamiejska		Autostradowa	
						S [km]	u [%]	S [km]	u [%]	S [km]	u [%]
Luján i inni [63]	ZS	Euro 6	RDE (hamownia)	90,9–94,9		21,6–25,9	32,9–36,4	22,3–27,9	33,9–39,2	17,4–20,5	39,2–37,0
Selleri i inni [79]	ZS	Euro 6d-ISC	RDE	91,1	103	35,5	39	29,1	32	26,5	29
			Autostrada	187,7	117	15,0	8	18,1	9,6	154,6	82,4
			Miasto	129,2	116	33,9	26,2	12,5	9,6	82,9	64,2
Soo Yu i inni [81]	ZS	Euro 6d-temp	RDE	73,9	103,1	26,5	36,0	19,7	26,8	27,4	37,2
Pielecha i inni [72]	ZI	Euro 6d-temp	RDE	99,7–100,2	101,7–105,3	32,1–35,4	32,0–34,8	31,9–34,6	32,0–34,6	33,1–33,3	32,5–33,4
	HEV	Euro 6d-temp	RDE	96,6–97,4	101,3–109,2	31,2–33,9	32,3–34,9	30,8–32,1	31,6–33,2	32,3–34,4	33,3–35,3
	EV		RDE	96,1–98,5	103,3–106	32,4–34,5	33,7–35,0	31,2–31,4	31,7–32,7	32,2–32,8	33,3–33,6
Skobiej, Pielecha [71]	PHEV	Euro 6d-temp	RDE	91,9–97,4	104,5–107,8	32,2–33,7	33,1–36,7	25,6–31,6	27,5–32,7	32,0–34,4	33,2–35,8
Wang i inni [81]	ZI, HEV	China-6	RDE	76,6	95,4–115	23,9–24,9		24,0–24,6		27,1–28,7	



Przedstawiony przegląd literatury jednoznacznie wskazuje, że najnowsze pojazdy spełniające normę Euro 6d-temp są zgodne z wymaganiami emisyjnymi podczas testów w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego. Jednak w przypadku testów, które nie spełniają wymagań RDE (oznaczonych jako N-RDE), tj. testów związanych z ekstremalnymi warunkami dynamicznymi lub szczegółowymi badaniami, na przykład dotyczącymi wpływu topografii terenu, emisja tlenków azotu znacznie przekracza dopuszczalne poziomy. Zwiększenie emisji tlenków azotu obserwuje się zarówno w przypadku pojazdów napędzanych silnikami ZS, jak i ZI.

Widoczny jest brak porównań dotyczących różnych tras badawczych stanowiących zarówno standardowe testy RDE, jak i przyszłościowe podejścia, które zakładają skracanie długości tras badawczych lub wykorzystywanie skalowalnych testów. Takie analizy mogłyby dostarczyć informacji, czy przyszłościowe wymagania dotyczące skracania długości tras badawczych są w stanie zapewnić wyniki emisyjne zbliżone do tych, które uzyskiwane są obecnie.

## 4. Metodyka badań

### 4.1. Procedury badawcze wykorzystywane w pomiarach emisji spalin w badaniach drogowych

Test RDE obejmuje jazdę w terenie miejskim, a następnie w terenie pozamiejskim i po autostradzie. Eksploatacja musi odbywać się w sposób ciągły. Faza miejska charakteryzuje prędkość pojazdu nieprzekraczająca 60 km/h, faza pozamiejska – to prędkość pojazdu wynosząca od 60 km/h do 90 km/h, a faza autostradowa – powyżej 90 km/h. Przejazd obejmuje 34% fazy miejskiej, 33% fazy pozamiejskiej i 33% fazy autostradowej (względem dystansu). Faza miejska musi odpowiadać nie mniej niż 29% całkowitej przejechanej odległości. Prędkość pojazdu nie powinna przekraczać 145 km/h. Maksymalna prędkość może zostać przekroczona o 15 km/h przez nie więcej niż 3% czasu trwania fazy autostradowej. Średnia prędkość jazdy (łącznie z okresami postoju) w fazie miejskiej powinna wynosić od 15 km/h do 30 km/h. Średnia prędkość jazdy po autostradzie obejmuje zakres od 90 km/h do co najmniej 110 km/h, przy czym prędkość chwilowa musi przekraczać 100 km/h przez co najmniej 5 min. Czas przejazdu całego testu stanowi od 90 min do 120 min [57]. Minimalny dystans każdej z faz wynosi co najmniej 16 km. Szczegółowe wymagania podano w tablicy 4.1.

**Tablica 4.1.** Wymagania szczegółowe dotyczące testów RDE [57]

Parametr	Wymagania
Temperatura zewnętrzna ( $T_z$ )	– zakres normalny: $0^{\circ}\text{C} \leq T_z < 30^{\circ}\text{C}$ – zakres rozszerzony dolny: $-7^{\circ}\text{C} \leq T_z < 0^{\circ}\text{C}$ – zakres rozszerzony górny: $30^{\circ}\text{C} < T_z \leq 35^{\circ}\text{C}$
Wysokość topograficzna prowadzenia badań (h)	– zakres normalny: $h \leq 700$ m n.p.m. – zakres rozszerzony: $700 < h \leq 1300$ m n.p.m.
Ocena wpływu zewnętrznych parametrów pogodowych i drogowych, a także stylu jazdy	– sumaryczne zwiększenie wysokości: mniejsze niż 1200 m/100 km  – względne przyspieszenie dodatnie (RPA): większe niż $RPA_{\min}$ (dla każdego warunków jazdy) – iloczyn przyspieszenia i prędkości ( $v \cdot a_+$ ): mniejsze niż $v \cdot a_{+\min}$ (dla każdego warunków jazdy)
Stan termiczny pojazdu przed testem	– zimny rozruch pojazdu: ciecz chłodząca poniżej $70^{\circ}\text{C}$ , czas co najmniej 300 s,
Jednorazowy postój pojazdu	– nie dłuższy niż 180 s

**Tablica 4.1cd.** Wymagania szczegółowe dotyczące testów RDE

Parametr	Wymagania
Działanie systemów oczyszczania spalin	– pojedyncza regeneracja filtra cząstek stałych może powodować powtórzenie testu RDE; wystąpienie dwóch regeneracji jest uwzględniane w wynikach emisji spalin testu RDE
Działanie systemów komfortu jazdy	– używane normalnie zgodnie z przeznaczeniem (np. działanie układu klimatyzacji)
Obciążenie pojazdu	– masa pojazdu: kierowca (i pasażer) oraz urządzenia badawcze; maksymalne obciążenie < 90% sumy masy pasażerów oraz masy użytecznej pojazdu
Wymagania testu	– czas trwania 90–120 min
Wymagania dla części miejskiej testu	– udział 29–44% długości całego testu – dystans: większy niż 16 km – prędkość pojazdu (v): $v \leq 60$ km/h – średnia prędkość: 15–40 km/h – udział postoju: 6–30% czasu części miejskiej
Wymagania dla części pozamiejskiej testu	– udział 23–43% długości całego testu  – dystans: większy niż 16 km – prędkość pojazdu (v): $60 \text{ km/h} < v \leq 90 \text{ km/h}$
Wymagania dla części autostradowej testu	– udział 23–43% długości całego testu  – dystans: większy niż 16 km – prędkość pojazdu (v): $v > 90$ km/h – prędkość jazdy ponad 100 km/h przez co najmniej 5 min – prędkość jazdy ponad 145 km/h przez maks. 3% czasu

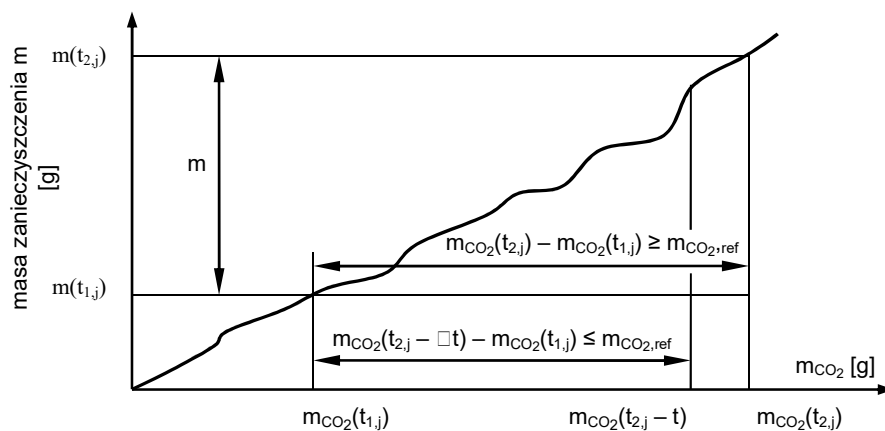
Metoda ruchomego zakresu uśredniania (MAW) stanowi skuteczne narzędzie umożliwiające uzyskanie wyników emisji zanieczyszczeń drogowych w rzeczywistych warunkach jazdy obiektu. Badanie jest podzielone na pododcinki, zwane zakresami, które reprezentują różne fragmenty trasy. Następnie stosowana jest obróbka statystyczna w celu określenia, które zakresy są najbardziej odpowiednie do oceny emisji w rzeczywistych warunkach jazdy. Metoda MAW ma zastosowanie w badaniach emisji pojazdów w warunkach ruchu drogowego, co pozwala na lepsze zrozumienie rzeczywistego wpływu pojazdów na środowisko. Dzięki podziałowi trasy na pododcinki, możliwe jest dokładne analizowanie emisji w różnych kontekstach drogowych, uwzględniając zmienne warunki atmosferyczne, topografię terenu i różne scenariusze jazdy [56]. Obróbka statystyczna wyników pozwala na identyfikację zakresów, które w największym stopniu wpływają na emisję zanieczyszczeń i które najlepiej oddają rzeczywisty charakter jazdy pojazdu. Wybór odpowiednich zakresów jest kluczowy dla wiarygodnej oceny

emisji w rzeczywistych warunkach, co umożliwi bardziej precyzyjne określenie wpływu pojazdów na jakość powietrza i środowiska naturalnego.

Badanie „normalności” zakresów (charakterystyka, która jest typowa, oczekiwana lub standardowa w danym zestawieniu danych) prowadzone jest przez porównanie emisji dwutlenku węgla dla danej odległości z krzywą odniesienia. Badanie jest kompletne, gdy zawiera wystarczającą liczbę normalnych zakresów, obejmujących udziały jazdy o różnej prędkości (cykl miejski, pozamiejski, autostradowy). Prowadzone jest to na następujących etapach:

- obliczanie wielkości emisji podzbiórami,
- określenie normalnych zakresów,
- weryfikacja kompletności badania i normalności,
- obliczanie emisji z wykorzystaniem normalnych zakresów,
- wyznaczenie parametrów dynamicznych przejazdu.

Wartości chwilowych emisji zanieczyszczeń muszą być całkowane z zastosowaniem metody ruchomego zakresu uśredniania, opartej na masie odniesienia CO<sub>2</sub> (rys. 4.1). Zasada tego obliczenia jest następująca: emisji drogowej nie oblicza się dla całego zbioru danych, lecz dla podzbiórów, przy czym ich długość ustala się w taki sposób, aby odpowiadały masie CO<sub>2</sub> emitowanego przez pojazd podczas testu referencyjnego [56].



**Rysunek 4.1.** Definicja zakresów uśredniania opartych na masie CO<sub>2</sub> [56]

Czas trwania i-tego okna uśredniania ( $t_{2,j} - t_{1,j}$ ) określa się według wzoru (rys. 4.1):

$$m_{\text{CO}_2}(t_{2,j}) - m_{\text{CO}_2}(t_{1,j}) \geq m_{\text{CO}_2,\text{ref}} \quad (4.1)$$

gdzie:

$m_{\text{CO}_2}(t_{i,j})$  – masa CO<sub>2</sub> mierzona między rozpoczęciem badania a czasem ( $t_{i,j}$ ) [g];  $m_{\text{CO}_2,\text{ref}}$  to połowa masy CO<sub>2</sub> [g] emitowanego przez pojazd podczas cyklu WLTP (badanie typu I, włącznie z zimnym rozruchem);

$t_{2,j}$  – dobiera się w taki sposób, aby:

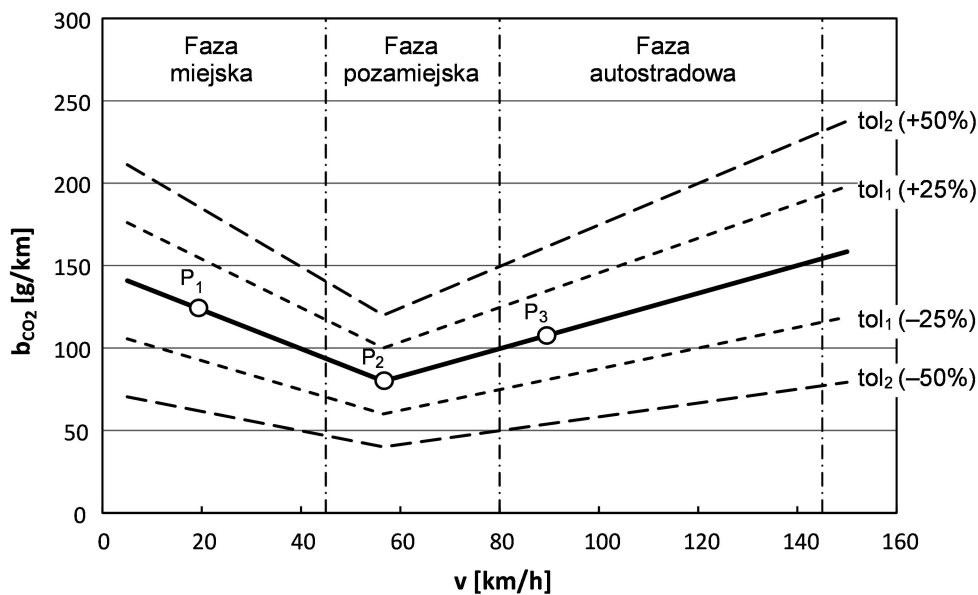
$$m_{CO_2}(t_{2,j} - \Delta t) - m_{CO_2}(t_{1,j}) < m_{CO_2,ref} \leq m_{CO_2}(t_{2,j}) - m_{CO_2}(t_{1,j}) \quad (4.2)$$

gdzie  $\Delta t$  jest okresem pobierania próbek danych (1 s lub mniej).

Punkty odniesienia  $P_1$ ,  $P_2$  oraz  $P_3$  (rys. 4.2) wymagane do określenia krzywej ustala się w następujący sposób:

- punkt  $P_1$ :  $v_{P_1} = 19$  km/h (średnia prędkość w fazie 1 *low speed* testu WLTC);  $b_{CO_2,P_1}$  – emisja drogowa  $CO_2$  [g/km] z fazy 1 testu WLTC zwiększona o 20%,
- punkt  $P_2$ :  $v_{P_2} = 56,6$  km/h (średnia prędkość w fazie 3 *high speed* testu WLTC);  $b_{CO_2,P_2}$  – emisja drogowa  $CO_2$  [g/km] podczas fazy 3 testu WLTP zwiększona o 10%,
- punkt  $P_3$ :  $v_{P_3} = 92,3$  km/h (średnia prędkość w fazie 4 *extra high speed* testu WLTC);  $b_{CO_2,P_3}$  = emisja drogowa  $CO_2$  [g/km] podczas fazy 4 testu WLTC zwiększona o 5%.

Emisja drogowa  $CO_2$  jest obliczana jako funkcja średniej prędkości z wykorzystaniem dwóch liniowych odcinków ( $P_1, P_2$ ) oraz ( $P_2, P_3$ ). Odcinek ( $P_2, P_3$ ) jest ograniczony do 145 km/h na osi prędkości pojazdu.



**Rysunek 4.2.** Krzywa charakterystyczna emisji drogowej dwutlenku węgla z pojazdu [56]

Faza jazdy miejskiej charakteryzuje się średnimi prędkościami pojazdu mniejszymi niż 45 km/h (wyznaczonymi w oknach pomiarowych), faza pozamiejska to średnie prędkości pojazdu równe lub większe niż 45 km/h, a mniejsze niż 80 km/h, faza autostradowa odznacza się średnimi prędkościami pojazdu równymi lub większymi niż 80 km/h, a mniejszymi niż 145 km/h. Tolerancje pierwotna i wtórna dla krzywej charakterystycznej  $CO_2$  pojazdu to odpowiednio:  $tol_1 = 25\%$  oraz  $tol_2 = 50\%$ . Badanie jest kompletne, jeżeli w łącznej liczbie zakresów zawiera co najmniej 15% zakresów miejskich, pozamiejskich i autostradowych. Badanie jest normalne, jeżeli co najmniej 50% zakre-

sów miejskich, pozamiejskich i autostradowych mieści się w pierwotnej tolerancji określonej dla krzywej charakterystycznej.

Po upewnieniu się, że test jest ważny, można przystąpić do obliczenia udziału wagowego poszczególnych okien w przedziałach tolerancji [57]:

- jeżeli okno zawiera się w tolerancji pierwszego rzędu, czyli:

$$b_{CO_2} \left(1 - \frac{tol_1}{100}\right) \leq b_{CO_2,i} \leq b_{CO_2} \left(1 + \frac{tol_1}{100}\right) \quad (4.3)$$

to przypisuje się mu udział wagowy równy 1,

- jeżeli okno zawiera się w przedziale tolerancyjnym od +25% do +50%, czyli:

$$b_{CO_2} \left(1 + \frac{tol_1}{100}\right) \leq b_{CO_2,i} \leq b_{CO_2} \left(1 + \frac{tol_2}{100}\right) \quad (4.3)$$

to jego udział wagowy oblicza się ze wzoru:

$$w = k_{11} h + k_{12} \quad (4.4)$$

gdzie:  $k_{11} = \frac{1}{tol_1 - tol_2}$ , a  $k_{12} = \frac{tol_2}{tol_2 - tol_1}$ ,

- jeżeli okno zawiera się w przedziale tolerancyjnym od -50% do -25%, czyli:

$$b_{CO_2} \left(1 - \frac{tol_2}{100}\right) \leq b_{CO_2,i} \leq b_{CO_2} \left(1 - \frac{tol_1}{100}\right) \quad (4.5)$$

to jego udział wagowy oblicza się ze wzoru:

$$w = k_{21} h + k_{22} \quad (4.6)$$

gdzie:  $k_{21} = \frac{1}{tol_2 - tol_1}$ , a  $k_{22} = \frac{tol_2}{tol_2 - tol_1}$ ,

- jeżeli okno zawiera się poniżej tolerancji -50% lub powyżej tolerancji +50%, czyli:

$$b_{CO_2,i} \leq b_{CO_2} \left(1 - \frac{tol_2}{100}\right) \quad \text{lub} \quad b_{CO_2,i} \geq b_{CO_2} \left(1 + \frac{tol_2}{100}\right) \quad (4.7)$$

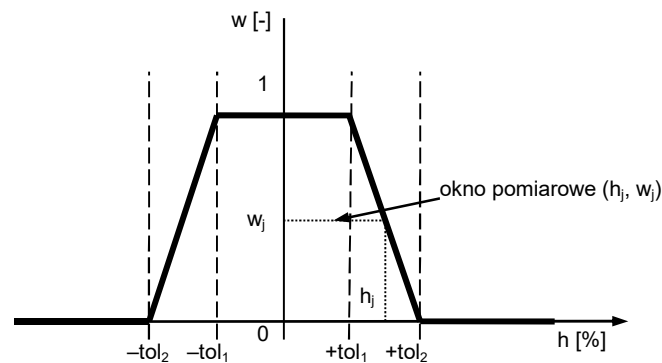
to wówczas udział wagowy okna wynosi  $w = 0$ .

Wartość liczby  $h$  dla każdego okna wyznacza się ze wzoru:

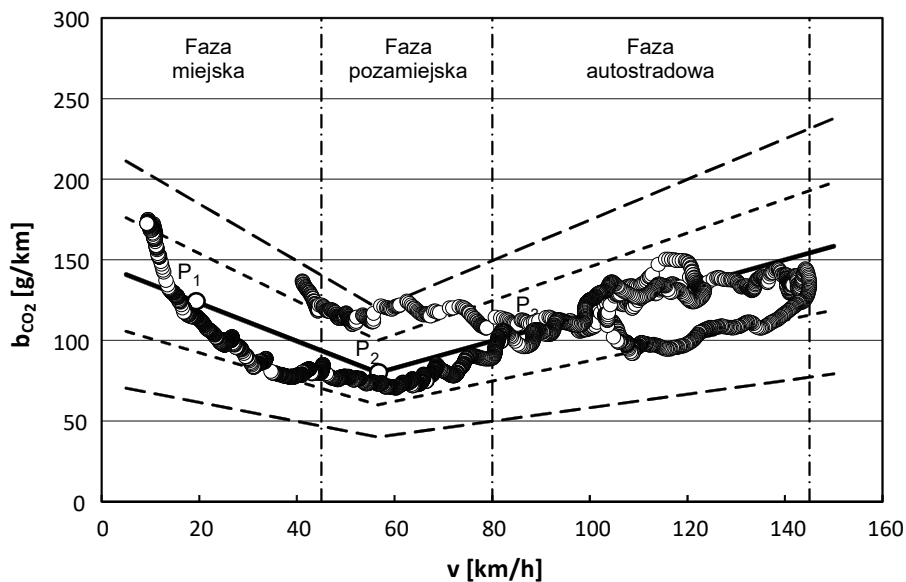
$$h = 100 \left( \frac{b_{CO_2,i} - b_{CO_2}}{b_{CO_2}} \right) \quad (4.8)$$

Po obliczeniu wagi każdego okna można zapisać je na wykresie, w którym udział wagowy ( $w$ ) zaznacza się na osi  $y$ , a procent tolerancji ( $h$ ) na osi  $x$  (rys. 4.3). Po wyko-

naniu tych czynności można nanieść wartości emisji drogowej dwutlenku węgla dla każdego okna pomiarowego na wykres krzywej charakterystycznej (rys. 4.4).



Rysunek 4.3. Wykres udziału wagowego okien [56]



Rysunek 4.4. Krzywa charakterystyczna emisji drogowej dwutlenku węgla z naniesionymi wartościami emisji CO<sub>2</sub> w poszczególnych oknach pomiarowych, uzyskanymi podczas badań drogowych

Następnie wyznacza się indeksy udziału sektorów (miejski – m, pozamiejski – p, autostradowy – a) przez zsumowanie okien z danego sektora ( $h_k$ ) i podzielenie przez liczbę ich wszystkich (N), np. dla obszaru miejskiego:

$$u = \frac{\sum h_k}{N}, k = m, p, a \quad (4.9)$$

i dla całego testu:

$$u = \frac{f_m h_m + f_p h_p + f_a h_a}{f_m + f_p + f_a} \quad (4.10)$$

gdzie:  $f_m = 0,34$ ,  $f_p = 0,33$ , a  $f_a = 0,33$ .

Na zakończenie wyznacza się całościową emisję drogową danego składnika spalin w teście (emisję w poszczególnych sektorach wpisuje się w mg/km):

$$b_j = 1000 \cdot \frac{f_m b_{j,m} + f_p b_{j,p} + f_a b_{j,a}}{f_m + f_p + f_a} \quad (4.11)$$

a dla obliczenia emisji drogowej liczby cząstek stałych:

$$b_{PN} = \frac{f_m b_{PN,m} + f_p b_{PN,p} + f_a b_{PN,a}}{f_m + f_p + f_a} \quad (4.12)$$

Wyznaczenie parametrów dynamicznych przejazdu wymaga określenia: wartości 95. centyla iloczynu prędkości pojazdu i przyspieszenia dodatniego większego niż  $0,1 \text{ m/s}^2$  (wyrażanego w  $\text{m}^2/\text{s}^3$ ) oraz względnego przyspieszenia dodatniego (wyrażanego w  $\text{m/s}^2$ ) dla części przejazdu w terenie miejskim, pozamiejskim i autostradowym [56].

Wartość  $(v \cdot a_+)_{k_{[95]}}$  to wartość  $(v \cdot a_+)_{i,k}$ , dla której  $j/N_k = 95\%$  ( $j$  – kolejna wartość iloczynu prędkości i dodatniego przyspieszenia). Jeżeli nie można osiągnąć  $j/N_k = 95\%$ , to  $(v \cdot a_+)_{k_{[95]}}$  oblicza się z wykorzystaniem interpolacji liniowej kolejnych próbek  $j$  oraz  $(j + 1)$ , dla których  $j/N_k < 95\%$  oraz  $(j + 1)/N_k > 95\%$  [56]

Względne przyspieszenie dodatnie (RPA – *Relative Positive Acceleration*) dla każdej części testu oblicza się według wzoru:

$$RPA_k = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} \Delta t \cdot (v \cdot a_+)_{j,k}}{\sum_{j=1}^L d_{i,k}} \quad (4.13)$$

gdzie:

$RPA_k$  – względne przyspieszenie dodatnie dla części przejazdu w terenie miejskim, pozamiejskim i autostradowym,  $\text{m/s}^2$ ,

$\Delta t$  – różnica czasu równa 1 s,

$N_k$  – liczba próbek dla części przejazdu w fazie miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej z przyspieszeniem dodatnim,

$L$  – łączna liczba próbek dla części przejazdu w fazie miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej.

Weryfikacja ważności przejazdu odbywa się dla każdej części przejazdu w fazie miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej. Jeżeli wartość  $(v \cdot a_+)_{k_{[95]}}$  spełnia równanie dla każdej części testu:



$$(v \cdot a_+)_{k_{[95]}} < 0,136 \cdot \bar{v}_k + 14,4 \quad \text{dla} \quad \bar{v}_k \leq 74,6 \text{ km/h} \quad (4.14)$$

$$(v \cdot a_+)_{k_{[95]}} < 0,0742 \cdot \bar{v}_k + 18,966 \quad \text{dla} \quad \bar{v}_k > 74,6 \text{ km/h} \quad (4.15)$$

to przejazd jest ważny.

Jeżeli wartość  $RPA_k$  spełnia równanie dla każdej części testu:

$$RPA > -0,0016 \cdot \bar{v}_k + 0,1755 \quad \text{dla} \quad \bar{v}_k \leq 94,05 \text{ km/h} \quad (4.16)$$

$$RPA > 0,025 \quad \text{dla} \quad \bar{v}_k > 94,05 \text{ km/h} \quad (4.17)$$

to przejazd jest ważny.

## 4.2. Obiekty badań

W związku z bardzo szerokim przekrojem pojazdów eksploatowanych w Polsce, do badań wybrano nowe pojazdy, które w latach 2020–2021 roku sprzedano w największej liczbie. Były to przede wszystkim samochody zasilane silnikami ZI (45%) oraz pojazdy z napędem hybrydowym typu plug-in (25%), które łącznie stanowiły około 70% wszystkich sprzedanych samochodów. Coraz częściej kupowane są nowe pojazdy elektryczne, choć obecnie ich odsetek stanowi mniej niż 1%. Do badań wybrano samochody osobowe, które charakteryzowały się objętością skokową silnika z przedziału 1,4–2,5 dm<sup>3</sup> o klasie emisyjnej z zakresu Euro 6 do Euro 6d-Temp (tab. 4.2). Dla każdego pojazdu przeprowadzono szereg prób, jednakże z uwagi na dążenie do uzyskania jak najbardziej miarodajnych wyników, wyselekcjonowano te przejazdy, które były najbardziej reprezentatywne.

**Tablica 4.2.** Parametry techniczne pojazdów wykorzystywane w badaniach w pracy

	Pojazd A (ZI)	Pojazd B (PHEV)	Pojazd C (PHEV)	Pojazd D (PHEV)	Pojazd E (PHEV)	Pojazd F (EV)
Etap badań	1	1 i 2	2	2	3	1
Silnik	ZI, Turbo, R4, 16V	ZI, Turbo, R4, 16V	ZI, R4, 16V	ZI, R4, 16V	ZI, R4, 16V	–
Objętość skokowa silnika	1497 cm <sup>3</sup>	1395 cm <sup>3</sup>	1798 cm <sup>3</sup>	1999 cm <sup>3</sup>	2499 cm <sup>3</sup>	–
Moc maksymalna	135 kW /5800 obr/min	115 kW + 85 kW (EV)	72 kW + 53 kW (EV)	113 kW + 50 kW (EV)	130 kW + 30 kW (EV)	100 kW
Moment maksymalny	280 Nm/ 1200-4000 obr/min	250 Nm/ 1500-3500 obr/min + 330 Nm (EV)	142 Nm/ 3600 obr/min + 163 Nm (EV)	189 Nm/ 5000 obr/min + 205 Nm (EV)	220 Nm/ 3600-5200 obr/min + 30 Nm (EV)	290 Nm
Skrzynia przekładniowa	automatyczna, 9-biegowa	automatyczna, 6-biegowa	automatyczna, CVT	automatyczna, 6-biegowa	automatyczna, 6-biegowa	
Masa własna	1430 kg	1655 kg	1375 kg	1740 kg	1590 kg	1585 kg
Średnia emisja CO <sub>2</sub>	136–144 g/km (WLTP)	31–42 g/km (WLTP) 16,4 kWh/100 km	28–35 g/km (WLTP)	33 g/km (WLTP)	132 g/km (WLTP)	12,7 kWh/100 km
Klasa emisyjna	Euro 6d-temp	Euro 6d-temp	Euro 6d-temp	Euro 6	Euro 6d-temp	–
Pojemność elektryczna akumulatora	–	13,6 kWh	8,8 kWh	3,3 kWh	11 kWh	35,8 kWh

Pojazdy wybrane do badań w większości to hybrydy, ponieważ jak dowiedziono w genezie tematu dysertacji, stanowią one konstrukcje przejściowe przed całkowitą elektryfikacją napędów, a ich udział w rynku zwiększa się dynamicznie w ostatnich latach. Pojazdy z napędem hybrydowym wyposażone były w akumulator pozwalający na pokonanie około 40–70 km w trybie elektrycznym oraz w silnik spalinowy, którego parametry operacyjne zbliżone były do pojazdu benzynowego (dla pierwszego etapu badań). Samochód elektryczny jest przykładem pojazdu o zasięgu – według danych technicznych – około 200 km. Wszystkie pojazdy charakteryzowały się zbliżoną masą własną oraz wyposażeniem seryjnym. Należy zaznaczyć, że testy zużycia paliwa, emisji spalin oraz energochłonności wykonywane były dla zbliżonych warunków pracy oraz podobnego wykorzystania urządzeń komfortu jazdy (m.in. nagłośnienie, klimatyzacja).

W drugim etapie badań pojazdy dobrano tak, aby jak najlepiej zdywersyfikować i porównać ich różne właściwości ekologiczne. Pojazd B charakteryzuje się największą mocą silnika spalinowego i elektrycznego, a jednocześnie największą pojemnością elektryczną akumulatora (13,6 kWh). Pojazd C wyróżnia się bezstopniową skrzynią biegów, najmniejszą masą własną oraz średnią pojemnością elektryczną akumulatora (8,8 kWh). Pojazd D cechuje się największą objętością skokową silnika spalinowego, jednak wyróżnia się najmniejszą pojemnością elektryczną akumulatora (3,3 kWh). Pojazdy w drugim etapie badań (B, C, D) oznaczano w zależności od pojemności elektrycznej akumulatorów.

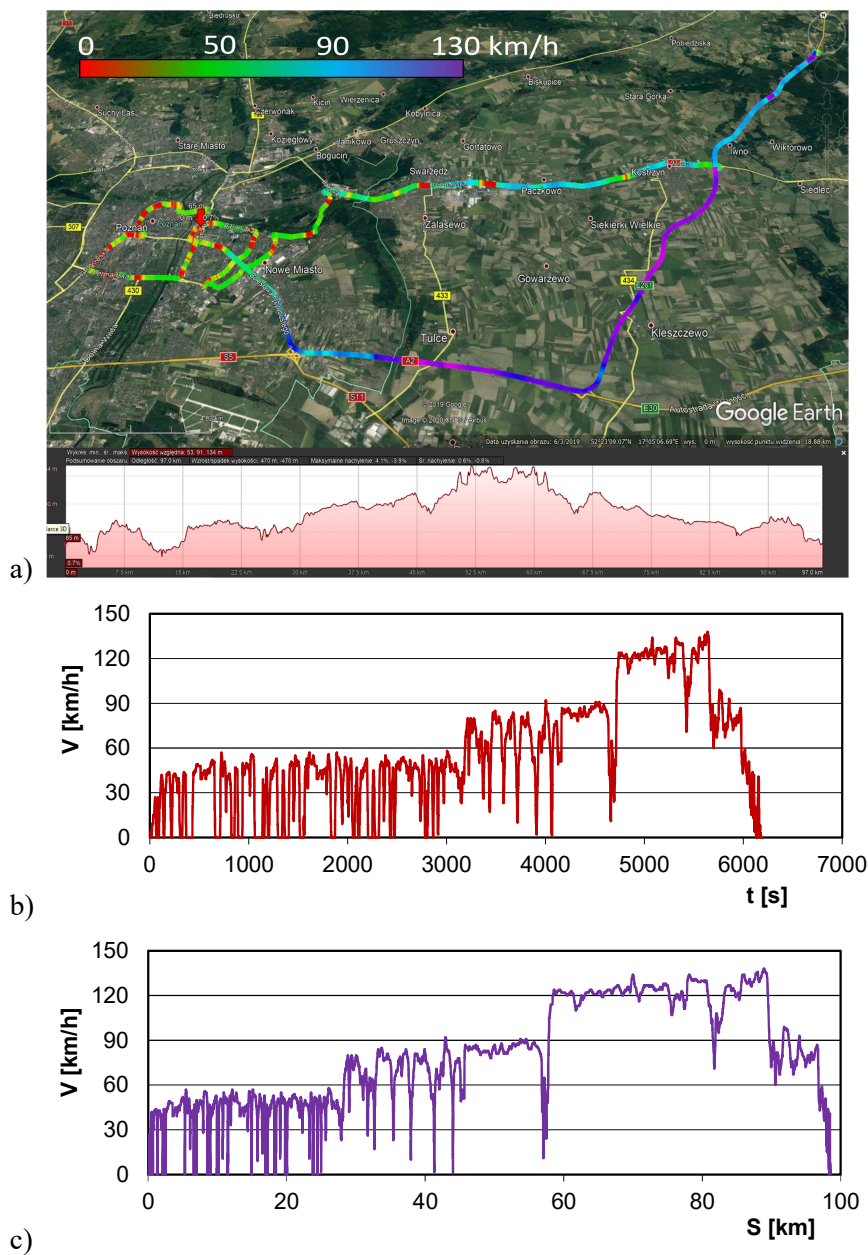
W trzecim etapie badań obiektem badawczym był pojazd hybrydowy typu *full-hybrid* (pojazd E). Przed testem pojazd był kondycjonowany przez okres 24 h, a test wykonywał ten sam kierowca. Paliwo używane do testów było standardowym paliwem z dodatkiem 5% etanolu. Zimny rozruch wykonywano dla temperatury cieczy chłodzącej wynoszącej 23°C, a gorący rozruch dla temperatury cieczy chłodzącej wynoszącej 80–90°C.

### 4.3. Trasy badawcze

Badania emisji spalin, zużycia paliwa oraz energochłonności wykonano na tej samej trasie badawczej, którą dobrano zgodnie z wymaganiami odpowiednich przepisów dotyczących badań RDE. Trasa badawcza, odzwierciedlająca warunki testu RDE była taka sama dla wszystkich etapów badań. Jednak w etapie trzecim wykorzystano trzy inne trasy badawcze, a analizę porównawczą zamieszczono w rozdziale dotyczącym tego etapu prac.

Trasa RDE przebiegała początkowo w terenie miejskim (czas części miejskiej to około 3000 s, co odpowiadało długości około 30 km), dla której prędkość jazdy nie była większa niż 60 km/h (rys. 4.5). Drugi etap to jazda pozamiejska (do czasu 4500 s, co

również przełożyło się na odcinek 30 km), z prędkością z zakresu 60–90 km/h przerywany krótkotrwałymi postojami (m.in. przy zmianie światła). Trzeci etap testu to jazda autostradowa o prędkości ponad 90 km/h, której długość wynosiła około 30 km. Na rysunku 4.5 pokazano również wizualizację trasy przejazdu z zaznaczeniem prędkości w części miejskiej (kolor zielony), pozamiejskiej (kolor niebieski) i autostradowej (kolor fioletowy), a jednocześnie pokazano profil wysokości względnej trasy. Zaznaczono również profile prędkości w zależności od czasu i przebytego dystansu. Dane takie pozwalają na ocenę czasową poszczególnych części testu oraz szacunkowe określenie podziału pod względem długości poszczególnych etapów testu RDE.

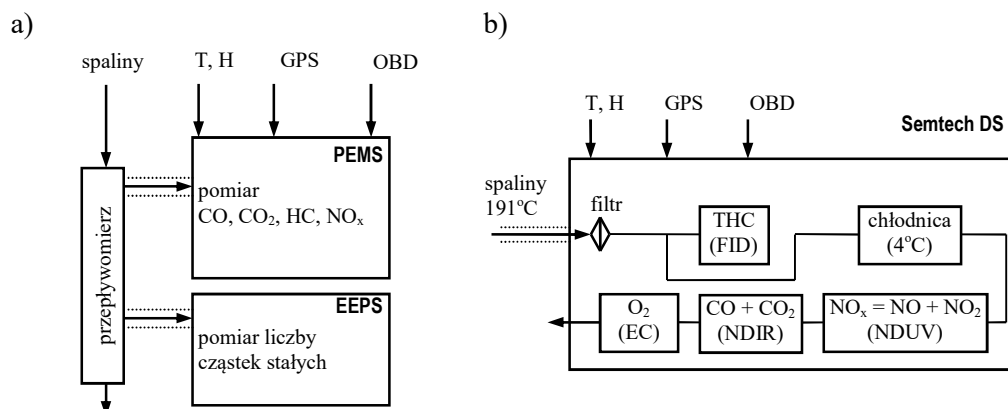


**Rysunek 4.5.** Przykładowa wizualizacja trasy badawczej wraz z opisem wysokości względnej (a) oraz zależność prędkości względem czasu (b) i przebytej odległości (c) dla pojazdu A

W dalszej części pracy do oceny uzyskiwanych wyników wykorzystano wskaźnik zmienności CoV (*coefficient of variation*). Jest to miara statystyczna używana do określenia stopnia zmienności lub rozproszenia danych w stosunku do ich średniej wartości procentowej. Wskaźnik zmienności jest przydatny do porównywania zmienności między różnymi zestawami danych, szczególnie wtedy, gdy te zestawy mają różne jednostki miary lub różne zakresy wartości. Jest często używany w statystyce i analizie danych.

#### 4.4. Aparatura pomiarowa

Pomiary emisji zanieczyszczeń z gazów wylotowych dokonywano za pomocą mobilnego analizatora spalin PEMS, który spełniał wymagania kwalifikujące do wykorzystywania w trakcie testów drogowych. Pobór próbki spalin realizowano za pomocą sondy pomiarowej mocowanej do przepływomierza gazów wylotowych, gdzie stosowano grzany przewód, a dla pomiaru liczby cząstek – układ rozcieńczania spalin (rys. 4.8a). Pomiar związków gazowych spalin CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub> odbywał się z wykorzystaniem urządzenia Semtech DS (rys. 4.8b). Szczegółowe parametry techniczne i dokładności pomiarowe urządzenia przedstawiono w tabelicy 4.5. Pomiar liczby cząstek stałych następował z wykorzystaniem spektrometru masowego, który umożliwiał określenie liczby (stężenia) cząstek stałych oraz prowadzenie analizy średnicowej z zakresu od 19 nm (tab. 4.6).



**Rysunek 4.8.** System pomiarowy do badań emisji spalin w warunkach drogowych (a) wraz z dokładnym schematem aparatury PEMS do badań związków gazowych (b)

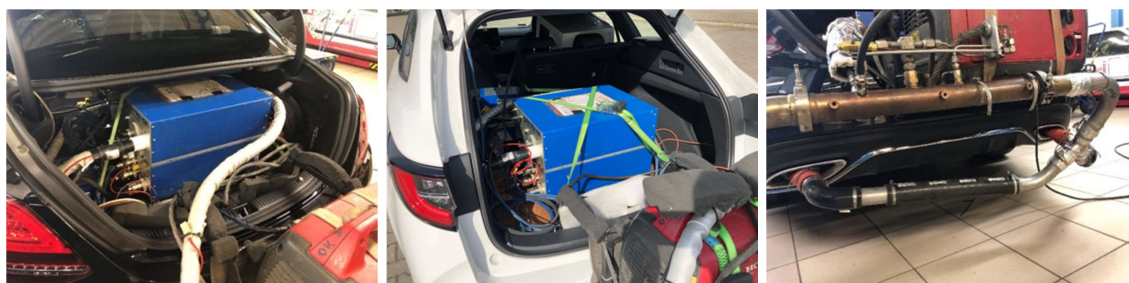
**Tablica 4.5.** Dokładność aparatury badawczej typu PEMS [71]

Związek szkodliwy	Metoda pomiaru	Zakres	Dokładność pomiaru
CO	NDIR	0–10%	±3%
THC	FID	0–10 000 ppm	±2,5%
NO <sub>x</sub> (NO + NO <sub>2</sub> )	NDUV	NO: 0–2500 ppm NO <sub>2</sub> : 0–500 ppm	±3%
CO <sub>2</sub>	NDIR	0–20%	±3%
O <sub>2</sub>	analizator chemiczny	0–22%	±1%
Częstotliwość pomiaru	–	1–4 Hz	–
Przepływomierz spalin	natężenie przepływu spalin	0–500 kg/h	±1%

**Tablica 4.6.** Charakterystyka spektrometru masowego EEPS TSI 3090 [71]

Parameter	Wartość
Zakres pomiaru średnic cząstek	5,6 nm–560 nm
Liczba kanałów	16 kanałów na dekadę (łącznie 32)
Częstotliwość pomiaru	10 Hz
Przepływ powietrza	40 dm <sup>3</sup> /min
Przepływ próbki spalin	10 dm <sup>3</sup> /min
Zakres temperatury	10°C–52°C
Zakres temperaturowy pracy urządzenia	0°C–40°C
Masa analizatora	32 kg

Aparaturę pomiarową oraz mocowanie przepływomierza spalin zaprezentowano na rysunku 4.9, na którym widoczny jest również generator prądu (o mocy 2 kW i masie 21 kg), który służył do zasilania wszystkich urządzeń pomiarowych. System akwizycji danych pozwalał na rejestrację parametrów diagnostycznych pracy silnika z pokładowego systemu diagnostycznego, w tym również parametrów energetycznych (pojazd hybrydowy i elektryczny).

**Rysunek 4.9.** Aparatura badawcza zamontowana w pojazdach podczas badań drogowych

Parametry takie były rejestrowane z częstotliwością 1 Hz, co umożliwiło obróbkę statystyczną wyników. Jednocześnie pozwoliło to na ocenę dynamicznych warunków

jazdy oraz emisji spalin w wykorzystaniu procedury MAW, wymaganej do oceny emisji spalin w testach drogowych RDE.

Przed każdym pomiarem system był kalibrowany gazami wzorcowymi i zerowany powietrzem otoczenia. Masa systemu badawczego składającego się z mobilnego analizatora spalin oraz systemu do pomiaru liczby cząstek stałych wraz z agregatem prądowym wynosiła 75 kg.

## 4.5. Procedura wyznaczenia minimalnej emisji spalin w teście drogowym

W poszukiwaniu najmniejszej wartości emisji spalin w teście RDE wykorzystano zadanie, polegające na poszukiwaniu minimalnej wartości funkcji wielu zmiennych, przy jednoczesnym spełnieniu nałożonych warunków. Zadanie takie sformułowano w postaci:

$$\min \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (4.18)$$

spełniając jednocześnie ograniczenia:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \quad (4.19)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (4.20)$$

gdzie:

$\mathbf{f}$  – funkcja celu,

$\mathbf{h}(\mathbf{x})$  – wektor ograniczeń równościowych,

$\mathbf{g}(\mathbf{x})$  – wektor ograniczeń nierównościowych.

Przedstawiona ogólna postać funkcji celu oraz funkcji ograniczeń będzie wymagała wprowadzenia specyficznych dla nich modyfikacji tak, aby można wykorzystała metodę gradientu sprzężonego. Metoda gradientu sprzężonego należy do grupy metod poszukiwania minimum funkcji wielu zmiennych bez ograniczeń. Ograniczenia równościowe i nierównościowe można uwzględnić przez włączenie ich do funkcji celu.

$$K(\mathbf{x}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + 1/(2\mu) \sum_i h_i^2(\mathbf{x}) + 1/(2\mu) \sum_i W(\mathbf{g}) \quad (4.21)$$

gdzie:

$$W(\mathbf{g}) = \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{g}^{(\min)} \text{ dla } \mathbf{g} \leq \mathbf{g}^{(\min)},$$

- $\mu$  – parametr modyfikowany w procesie optymalizacji.
- $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  to funkcja celu, którą algorytm optymalizacyjny stara się zminimalizować lub maksymalizować. W kontekście problemów optymalizacyjnych jest to zazwyczaj funkcja, której wartość reprezentuje jakość rozwiązania;
- $1/(2\mu) \sum_i h_i^2(\mathbf{x}) - h_i(\mathbf{x})$  to funkcje reprezentujące ograniczenia równości. Suma kwadratów tych ograniczeń służy do usuwania rozwiązań, które nie spełniają ograniczeń równości;
- $W(\mathbf{g})$  - funkcja związana z ograniczeniami nierówności.

W metodzie gradientu sprzężonego nowy kierunek poszukiwań minimum funkcji jest tak wybierany, aby był sprzężony do wszystkich poprzednich. Proces obliczeń przebiega w następujących etapach:



Etap 1.

Zeruje się licznik iteracji  $i$ , wybiera punkt startowy  $X^{(0)}$  oraz wyznacza się pierwszy kierunek poszukiwania rozwiązania:

$$D^{(0)} = -\nabla K(X^{(0)}) \quad (4.22)$$

Etap 2.

Dokonuje się minimalizacji funkcji  $K(X)$  w kierunku  $D^{(i)}$  z krokiem  $\lambda$  zgodnie z zależnością:

$$X^{(i+1)} = X^{(i)} + \lambda D^{(i)} \quad (4.23)$$

Etap 3.

Oblicza się gradient funkcji w punkcie  $X^{(i+1)}$ :

$$D^{(i+1)} = \nabla K(X^{(i+1)}) \quad (4.24)$$

Etap 4.

Jeżeli  $\|D^{(i+1)}\| < \varepsilon$ , wówczas kończymy obliczenia, a punkt  $X^{(i+1)}$  jest poszukiwanym rozwiązaniem. Jeżeli warunek nie jest spełniony i nie przekroczono maksymalnej liczby iteracji, wówczas wyznacza się nowy kierunek poszukiwań:

$$D^{(i+1)} = -\nabla K(X^{(i+1)}) + \beta D^{(i+1)} \quad (4.25)$$

inkrementuje się o jeden licznik iteracji  $i$  oraz wraca do etapu 2. Występujący we wzorze współczynnik  $\beta$  definiowany jest zależnością (np. Fletchera-Reevesa):

$$\beta(i) = [(D^{(i+1)})^T D^{(i+1)}] / [(D^{(i)})^T D^{(i)}] \quad (4.26)$$

Jeżeli zadana liczba iteracji została przekroczona, obliczenia zakończyły się niepowodzeniem. Należy wówczas wybrać inny punkt startowy i przeprowadzić obliczenia ponownie.

## 5. Wyniki badań własnych i ich analiza

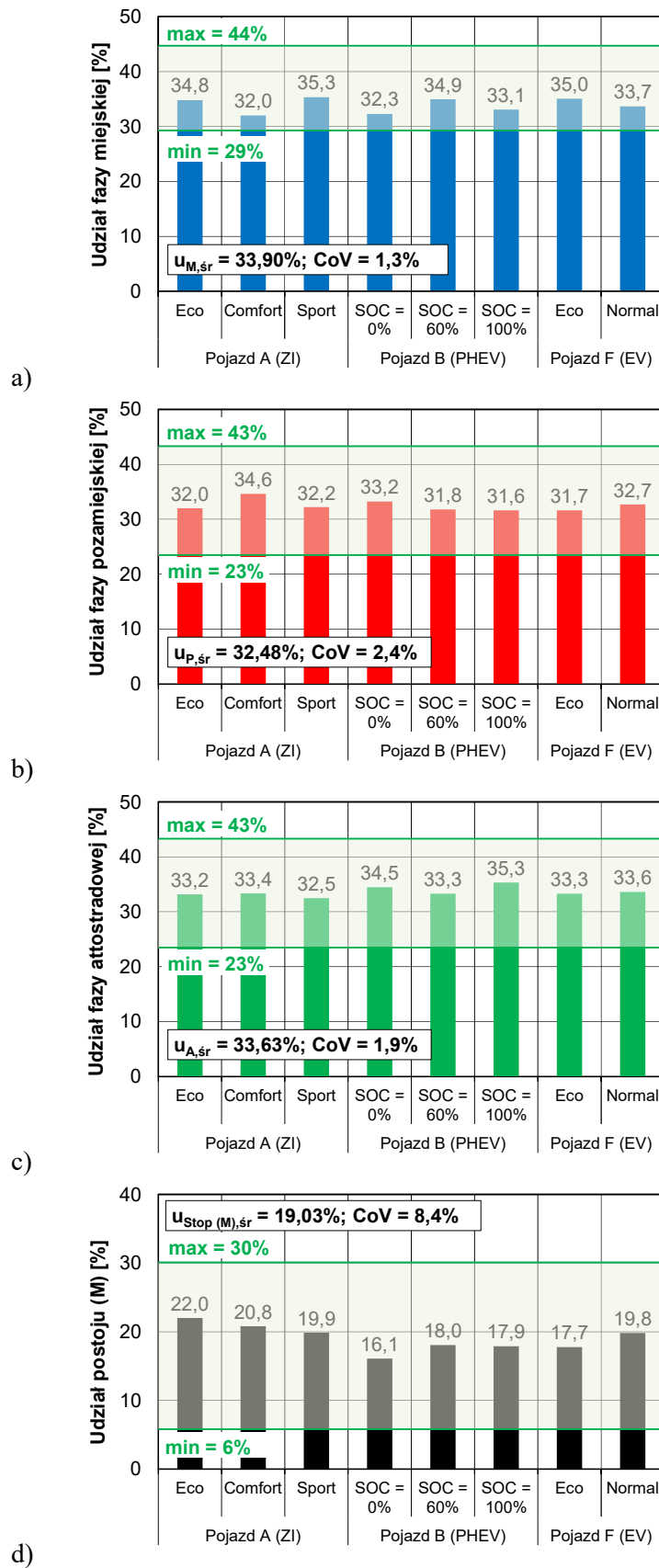
### 5.1. Ocena emisji spalin i zużycia energii pojazdów w testach drogowych

#### 5.1.1. Weryfikacja formalna testów drogowych

Analizy wymagań formalnych dotyczące testów drogowych (zgodnych z RDE) dokonano na podstawie weryfikacji zdefiniowanej w rozdziale 4 zgodności poszczególnych parametrów jazdy. Badania wykonano dla trzech trybów jazdy pojazdem z silnikiem ZI (Eco, Normal, Sport), trzech stanów naładowania akumulatora dla pojazdu z napędem hybrydowym (SOC = 0%, 60% i 100%) oraz dla dwóch trybów jazdy pojazdem elektrycznym (Eco i Normal). Wykazano dużą zgodność dla parametrów ruchu (na wybranych przykładach) podając dopuszczalny zakres zmienności (jeśli jest to wymagane) oraz wartość uzyskanego parametru. Procentowy udział jazdy w części miejskiej w czasie testu drogowego był najmniejszy w przypadku pojazdu wyposażonego w silnik hybrydowy (32,4%), a największy dla pojazdu z napędem benzynowym (34%). Dla pojazdu z napędem elektrycznym średni udział części miejskiej podczas testu to 33,4% (rys. 5.1a). Wszystkie przejazdy badanymi pojazdami charakteryzowały się spełnieniem wymagań udziału części miejskiej, a wartość średnia dla wszystkich obiektów wynosiła 33,9% przy CoV = 1,3%.

Procentowy udział części pozamiejskiej we wszystkich testach mieścił się w dopuszczalnym zakresie 29–44%. Procentowy udział czasu części pozamiejskiej w testach RDE był największy dla pojazdu wyposażonego w silnik benzynowy (33,9%), a najmniejszy dla pojazdu z napędem hybrydowym i elektrycznym (średnia wartość to 32,2%). Pod tym względem wszystkie przejazdy były ważne – zawierały się w granicach 23–44% (rys. 5.1b). Wartość średnia udziału części miejskiej dla wszystkich obiektów wynosiła 32,8%, co przy CoV wynoszącym 2,4% potwierdza powtarzalność tego parametru.

Analiza otrzymanych wyników dotycząca udziału czasu części autostradowej wykazała, że największą średnią wartość tego parametru otrzymano dla pojazdu z napędem hybrydowym (34,4%), a najmniejszą dla pojazdu benzynowego – 33,0%. Przejazd pojazdem elektrycznym w teście RDE wykazał udział w części autostradowej równy 33,5%. Wszystkie wartości udziału części autostradowej w teście RDE dla badanych obiektów mieściły się w dopuszczalnym zakresie 23–43% (rys. 5.1c). Wartość średnia tego parametru to 33,63% przy zmienności wynoszącej CoV = 1,9%.



Rysunek 5.1. Porównanie wybranych parametrów testów drogowych uzyskanych i wymaganych dla następujących danych: a) udziału części miejskiej, b) udziału części pozamiejskiej, c) udziału części autostradowej, d) udziału postoju w części miejskiej testu RDE

Uzyskane wyniki udziału dystansu jazdy w każdej części (miejskiej, pozamiejskiej, autostradowej) spełniały wymagania testu RDE. Oznacza to, że każdy udział poszczególnych częściach testu w kilku procentach (od 1,3% do 2,4%) odbiegał od wartości średniej, co potwierdza zbliżoną wartość tego parametru, a jednocześnie upoważnia do stwierdzenia, że przejazdy były powtarzalne w omawianym zakresie.

Dokładną analizę parametrów trasy dla badanych pojazdów pokazano w tabelicy 5.1, w której wyszczególniono, m.in. długość części miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej oraz całkowity dystans testu, a także podano dopuszczalne granice zmienności tych parametrów.

**Tablica 5.1.** Parametry trasy wraz z opisem spełnienia kryteriów oraz wyznaczenia wskaźnika CoV, reprezentującego odmiennosć warunków drogowych podczas badań pojazdów (dla każdego pojazdu podano uzyskane wyniki w odpowiednich trybach pracy) – pierwszy etap badań

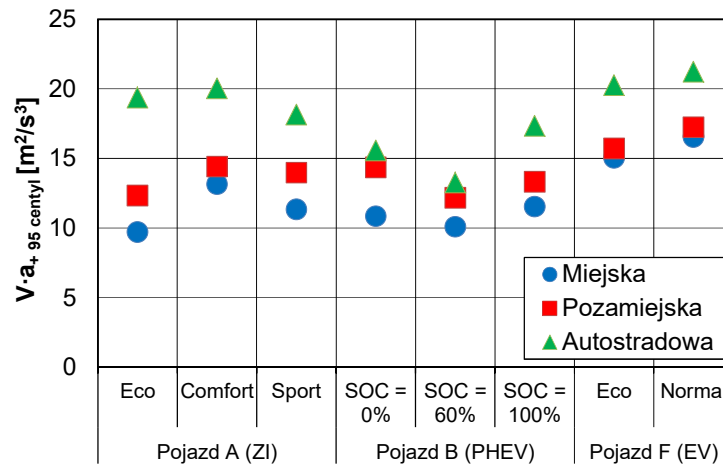
Parametr testu	Pojazd A (ZI)	Pojazd B (PHEV)	Pojazd F (EV)	Wymagania Pojazd A/B/F	Poprawny/ CoV [%]
Miejska (M) [km]	34,7 32,0 35,4	31,2 33,9 32,2	34,5 32,4	> 16	OK 4,0%
Pozamiejska (P) [km]	31,9 34,6 32,3	32,1 30,8 30,8	31,2 31,4	> 16	OK 2,6%
Autostradowa (A) [km]	33,1 33,3 32,6	33,3 32,3 34,4	32,8 32,3	> 16	OK 1,6%
Całkowity dystans [km]	99,7 100 100,2	96,6 97,0 97,4	98,5 96,1	> 48	OK 1,4%
Udział (M) [%]	34,8 32,0 35,3	32,3 34,9 33,1	35,0 33,7	29–44	OK 3,3%
Udział (P) [%]	32,0 34,6 32,2	33,2 31,8 31,6	31,7 32,7	33 ±10	OK 2,4%
Udział (A) [%]	33,2 33,4 32,5	34,5 33,3 35,3	33,3 33,6	33 ±10	OK 1,9%
Prędkość średnia (M) [km/h]	27,9 26,8 29,7	31,9 29,9 31,1	32,9 29,7	15–40	OK 5,0%
Udział postoju (M) [%]	22,0 20,8 19,9	16,1 18,0 17,9	17,7 19,8	6–30	OK 8,4%
Czas ponad 100 km/h (A) [min]	15,6 17,9 15,7	16,1 16,6 16,6	15,2 16,3	> 5	OK 3,7%
Czas testu [min]	105,3 105,1 101,7	101,3 109,2 104,5	103,3 106	90–120	OK 1,8%

Wartości parametrów testu były bardzo zbliżone do siebie dla każdego badanego pojazdu, o czym świadczy uzyskany wskaźnik statystyczny CoV wynoszący od 1,6% do 4% (dla długości poszczególnych faz testu). Powtarzalność udziału poszczególnych części testu w całym teście również charakteryzowała się bardzo małym wskaźnikiem rozbieżności CoV wynoszącym dla tego parametru od 1,9% do 3,3%. Największą rozbieżność w wykonanych testach stanowiła udział postoju w części miejskiej testu (wynosił 8,4%) i był on spowodowany rzeczywistymi warunkami ruchu pojazdów. Ta niepowtarzalność warunków ruchu jest cechą charakterystyczną testów drogowych wskazujących na niemożność uzyskiwania takich samych warunków podczas testów RDE. W związku z tym wszystkie testy były 4-krotnie powtarzane a prezentowane wyniki są wartościami średnimi dla konkretnego przejazdu.

Rozpatrując warunki dynamiczne jazdy, należy zwrócić uwagę na dwa parametry: 95-procentowy centyl iloczynu prędkości i dodatniego przyspieszenia pojazdu ( $V \cdot a_{+95 \text{ centyl}}$ ) oraz względnego przyspieszenia dodatniego (RPA), które zaprezentowano na rys. 5.2. Pierwszy parametr dynamiczny odnosi się do ograniczenia (limitu górnego), tak aby dynamika jazdy w poszczególnych częściach testu nie była zbyt duża. Natomiast drugi wskaźnik (RPA), przedstawia ograniczenie (limit dolny), wymusza minimalne warunki dynamiki ruchu pojazdu.

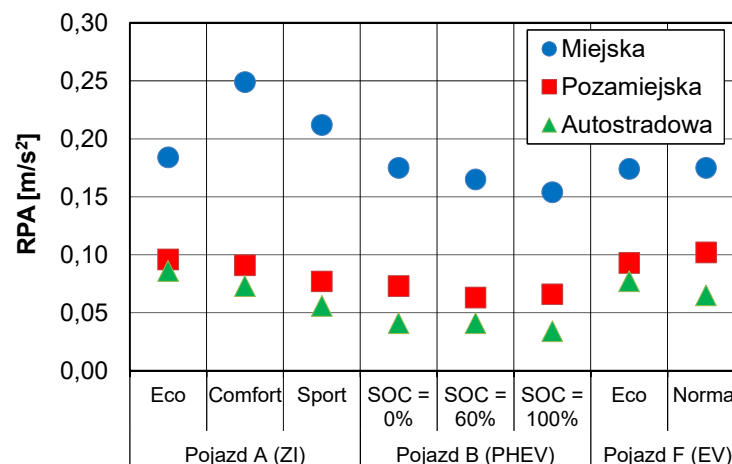
Analizując wyniki 95-procentowego iloczynu prędkości i przyspieszenia pojazdu w części miejskiej można stwierdzić, że przy limicie górnym wynoszącym dla części miejskiej 17–18,5 m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup> (przy prędkości średniej 20–30 km/h) w żadnym badaniu wartość ta nie została przekroczona (rys. 5.2). Największe wartości (15–16 m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>) uzyskano dla pojazdu elektrycznego (ze względu na największy generowany moment obrotowy silnika elektrycznego w zakresie małej prędkości obrotowej), a najmniejsze uzyskano dla pojazdu z napędem hybrydowym (był to przedział wartości 10–12 m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>). Dla części pozamiejskiej limit wartości tego parametru wynosi 25 m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup> dla średniej prędkości jazdy wynoszącej 75 km/h. Również tutaj nie stwierdzono przekroczenia tego parametru, gdyż największe wartości uzyskano również dla pojazdu z napędem elektrycznym (20–21 m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>), natomiast najmniejsze charakteryzowały, tak jak poprzednio, przejazd hybrydowy (14–17 m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>). Podobny charakter wyników otrzymano również dla wyznaczonych parametrów dynamicznych w części autostradowej testu RDE. Limit górny dla tej części testu wynosi 28–28,6 m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup> przy średniej prędkości 120–130 km/h. Wartości uzyskane dla przejazdu w części autostradowej to: 18–20 m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup> dla pojazdu z konwencjonalnym napędem benzynowym, 20–21 m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup> dla pojazdu z napędem elektrycznym oraz 18–22 m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup> dla pojazdu z napędem hybrydowym typu plug-in. Z analizy tej wynika, że najbardziej dynamicznym pojazdem jest pojazd elektryczny oraz pojazd z napędem spalinowym. Pojazd z napędem hybrydowym charakteryzował się znaczną inercją, jednakże widoczna była tendencja oceniana przez wskaźnik 95-procentowego iloczynu prędkości i przyspieszenia w odniesieniu do większej dynamiki jazdy w części miejskiej,

gdy w większym stopniu był wykorzystywany silnik elektryczny (dla SOC = 100% parametr  $V \cdot a_{+95 \text{ centyl}}$  był większy o około 20% w stosunku do SOC = 0% lub SOC = 60%).



**Rysunek 5.2.** Porównanie 95-procentowego centyla iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego w poszczególnych częściach testu RDE dla wszystkich badanych pojazdów

Analiza kolejnego parametru dotyczącego warunków dynamicznych – względnego przyspieszenia dodatniego – wskazuje na to, że w warunkach jazdy miejskiej minimum tego parametru wynosi 0,13-0,14  $\text{m/s}^2$  dla prędkości średniej wynoszącej 20–30  $\text{km/h}$  (wartości limitu podano w kolejności zgodnej ze zwiększającą się prędkością średnią – zgodnie z przepisami RDE). Obserwując dane z rysunku 5.3, można stwierdzić brak przekroczenia limitu dolnego, gdyż wszystkie wartości RPA dotyczące jazdy miejskiej są większe od 0,15  $\text{m/s}^2$ .



**Rysunek 5.3.** Porównanie względnego przyspieszenia dodatniego w poszczególnych częściach testu RDE dla wszystkich badanych pojazdów

Największe wartości RPA dotyczą pojazdu z silnikiem benzynowym ( $RPA = 0,17-0,25 \text{ ms}^2$ ), natomiast dla pojazdów z napędem hybrydowym i elektrycznym wartości te wynoszą od  $0,15 \text{ m/s}^2$  do  $0,18 \text{ m/s}^2$ . W części pozamiejskiej testu RDE wartości minimalne RPA są określone na poziomie  $0,05 \text{ m/s}^2$  dla prędkości średniej około  $75 \text{ km/h}$ . Z analizy rysunku 5.3 wynika, że wymóg wartości minimalnej jest spełniony, a więc wszystkie wyznaczone wartości RPA są większe od limitu. Dla pojazdu z silnikiem benzynowym wynoszą one od  $0,07 \text{ m/s}^2$  do  $0,1 \text{ m/s}^2$ , dla pojazdu z napędem hybrydowym wyznaczone wartości są z zakresu  $0,06-0,08 \text{ m/s}^2$ , a dla pojazdu z napędem elektrycznym mieszczą się w przedziale  $0,09-0,1 \text{ m/s}^2$ . W części autostradowej minimalne wartości RPA są na poziomie  $0,04-0,04 \text{ m/s}^2$  dla pojazdu z napędem hybrydowym dla różnych poziomów SOC, najwyższa wartość wynosi ok.  $0,09 \text{ m/s}^2$  dla pojazdu konwencjonalnego o zapłonie iskrowym.

### 5.1.2. Analiza wyników emisji spalin

Wartości emisji spalin rozpatrzono w aspekcie wyznaczenia wskaźników CF, uwzględniających klasę emisyjną pojazdów. Wskaźniki CF są określone dla całego testu jako iloraz emisji drogowej spalin w teście drogowym RDE oraz emisji drogowej spalin wynikającej z limitu odpowiadającej klasie emisyjnej pojazdu:

$$CF = b_{x,RDE}/b_{x,Euro} \quad (5.1)$$

gdzie:

b – emisja drogowa danego składnika spalin, g/km,

x – składnik spalin (CO, NO<sub>x</sub>, PN).

Według przepisów dotyczących badań RDE maksymalna wartość wskaźnika CF dla PN wynosi 1,5; dla NO<sub>x</sub> wynosi 1,43; a wartość dla tlenku węgla jest podawana tylko informacyjnie. Wartość wskaźnika CF została wyznaczona narastająco dla każdej chwili testu i uzależniono ją od odległości przebytej drogi testu. Wobec tego, że rejestracja natężenia emisji spalin oraz przebytej drogi następuje z częstotliwością 1 Hz, otrzymuje się zależność (w takim przypadku natężenie emisji równe jest masie związku):

$$CF(s) = \int_0^S b_{x,RDE} / b_{x,Euro} = \frac{\sum_{i=0}^s m_i}{\sum_{i=0}^s S_i} / b_{x,Euro} \quad (5.2)$$

gdzie:

S – droga, km,

m – masa związku szkodliwego, g.

Analiza wskaźnika emisji dwutlenku węgla ( $CF_{CO_2}$ , gdzie limit CO<sub>2</sub> przyjęto  $120 \text{ g/km}$ ) uwidacznia zróżnicowany jego charakter w zależności od napędu stosowanego w pojeździe (rys. 5.4a). Dla samochodów z konwencjonalnym napędem benzynowym

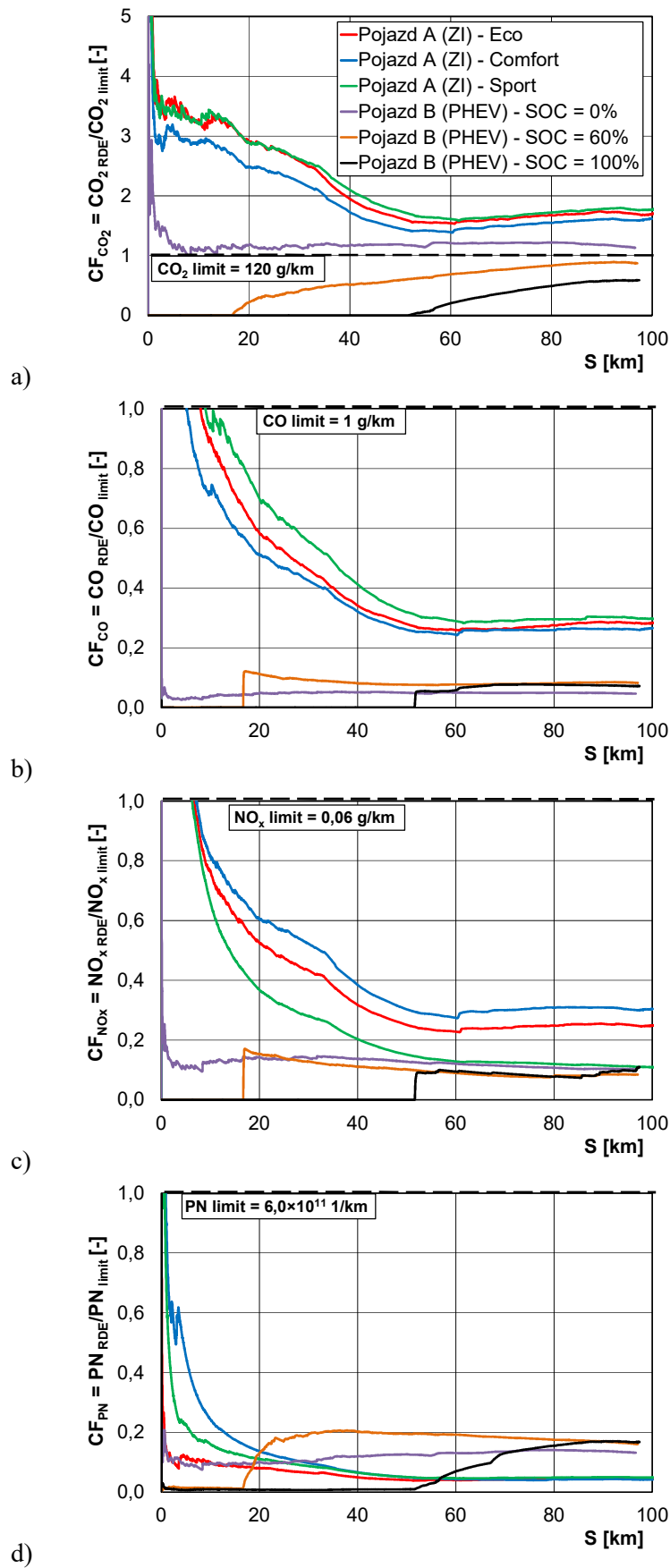
wartości wskaźnika CF w początkowym okresie testu przybierają wartości z zakresu 3–4, świadczące o znacząco większej emisji drogowej dwutlenku węgla niż zakładany limit 120 g/km. Również podobną sytuację zaobserwowano dla pojazdu z napędem hybrydowym plug-in, w którym stan naładowania akumulatora wynosił SOC = 0%, dla którego rozruch silnika spalinowego następował już w początkowym okresie testu RDE. W związku z tym, że ten okres charakteryzował się małą prędkością średnią jazdy i znacznym czasem postoju (w granicach dopuszczalnych) pojazdu, wartości wskaźnika są kilkakrotnie większe w tym okresie niż w okresach późniejszych, w których następowało sumowanie masy danego związku i przebytego dystansu.

Odmianą charakterystykę obserwowano dla pojazdu z napędem hybrydowym o znacznym początkowym naładowaniu akumulatora (SOC = 60% i SOC = 100%): w związku z tym, że silnik spalinowy uruchamiał się po raz pierwszy podczas jazdy ze znaczną prędkością brak jest charakterystycznego zwiększania wartości wskaźnika CF (jak w przypadku pojazdu z silnikiem benzynowym). W takim przypadku wartość wskaźnika CF zwiększa się do ustalonej wartości, wynikającej z całej trasy badawczej (od pierwszego uruchomienia silnika). Końcowe wartości wskaźnika CF (dla S = 96 km) są wartością wynikającą z porównania emisji drogowej dwutlenku w całym teście drogowym RDE do wartości przyjętej jako limit (120 g/km).

Podobny charakter zmian obserwuje się również dla wskaźnika emisji CF dotyczącego tlenku węgla i tlenków azotu (rys. 5.4b i c). W tych dwóch przejazdach różnica polega na limicie danego związku, jednak charakterystyka zmian krzywych CF(S) pozostaje bardzo zbliżona. Wyraźnie zaznacza się wpływ rodzaju napędu na końcowy poziom krzywych, a jednocześnie fakt, że osiągnięte końcowe wartości wskaźników emisji oscylują w granicach 20–30-procentowego limitu określonego normą emisji spalin. Zbliżone są również przebiegi świadczące o dobrym odwzorowaniu zmienności omawianych związków szkodliwych. Początek testu charakteryzuje się znacząco większą wartością wskaźnika z uwagi na nie uzyskanie temperatury roboczej jednostki napędowej oraz pozasilnikowych układów oczyszczania. W miarę zwiększania się dystansu efektywność pracy urządzeń ograniczających emisję spalin zwiększa się, co powoduje zmniejszenie wartości wskaźnika emisji CF.

Charakterystyka zmiany wskaźnika emisji CF dotyczącego liczby cząstek stałych ma zbliżony charakter jakościowy do poprzednio analizowanych przypadków (rys. 5.4d), jednak ilościowo jest odmienny. Rozpatrując wskaźniki emisji CF dla dwutlenku węgla, tlenku węgla, tlenków azotu końcowa wartość tego wskaźnika dla pojazdów z konwencjonalnym silnikiem benzynowym była większa od wskaźnika pojazdu z napędem hybrydowym. Różnica ta zawsze była niekorzystna dla pojazdu z konwencjonalnym napędem benzynowym, natomiast rozpatrując wskaźnik emisji CF odnoszący się do liczby cząstek stałych otrzymano zależność odwrotną.





**Rysunek 5.4.** Porównanie wskaźników emisji CF dla wybranych związków szkodliwych podczas badań pojazdów: a)  $CO_2$ , b) CO, c)  $NO_x$ , d) PN

Końcowe wartości wskaźnika emisji CF dla rozpatrywanego związku są większe dla pojazdu z napędem hybrydowym niż dla pojazdu z napędem spalinowym, mimo nawet tego, że silnik spalinowy w układzie hybrydowym pracował tylko przez fragment całego testu RDE.

Kolejny rozpatrywany aspekt emisji spalin to ocena szybkości przyrostu emisji w stosunku do przebytej drogi pojazdu w teście RDE. Rozpatrzono tutaj jedynie test (oznaczony  $s = 0$ ), w którym silnik spalinowy zostaje uruchomiony pierwszy raz, natomiast koniec testu oznaczono parametrem  $s = 1$ . Oznacza to, że w przypadku pojazdu z napędem hybrydowym, w którym SOC = 100%, a pierwsze uruchomienie silnika spalinowego nastąpiło po około 50 km jazdy, drogę tę oznaczono również  $S = 0$  (rys. 5.5). W związku z tym zakres zmienności  $S$  od 0 do 1 oznacza uruchomienie silnika dla  $s = 0$  i koniec testu RDE dla  $s = 1$ . Analizując poszczególne charakterystyki emisji związków szkodliwych, tylko dla emisji drogowej dwutlenku węgla można stwierdzić proporcjonalną zależność emisji tego związku i przebytej drogi – niezależnie od rodzaju badanego pojazdu i stopnia naładowania akumulatora. W większości pozostałych testów zawsze szybciej zwiększała się emisja rozpatrywanych związków toksycznych, niż udział drogi z uruchomionym silnikiem spalinowym. Szczególną uwagę zwracają przebiegi dla pojazdu z napędem hybrydowym z SOC = 100%, wyróżniające się znaczną początkową emisją danego związku toksycznego. Wynika bowiem z nich, że w pierwszym okresie po uruchomieniu silnika podczas dużych prędkości jazdy pojazdu generowane jest około 40% względnej emisji tlenku węgla i tlenków azotu. Wynika to z gwałtownego zwiększania prędkości obrotowej i obciążenia silnika, a jednocześnie skraca się okres nagrzewania urządzeń oczyszczających spaliny, w związku z czym, natężenie emisji po krótkim czasie jest znacząco mniejsze. Stan taki nie oznacza, że emisja tych związków jest duża, a jedynie, że udział tej fazy jest istotny w całkowitej emisji danego związku.

Rozporządzenie Unii Europejskiej [25], dotyczące RDE wprowadziło znowelizowane zasady wyznaczania emisji spalin na podstawie emisji dwutlenku węgla. W związku z tym podstawą wyznaczania emisji składników spalin ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PN}$ ) w teście RDE stała się znajomość emisji dwutlenku węgla we wszystkich fazach testu WLTC. Wartość współczynnika oceny  $\text{RF}_k$  wyniku emisji w części miejskiej testu (M) lub całym teście (RDE) zależy od stosunku emisji dwutlenku węgla w teście RDE oraz w czasie testu WLTC –  $r_k$  [56]:

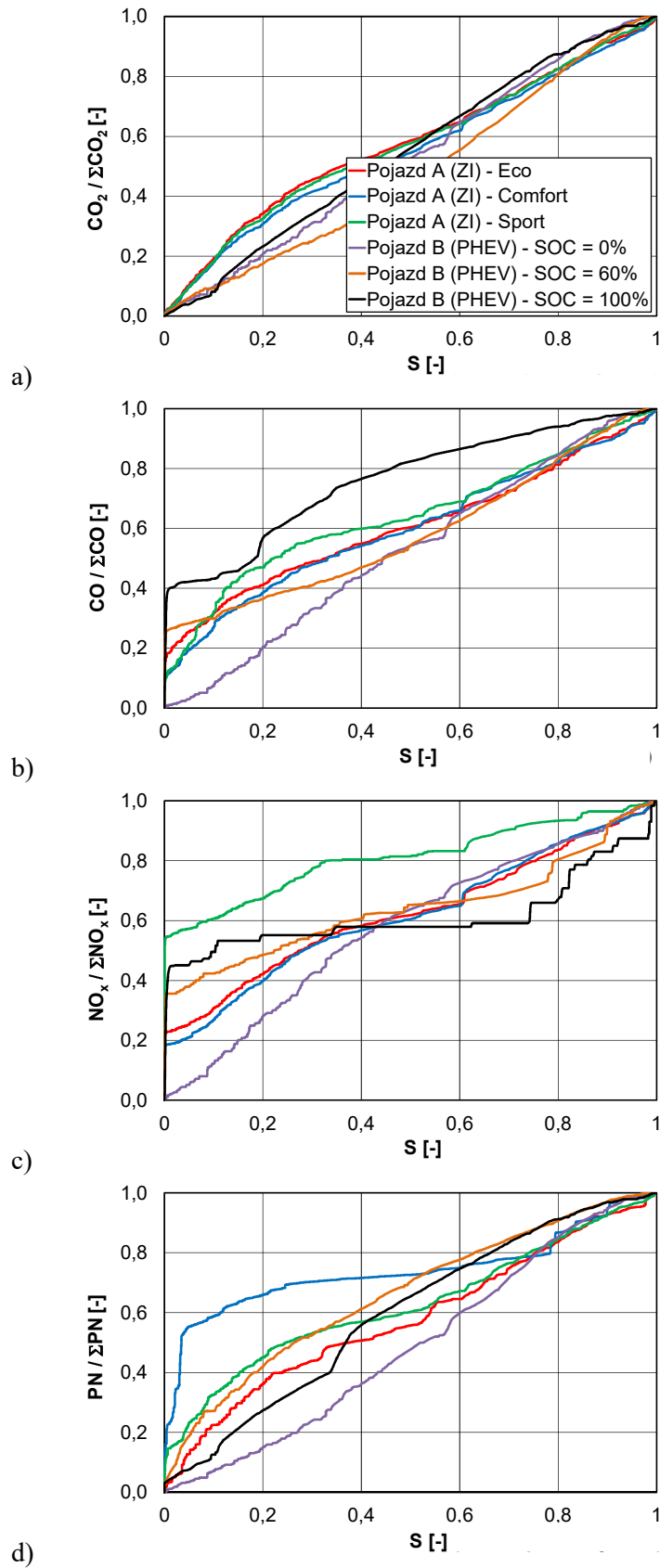
- dla pojazdów o napędzie konwencjonalnym:

$$r_k = b_{\text{CO}_2, \text{RDE}, k} / b_{\text{CO}_2, \text{WLTC}, k} \quad (5.3)$$

- dla pojazdów o napędzie hybrydowym plug-in:

$$r_k = b_{\text{CO}_2, \text{RDE}, k} / b_{\text{CO}_2, \text{WLTC}, k} \cdot 0,85 / \text{IC}_k \quad (5.4)$$

$$\text{IC}_k = \frac{S_{\text{ICE}, k}}{S_{\text{ICE}, k} + S_{\text{EV}, k}} \quad (5.5)$$



**Rysunek 5.5.** Zależności dotyczące szybkości narastania masy związków szkodliwych w zależności od przebytej drogi pojazdu w warunkach pracy silnika spalinowego: a) dwutlenku węgla, b) tlenku węgla, c) tlenków azotu, d) liczby cząstek stałych

gdzie:

$k$  – część testu (miejska – M lub cały – RDE),

$b_{\text{CO}_2, \text{RDE}}$  – emisja drogowa dwutlenku węgla w teście RDE,

$b_{\text{CO}_2, \text{WLTC}}$  – emisja drogowa dwutlenku węgla w teście WLTC,

$S_{\text{ICE}}$  – odległość przejechana z użyciem silnika spalinowego,

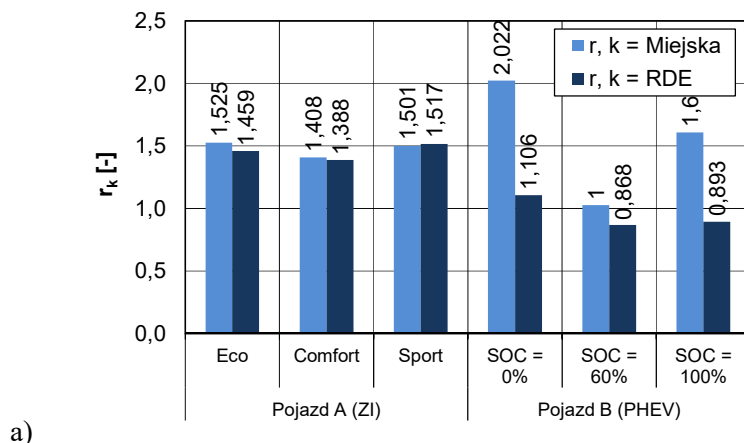
$S_{\text{EV}}$  – odległość przejechana z użyciem silnika elektrycznego,

$$\text{RF}_k = \begin{cases} 1 & \text{dla } r_k \leq 1,3 \\ -\frac{10}{6}r_k + \frac{19}{6} & \text{dla } r_k \in (1,3; 1,5) \\ \frac{1}{r_k} & \text{dla } r_k > 1,5 \end{cases} \quad (5.6)$$

Analiza uzyskanych wyników emisji dwutlenku węgla dla pojazdu konwencjonalnego i hybrydowego znacząco uwidacznia, że w części miejskiej jest ona znacząco większa niż w teście homologacyjnym WLTC, co przekłada się na wartości wskaźników zwiększenia emisji drogowej dwutlenku węgla  $r_k$  (rys. 5.6a) oraz wskaźnika RF (rys. 5.6b).

Podczas badań w testach RDE dla pojazdu konwencjonalnego średnie wartości emisji dwutlenku przekroczyły wartości emisji drogowej powiększonej o 30% tego związku w teście WLTC, więc dla tego pojazdu (w części miejskiej,  $k = M$ ) wskaźnik  $r_M$  zawiera się w granicach od 1,408 do 1,525, natomiast dla całego testu ( $k = \text{RDE}$ ) wskaźnik ten wynosi od 1,388 do 1,517. Wartości współczynnika RF wynoszą odpowiednio: dla części miejskiej testu drogowego  $\text{RF}_M \in (0,656; 0,821)$ , natomiast dla całego testu  $\text{RF}_{\text{RDE}} \in (0,659; 0,854)$ .

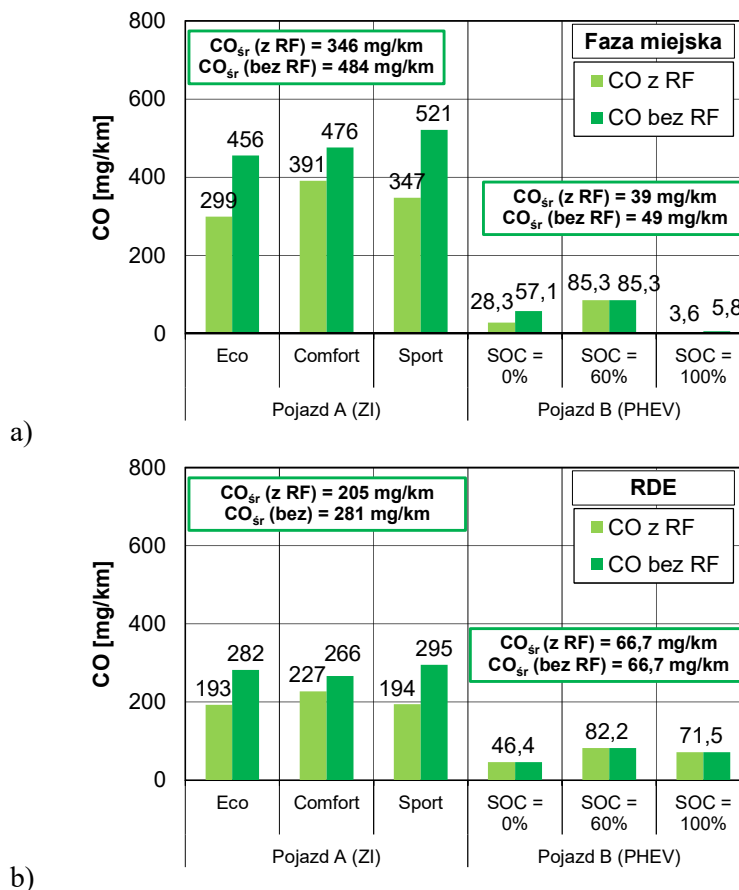
Również podczas badań dla pojazdu z napędem hybrydowym w testach drogowych średnie wartości emisji dwutlenku przekroczyły wartości emisji drogowej powiększonej o 30% tego związku w teście WLTC. Dla pojazdu z napędem hybrydowym plug-in przekroczenia te miały większą wartość niż dla pojazdu konwencjonalnego. W związku z tym dla pojazdu z napędem hybrydowym (w części miejskiej,  $k = M$ ) wskaźnik  $r_M$  zawierał się w granicach od 1,027 do 2,022, natomiast dla całego testu ( $k = \text{RDE}$ ) sytuacja była odwrotna niż dla pojazdu konwencjonalnego i wskaźnik ten wynosi od 0,868 do 1,106. Wartości współczynnika RF wynoszą dla pojazdu z napędem hybrydowym odpowiednio: dla części miejskiej  $\text{RF}_M \in (0,459; 1,0)$ , natomiast dla całego testu  $\text{RF}_{\text{RDE}} = 1,0$ . Wynika z tego, że badany pojazd hybrydowy znacznie przekraczał emisję dwutlenku węgla w części miejskiej testu RDE w stosunku do testu WLTC, natomiast w całym teście RDE emisja dwutlenku węgla nie odbiegała o więcej niż 30% w stosunku do testu WLTC.



**Rysunek 5.6.** Wartości wskaźników  $r_k$  (a) i współczynników  $RF_k$  (b) zwiększenia emisji dwutlenku węgla dla wszystkich przejazdów

Wartości wyznaczonych wskaźników przekładają się w sposób bezpośredni na używane różnice w wartościach emisji drogowej spalin. Znaczne odstępstwa w emisji drogowej uzyskiwane w teście RDE w stosunku do testu WLTC są niwelowane przez wskaźniki RF.

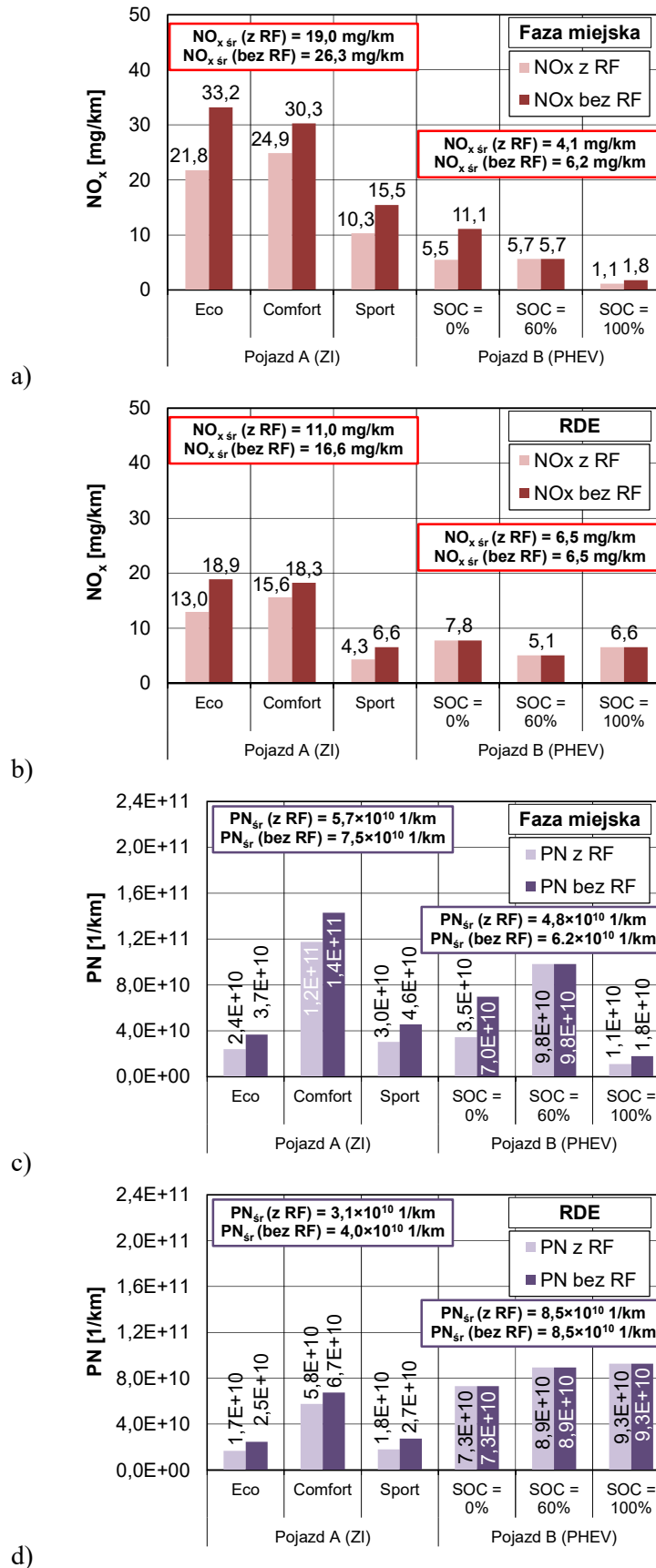
Rozpatrując emisję drogową tlenku węgla w fazie miejskiej testu RDE zauważa się kilkadziesiąt razy mniejszą emisję z pojazdów hybrydowych (zależnie od stopnia naładowania akumulatora i niezależnie od wykorzystania współczynników RF) w stosunku do pojazdów z silnikami spalinowymi (rys. 5.7a). Dla pojazdów hybrydowych dla SOC = 0% krotność ta wynosi około 6–8, dla SOC = 60% – około 4–6 razy, a dla SOC = 100% – najwięcej, bo 80–90 razy. Znacznie mniejsze różnice notuje się rozpatrując cały test RDE: jest to 4–6 razy, 2–3 razy oraz 3–4 razy, odpowiednio dla stopnia naładowania równego 0%, 60% oraz 100%. Wartością referencyjną była wartość średnia emisji drogowej dla pojazdu z silnikiem benzynowym z/bez uwzględnienia wskaźnika RF. Porównując tylko wartości średnie emisji drogowej z uwzględnieniem i bez uwzględnienia wskaźnika RF wynika, że samochód z silnikiem benzynowym emituje około 10 razy więcej tlenku węgla niż pojazd hybrydowy w części miejskiej testu RDE oraz około 3–4 razy więcej w całym teście RDE (rys. 5.7b).



**Rysunek 5.7.** Wartości emisji drogowej tlenku węgla wyznaczone z wykorzystaniem wskaźników emisji RF w części miejskiej testu RDE (a) oraz w całym teście RDE (b) dla badanych pojazdów z silnikami spalinowymi

W analizie emisji drogowej tlenków azotu uzyskano podobne wnioski, jednak o mniejszym potencjale ilościowym. Średnia emisja drogowa tlenków azotu dla pojazdu z napędem hybrydowym jest mniejsza w części miejskiej testu RDE około 5 razy (gdy uwzględnimy współczynnik RF) oraz 4 razy – bez uwzględniania tego wskaźnika (rys. 5.8a). Porównując emisję drogową tego związku dla całego testu RDE otrzymuje się wartości 1,5–2,5 razy mniejsze dla pojazdu z napędem hybrydowym w zależności wykorzystania (lub nie) współczynnika RF (rys. 5.8b).

Analiza liczby cząstek stałych w części miejskiej testu RDE (rys. 5.8c) uwidacznia, że pojazdy z napędem hybrydowym emitują o około 20% mniej cząstek – niezależnie czy wykorzystuje się współczynnik RF. Jeśli rozpatruje się cały test RDE w aspekcie liczby cząstek stałych wyniki są odmienne: około 2-krotnie więcej cząstek emitują pojazdy z napędem hybrydowym – co wynika głównie z charakteru ich pracy, gdzie krótkotrwałe wyłączenie silnika spalinowego generuje bardzo dużą ich liczbę podczas kolejnych rozruchów (rys. 5.8d).



**Rysunek 5.8.** Wartości emisji drogowej tlenków azotu oraz liczby drogowej cząstek stałych wyznaczone z wykorzystaniem wskaźników emisji RF w części miejskiej testu RDE oraz w całym teście RDE dla badanych pojazdów z silnikami spalinowymi

Podsumowując rozważania dotyczące emisji związków szkodliwych w spalinach pojazdów konwencjonalnych (benzynowych) oraz hybrydowych należy stwierdzić, że znacząco mniejsze wyniki dla całego testu RDE otrzymuje się dla pojazdów hybrydowych, tlenku węgla – około 3–4 razy, tlenków azotu – około 2–3 razy. Z uwagi jednak na przerywany tryb pracy silników spalinowych pojazdów hybrydowych odnotowana została ponad 2-krotnie większa liczba cząstek stałych w teście RDE w stosunku do pojazdów konwencjonalnych.

Podsumowując, badania te potwierdzają, że pojazdy z napędem hybrydowym mogą przyczynić się do zmniejszenia emisji CO i NO<sub>x</sub> w ruchu miejskim, co ma pozytywny wpływ na jakość powietrza. Jednak konieczne jest dalsze badanie i optymalizacja pracy silników spalinowych w pojazdach hybrydowych, aby ograniczyć emisję cząstek stałych. To ważny krok w kierunku poprawy ekologiczności transportu i ochrony środowiska.

### 5.1.3. Pomiary energochłonności

Pomiarów energochłonności badanych pojazdów dokonano nie tylko w aspekcie elektrycznym, ale całościowo – energetycznym. Do tego celu wyznaczono zużycie energii ze spalania paliwa w silniku spalinowym, zużycia energii w samochodzie hybrydowym (ze spalania paliwa i elektrycznej) oraz w samochodzie elektrycznym (tylko zużycie energii elektrycznej). W pojeździe hybrydowym i elektrycznym wzięto również pod uwagę odzysk regeneracyjny podczas hamowania pojazdem. W dalszej części zaprezentowanych analiz energię zużywaną oznaczano jako dodatnią, a energię odzyskiwaną jako ujemną.

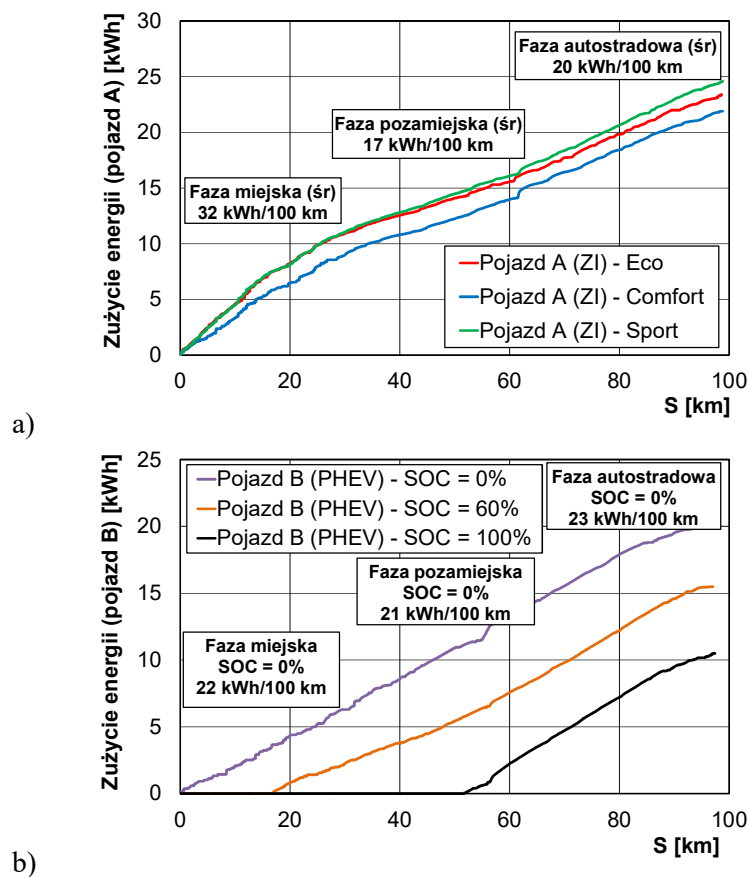
W pierwszym etapie wyznaczono energię wykorzystywaną przez silnik spalinowy, gdzie dla zarejestrowanych wartości obciążenia silnika i prędkości obrotowej silnika (z systemu diagnostycznego pojazdu), przy wykorzystaniu charakterystyki silnika spalinowego  $M = f(n)$  wyznaczono moc chwilową silnika. Znajomość tego parametru pozwoliła na wyznaczenie chwilowego zapotrzebowania energetycznego pojazdu podczas badań, a w konsekwencji całej energii zużytej podczas testu RDE.

W drugim etapie wyznaczono zużycie energii elektrycznej dla pojazdu z napędem hybrydowym i elektrycznego z pomiarów przepływu energii z/do akumulatora oraz przepływu prądu do silnika elektrycznego. Zużycie energii elektrycznej przez silnik elektryczny oznaczano wartością dodatnią, natomiast wytwarzanie energii przez generator i odzysk energii z układu hamownia – wartością ujemną.

Analizując zapotrzebowanie energetyczne pojazdu konwencjonalnego wyposażonego w silnik spalinowy stwierdzono, że średnia wartość w części miejskiej testu RDE wynosiła około 32 kWh/100 km, w części pozamiejskiej około 17 kWh/100 km, a w



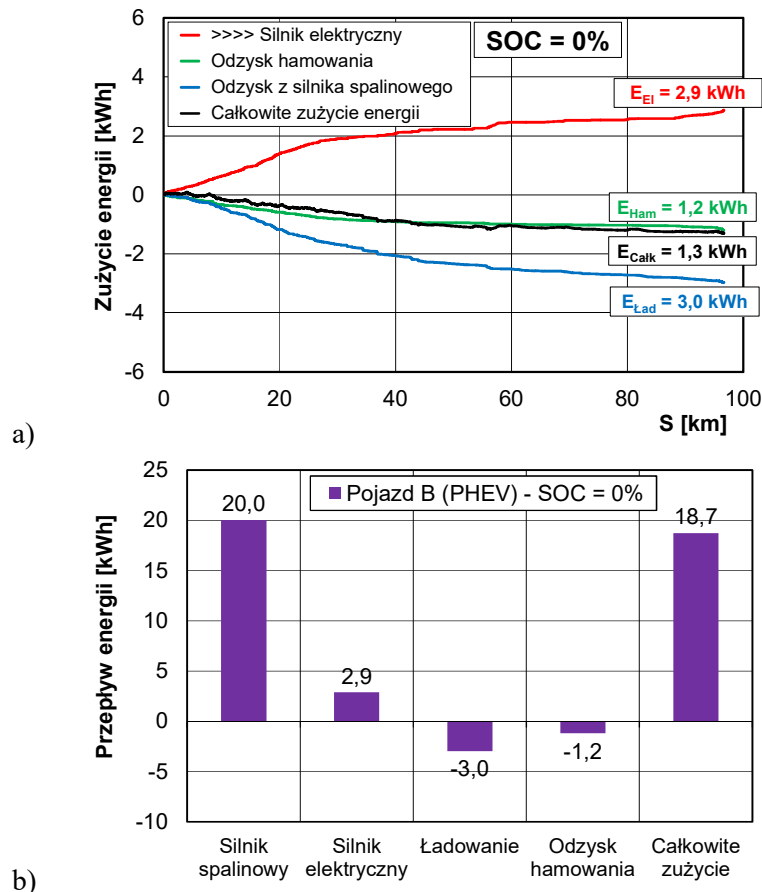
części autostradowej około 20 kWh/100 km (rys. 5.9a). Wartości te różniły się między sobą o około 5% w zależności trybu jazdy pojazdu (Eco, Comfort, Sport). Dla pojazdu z napędem hybrydowym zapotrzebowanie energetyczne, wynikające z pracy silnika spalinowego przyjmowało względnie stałe wartości i wynosiło dla części miejskiej – 22 kWh/100 km, w części pozamiejskiej – 21 kWh/100 km, a w części autostradowej – około 23 kWh/100 km. Należy zaznaczyć, że wartości te odnoszą się do sytuacji, w której poziom naładowania akumulatora pojazdu z napędem hybrydowym wynosił SOC = 0%. Dla innego stopnia naładowania akumulatora nachylenie krzywych zużycia energii były podobne (rys. 5.9b), co pozwala na stwierdzenie podobieństwa zużycia energii..



**Rysunek 5.9.** Sumaryczne zapotrzebowane energetyczne dla silnika spalinowego pojazdu konwencjonalnego (a) i hybrydowego (b) z podziałem na poszczególne fazy testu RDE

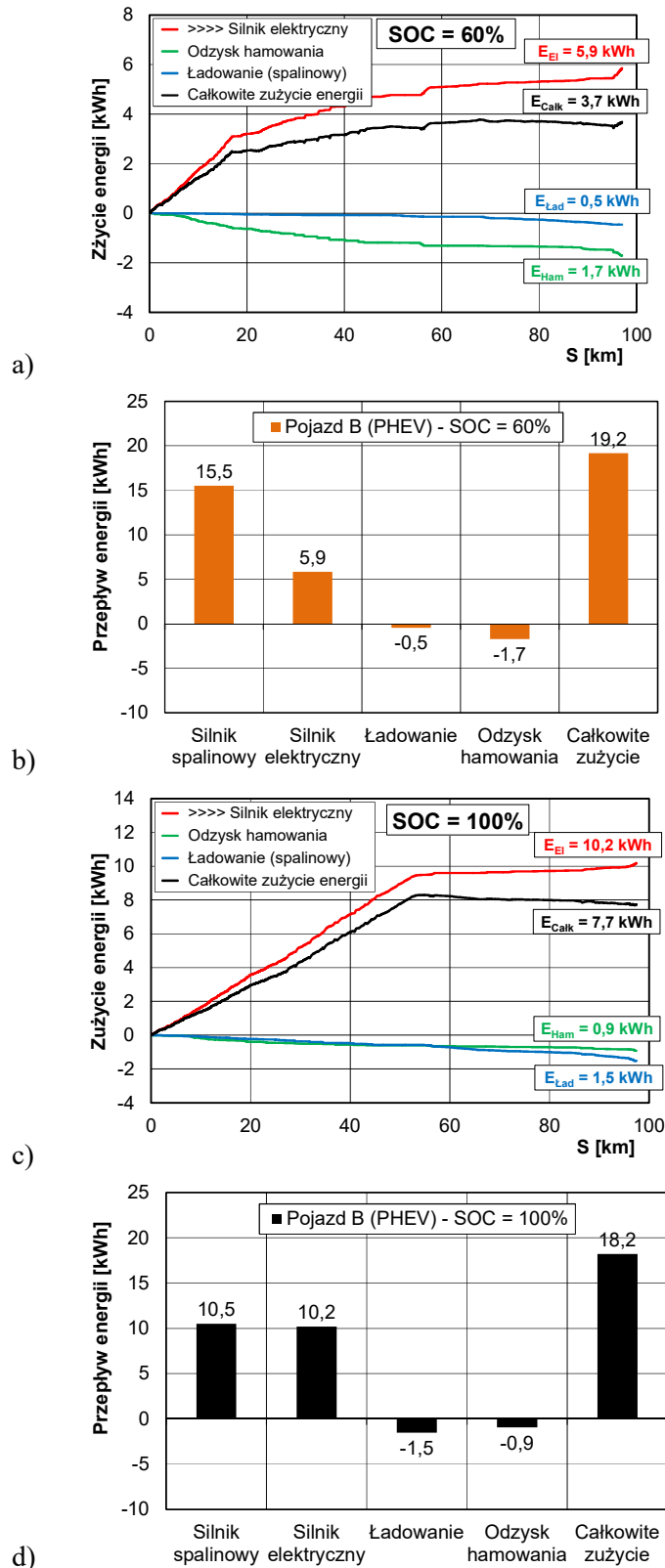
W dalszej kolejności dokonano analizy wartości zużycia energii w pojeździe hybrydowym w zależności od stopnia naładowania akumulatora (0%, 60%, 100%) w całym teście RDE. Uwagę zwraca odmienność przebiegu skumulowanych wartości energii, a jednocześnie całkowite zużycie energii elektrycznej przez pojazdy z napędem hybrydowym. Dla pojazdu z napędem hybrydowym z początkowym stanem rozładowania akumulatora SOC = 0% (rys. 5.10a) uwidacznia się mała wartość wykorzystania silnika elektrycznego (2,9 kWh) oraz znaczna wartość energii przeznaczony do ładowania

akumulatora (3,0 kWh). Odzysk energii hamowania wynosił około 1,2 kWh. Zużyta energia przez silnik spalinowy to około 20 kWh, co przy zsumowaniu poprzednio opisanych danych pozwoliło na uzyskanie całkowitego zużycia energii na poziomie 18,7 kWh (rys. 5.10b).



**Rysunek 5.10.** Przepływ energii dla pojazdu z napędem hybrydowym o początkowej energii zgromadzonej w akumulatorze SOC = 0% (a) oraz sumaryczne zapotrzebowanie energetyczne pojazdu (b)

Dla pojazdu z napędem hybrydowym plug-in o początkowym stopniu naładowania akumulatora wynoszącym SOC = 60% (rys. 5.11a) wyraźnie zaznaczony jest okres wykorzystania tylko silnika elektrycznego (pierwsze 15 km testu), w którym to czasie układ zużywał około 20 kWh/100 km. Taka konfiguracja początkowa SOC, skutkowała zużyciem energii przez silnik spalinowy o wartości 15,5 kWh oraz zużyciu energii przez silnik elektryczny równej 5,5 kWh. Przy odzysku energii równej 2,2 kWh, całkowita energochłonność podczas testu wyniosła 19,2 kWh (rys. 5.11b). Dla ostatniego przypadku w którym początkowy stan naładowania akumulatora wynosił SOC = 100% wyraźnie odznacza się dystans (około 50 km) korzystania tylko z silnika elektrycznego pojazdu (rys. 5.11c), a którego energochłonność wynosiła 18 kWh/100 km.

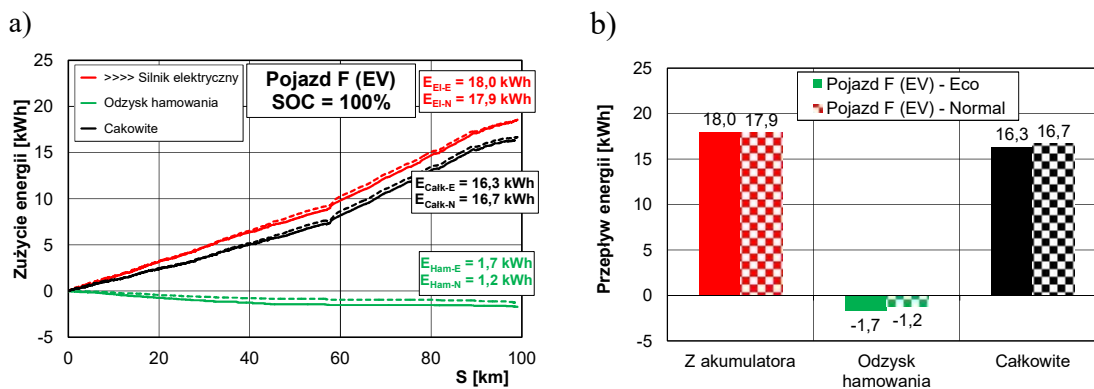


**Rysunek 5.11.** Przeptyw energii dla pojazdu z napędem hybrydowym o początkowej energii zgromadzonej w akumulatorze SOC = 60% (a) i 100% (c) oraz sumaryczne zapotrzebowanie energetyczne (b, d)

Dla pojazdu z napędem hybrydowym plug-in z początkowym całkowitym naładowanym akumulatorem zużycie energii przez silnik spalinowy w całym teście RDE wyniosło 10,5 kWh, a zużycie energii elektrycznej wyniosło 10,2 kWh. Dzięki odzyskowi energii ładowania (1,5 kWh) i hamowania (0,9 kWh) całkowite zużycie energii wyniosło 18,2 kWh (rys. 5.11d).

Zapotrzebowanie energetyczne pojazdu z napędem hybrydowym plug-in zmienia się wraz ze zmianą początkowego stopnia naładowania akumulatora, wpływając na wielkość wewnętrznego bilansu energetycznego obiektu. Bilans zewnętrzny (całkowite zużycie energii) pozostaje na stałym poziomie, który dla badanego pojazdu wynosił 18–19 kWh, przy zmienności zużycia energii przez silnik spalinowy w zakresie od 10,5 kWh (SOC = 100%) do 20 kWh (SOC = 0%).

Trzecim pojazdem wykorzystywanym w badaniach był pojazd elektryczny, dla którego również wykonano bilans energetyczny w dwóch trybach jego jazdy. Różnica między trybami jazdy Eco i Normal dla pojazdu elektrycznego była zauważalna głównie przy hamowaniu regeneracyjnym, gdyż w trybie Eco odzyskano energię równą 1,7 kWh, a w trybie Normal około 1,2 kWh. Pomimo różnych trybów jazdy (Eco, Normal) bilans przepływu energii pozostawał na podobnym poziomie (rys. 5.12a), jednakże mniejszym niż dla pojazdu konwencjonalnego (z benzynowym silnikiem spalinowym) oraz hybrydowego typu plug-in. Zużycie energii pojazdu elektrycznego (wartości średnie) w całym teście RDE wyniosło około 18 kWh, co przy odzysku energii wynoszącym około 1,5 kWh dawało wynik średni 16,5 kWh (rys. 5.12b).

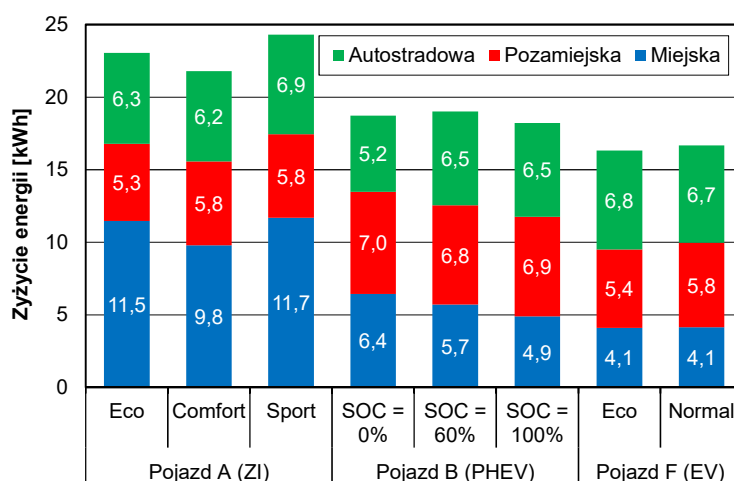


**Rysunek 5.12.** Przepływ energii pojazdu elektrycznego (a) oraz sumaryczne zapotrzebowanie energetyczne pojazdu w różnych trybach jazdy w teście drogowym (b)

Współczesne samochody hybrydowe typu plug-in wskutek znacznego postępu, zarówno technicznego, jak i eksploatacyjnego, związanego m.in. z systemami ładowania akumulatorów, stanowią konkurencję dla pojazdów napędzanych silnikami spalinowymi. Za najbardziej obiecujące rozwiązanie jednak należy obecnie traktować pojazdy z napędami w jak największym stopniu elektrycznymi. Ważnym problemem, związanym

z eksploatacją współczesnych pojazdów (o różnych napędach) jest ocena zużycia energii i sprawności w warunkach rzeczywistego użytkowania pojazdów. W etapie 1 podjęto analizę emisji spalin i zużycia energii w pojazdach. Na wartości końcowe wpływ ma energochłonność w poszczególnych częściach testu RDE (rys. 5.13), której wartości wynoszą odpowiednio (podano wartości średnie dla poszczególnych faz testu RDE):

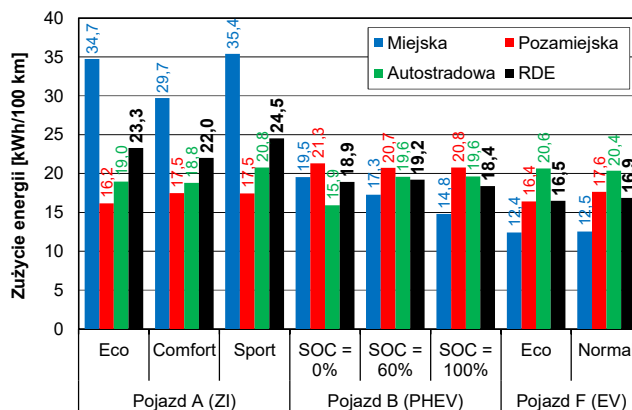
- dla pojazdu z silnikiem spalinowym: 11 kWh (M), 5,6 kWh (P), 6,5 kWh (A),
- dla pojazdu z napędem hybrydowym: 5,7 kWh (M), 6,9 kWh (P), 6,0 kWh (A),
- dla pojazdu elektrycznego: 4,1 kWh (M), 5,6 kWh (P), 6,7 kWh (A).



**Rysunek 5.13.** Zużycie energii w poszczególnych częściach testu RDE dla różnych pojazdów

Wartości te odniesione do dystansu 100 km wynoszą odpowiednio (rys. 5.14):

- dla pojazdu z silnikiem spalinowym: 33 kWh/100 km (M), 17 kWh/100 km (P) oraz 19,5 kWh/100 km (A),
- dla pojazdu z napędem hybrydowym: 17 kWh/100 km (M), 21 kWh/100 km (P) oraz 18 kWh/100 km (A),
- dla pojazdu elektrycznego: 12,5 kWh/100 km (M), 17 kWh/100 km (P) oraz 20,5 kWh/100 km (A).



**Rysunek 5.14.** Zapotrzebowanie energetyczne dla badanych pojazdów na 100 km

Największa sumaryczna energochłonność w teście RDE (na tej samej trasie badawczej) występuje dla pojazdu z benzynowym silnikiem spalinowym (23 kWh) mniejsza o około 20% dla pojazdu z napędem hybrydowym typu plug-in (18,7 kWh), a najmniejsza dla pojazdu elektrycznego (16,5 kWh). Dla pojazdu elektrycznego jest to mniejsza energochłonność o około 30% od pojazdu spalinowego i o około 10% od pojazdu z napędem hybrydowym typu plug-in. Porównując wyniki, można zauważyć, że pojazdy z napędem hybrydowym typu plug-in zużywały mniej energii niż pojazdy z tradycyjnymi silnikami spalinowymi, ale więcej niż pojazdy w pełni elektryczne.

Podsumowując, wyniki analizy pokazują że pojazdy w pełni elektryczne są obecnie najbardziej energooszczędne w warunkach testu RDE, zużywając mniej energii niż pojazdy z silnikami spalinowymi i hybrydowe typu plug-in. Wynika to z rosnącej efektywności i zaawansowanych systemów ładowania akumulatorów w tych pojazdach. Jednak ich technologie są ciągle rozwijane i wymagają wprowadzenia tańszych rozwiązań w konstrukcji układów napędowych. Ponadto do pełnego ich wdrożenia na rynku niezbędne jest przygotowanie infrastruktury (stacje ładowania), co wymaga znacznych nakładów finansowych i znaczących prac organizacyjnych. W związku z tym obecnie najbardziej perspektywiczne są rozwiązania hybrydowe, co potwierdza wzrost ich udziału w rynku opisany w genezie rozprawy. Z tego powodu konieczne jest prowadzenie dalszych prac badawczych w zakresie sposobu oceny ekologiczności tej grupy pojazdów i wprowadzania ich kategoryzacji, co zostało szczegółowo przedstawione w kolejnym rozdziale.

## **5.2. Kategoryzacja pojazdów pod względem ekologicznym w drogowych testach emisyjnych**

### **5.2.1. Weryfikacja poprawności wykonania testów drogowych**

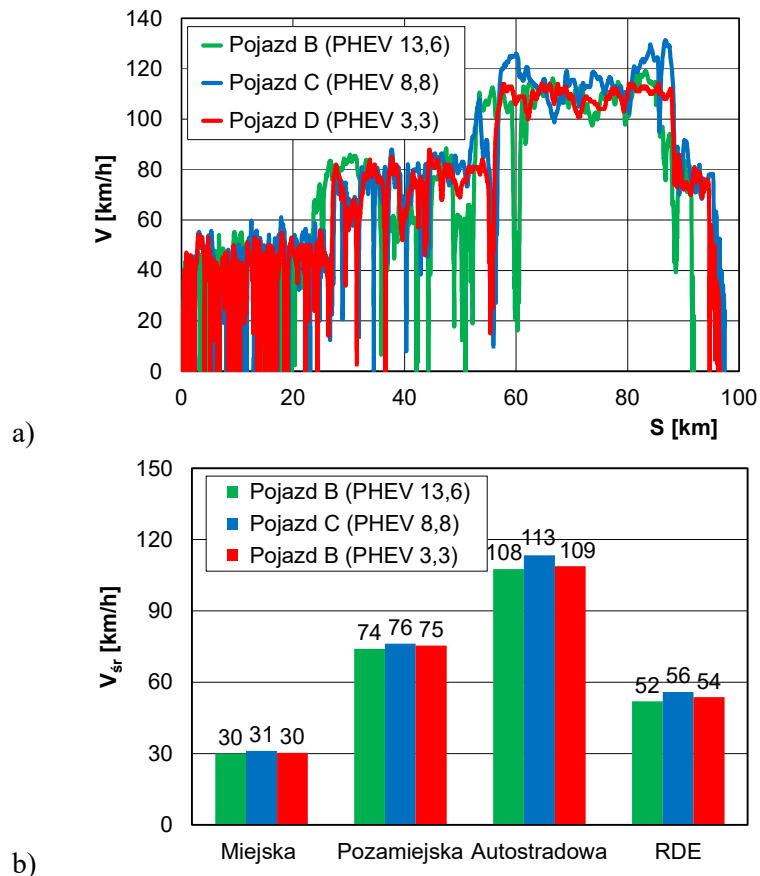
W celu dokładnego porównania emisji szkodliwych związków spalin, niezbędne jest uwzględnienie różnic w charakterze przeprowadzonych przejazdów. Testy badawcze poddano rygorystycznej weryfikacji pod względem zgodności z procedurą RDE (Real Driving Emissions), która nakłada wymóg przeprowadzenia trzech różnych faz jazdy: miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej. Pomimo pełnej zgodności z wymogami formalnymi, podjęto analizę kluczowych parametrów, które mogą wpłynąć na zmienność emisji szkodliwych substancji przez badane pojazdy. Aby porównać emisję związków szkodliwych spalin należało w pierwszej kolejności porównać charakter wykonanych przejazdów.

Przeprowadzone testy badawcze zweryfikowano pod względem zgodności w wymaganiach procedury RDE. W pierwszym etapie dokonano formalnego sprawdzenia przejazdów, a szczegółowe dane zamieszczono w tabelicy 5.2. Pomimo spełnienia wszystkich wymogów wykonanych testów, dokonano porównania najważniejszych parametrów, które mogą mieć wpływ na zróżnicowanie emisji spalin badanych obiektów. Przebieg trasy wyraźnie wskazuje na trzy części testu (rys. 5.15a). Wyróżnić można część miejską, trwającą około 20–25 km, część pozamiejską – dystans od 25 km do 50 km oraz część autostradową (60–90 km). Wszystkie trzy części charakteryzowały się znacznym podobieństwem pod względem prędkości średniej (rys. 5.15b), gdzie rozrzut średniej prędkości dla części miejskiej nie przekraczał 1 km/h, dla części pozamiejskiej – 2 km/h, a dla części autostradowej był największy i nie przekraczał 5 km/h. Wartość średnia prędkości w całym teście RDE była zbliżona do siebie w każdym przejeździe i wynosiła 52 km/h, 56 km/h oraz 54 km/h odpowiednio dla pojazdów z napędem hybrydowym PHEV o oznaczeniu B, C i D (opisanych w rozdziale 4), a różniących się pojemnością elektryczną akumulatora.

**Tablica 5.2.** Dane charakterystyczne wykonanych testów oraz porównanie z wartościami dopuszczalnymi (w nawiasach podano pojemność elektryczną akumulatora pojazdu z napędem hybrydowym)

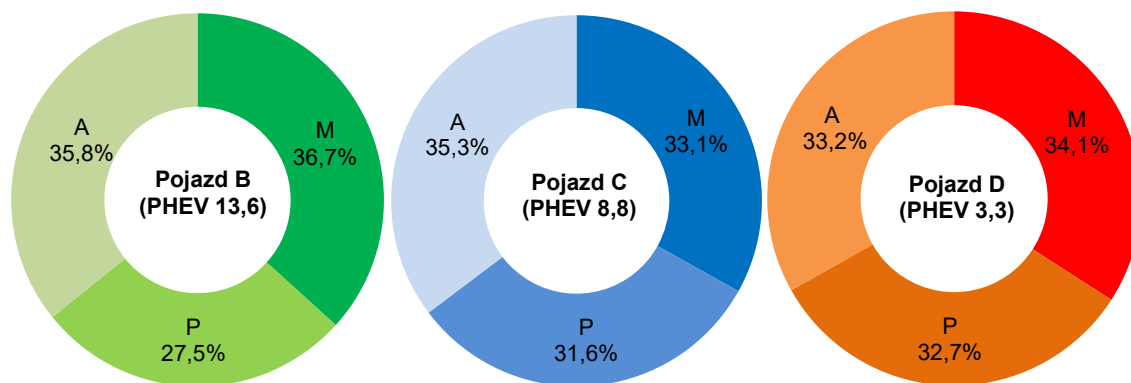
Parametr testu	Jednostka	Wymaganie	Pojazd B (PHEV)	Pojazd C (PHEV)	Pojazd D (PHEV)
Dystans	km	–	91,90	97,40	96,45
Czas trwania	min	90–120	106,17	104,52	107,83
czas trwania fazy zimnej	min	5,00	5,00	5,00	5,00
Dystans fazy miejskiej	km	> 16	33,73	32,22	32,88
Dystans fazy pozamiejskiej	km	> 16	25,25	30,79	31,58
Dystans fazy autostradowej	km	> 16	32,92	34,39	31,98
Udział fazy miejskiej	%	29–44	36,70	33,08	34,10
Udział fazy pozamiejskiej	%	23–43	27,48	31,61	32,74
Udział fazy autostradowej	%	23–43	35,82	35,31	33,16
Średnia prędkość w fazie miejskiej	km/h	15–40	30,05	31,14	30,33
Średnia prędkość w fazie pozamiejskiej	km/h	–	74,09	76,23	75,34
Średnia prędkość w fazie autostradowej	km/h	–	107,55	113,37	108,83
Średnia prędkość w całym teście RDE	km/h	–	51,94	55,91	53,66
Prędkość większa niż 145 km/h w fazie autostradowej	%	< 3%	0,00	0,00	0,00
Prędkość większa niż 100 km/h w fazie autostradowej	min	$\geq 5$	16,28	16,63	17,32
Udział postoju (faza miejska)	%	6–30	20,09	17,91	15,12
Czas biegu jałowego	s	$\leq 15$	0,00	0,00	0,00
Średnia prędkość podczas fazy zimnego rozruchu	km/h	15–40	23,70	23,68	21,33
Maksymalna prędkość podczas fazy zimnego rozruchu	km/h	< 60	44,25	45,86	47,00
Zatrzymanie pojazdu podczas fazy zimnego rozruchu	s	$\leq 90$	0,00	31,00	18,00





**Rysunek 5.15.** Przebieg prędkości dla wykonywanych testów pojazdów typu plug-in o różnej pojemności energetycznej akumulatorów (a) oraz wartości średnie prędkości w każdej fazie testu i w całym teście RDE (b)

W drugim etapie porównano udziały poszczególnych faz testu RDE. Uzyskane wyniki udziałów dla części miejskiej to 36,7%, 33,1% i 34,1%, odpowiednio dla pojazdu B, C i D (rys. 5.16). Oznacza to że zmienność danych określaną wskaźnikiem CoV wynosi 1,5%. Jest to wartość mała i oznacza istotne podobieństwo uzyskanych wyników. Dla pozamiejskiej części testu uzyskane wyniki wynoszą odpowiednio 27,5%, 31,6% oraz 32,7%, co daje wynik  $CoV = 7,4\%$ . Jest to wartość kilkakrotnie większa od wyniku uzyskanego wcześniej, jednak ta część testu charakteryzuje się większą zmiennością prędkości jazdy oraz znacznie większym udziałem warunków, które są nieprzewidywalne. Dla części autostradowej uzyskano wartości równe 35,5%, 35,3% oraz 33,2%, co daje  $CoV$  na poziomie 3,3%. Takie porównanie jednoznacznie świadczy o dużym podobieństwie udziału faz w teście RDE, gdzie dopuszczalna jest duża zmienność tego parametru: w części miejskiej jest to 15%, natomiast dla części pozamiejskiej i autostradowej wartość ta jest większa i dopuszcza się rozrzut 20%. Należy zaznaczyć, że mimo dopuszczalnej dużej zmienności udziału faz, podczas wykonywania badań, starano się zachować zgodność przejazdów, aby wpływ na wyniki emisji spalin miały tylko parametry ruchu, które nie są zależne od sposobu wykonywania testu.

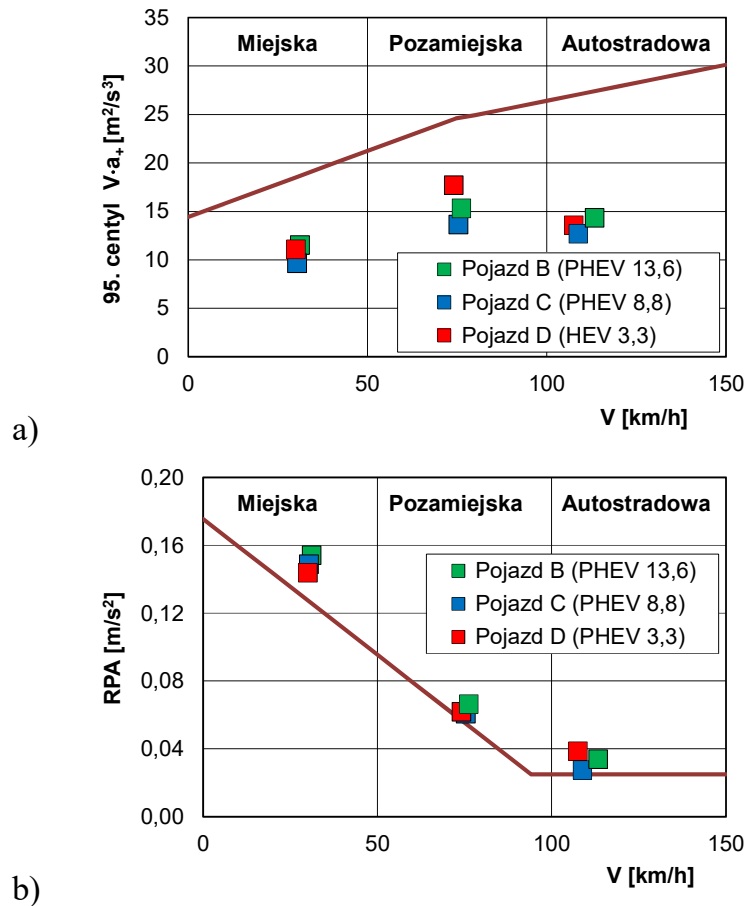


**Rysunek 5.16.** Porównanie udziałów poszczególnych części testu RDE dla pojazdów hybrydowych o różnej pojemności elektrycznej akumulatora

Trzecim, ostatnim, etapem porównania było wyznaczenie parametrów charakteryzujących dynamiczne warunki jazdy pojazdów. Pierwszym parametrem był 95-procentowy centyl iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego (rys. 5.17a), który w każdej fazie testu powinien być mniejszy niż określone maksimum. Wymóg ten określa, aby przejazd nie był zbyt dynamiczny oraz przyspieszenia pojazdu nie powodowały zbyt nagłego zwiększenia dynamiki pojazdu skutkujące znaczącym zwiększeniem emisji spalin. Obserwowane na rysunku 5.17a wartości tego parametru dla części miejskiej należą do zakresu  $9\text{--}12\text{ m}^2/\text{s}^3$  i są podobne dla każdego przejazdu. Dla części pozamiejskiej uzyskiwane wartości tego parametru charakteryzują się większym rozrzutem między przejazdami i wynoszą od  $14\text{ m}^2/\text{s}^3$  do  $18\text{ m}^2/\text{s}^3$ . Dla części autostradowej wartości te są najbardziej zbliżone do siebie i wynoszą około  $14\text{ m}^2/\text{s}^3$ . Należy zauważyć, że w każdej części testu nie jest przekroczona wartość dopuszczalna, wyznaczona linią ciągłą; sugeruje to poprawność wykonania testu pod względem maksymalnej dynamiki jazdy, a jednocześnie znaczącym podobieństwem, co będzie stanowiło podstawę do porównania emisji spalin z badanymi pojazdami.

Drugim parametrem określającym warunki dynamiczne przejazdu było względne przyspieszenie dodatnie (rys. 5.17b). Parametr ten określa minimalne warunki dynamiczne, aby przejazd nie był zbyt statyczny i aby wyeliminować jazdę z wykorzystaniem systemów utrzymujących stałą prędkość pojazdu. Parametr ten jest określony na takim poziomie, że wykonywane testy charakteryzują się tylko nieznacznie większą wartością tego parametru niż wartości minimalne. Dla części miejskiej testu dla wszystkich badanych pojazdów względne przyspieszenie dodatnie było z zakresu od  $0,14\text{ m/s}^2$  do  $0,16\text{ m/s}^2$  i było o około 10% większe od minimum ( $0,13\text{ m/s}^2$ ) określonego dla uzyskanej średniej prędkości w tej fazie (około 30 km/h). W części pozamiejskiej testu wartości te były jeszcze bardziej zbliżone do siebie i wynosiły około  $0,6\text{--}0,7\text{ m/s}^2$ , były większe od minimum o około 5% (dla średniej prędkości wynoszącej 75 km/h). W części autostradowej względne przyspieszenie dodatnie było najmniejsze i wynosiło (0,3

$\pm 0,04$ )  $m/s^2$  i osiągnęło wynik nieznacznie większy od minimum określonego na poziomie  $0,25 m/s^2$ .

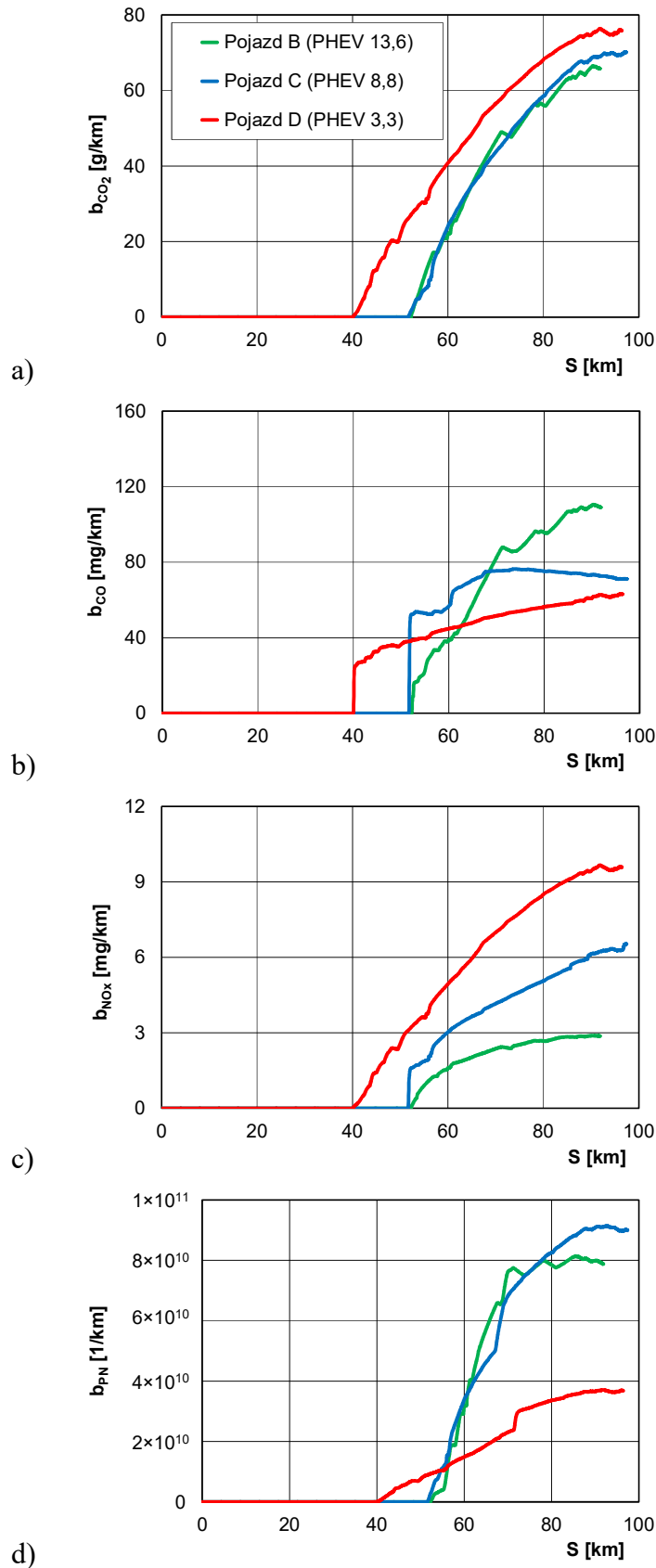


**Rysunek 5.17.** Porównanie 95-procentowego centyla iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego (a) oraz względnego przyspieszenia dodatniego (b) w każdej fazie testu badanych pojazdów typu plug-in

Przedstawiona charakterystyka testów badawczych oraz statyczne i dynamiczne właściwości przejazdów dowodzą, że wymogi formalne (przedstawione skrótowo) dla każdego przejazdu oraz każdej części testu zostały spełnione. Taka sytuacja implikuje możliwość przejścia do kolejnej fazy badań, polegającej na wyznaczeniu wartości emisji spalin. Zbliżone warunki wykonywania testu oraz uzyskane podobne wartości parametrów dynamicznych dla wszystkich badanych pojazdów stanowią podstawę do stwierdzenia, że wyniki emisji spalin nie będą obarczone niedokładnością wynikającą z rozbieżności wykonania testów, a jednocześnie podobieństwo przejazdów będzie wskazywało na różnice wynikające jedynie z cech charakterystycznych pojazdów (m.in. zastosowanego silnika spalinowego i pojemności energetycznej akumulatora).

### 5.2.2. Wyniki emisji drogowej pojazdów hybrydowych

W związku z brakiem uruchamiania silnika podczas początkowej fazy testu RDE, charakterystycznym aspektem emisji drogowej spalin każdego związku szkodliwego jest płaski początkowy okres takiej zależności. Wynika to z faktu, że początkowa część testu RDE odbywa się wyłącznie z wykorzystaniem silnika elektrycznego, a zimna faza testu jest „przeniesiona” z fazy miejskiej na fazę pozamiejską (rys. 5.18a). Akumulatory zostały naładowane do pełna przed wykonaniem testów. Szczególnie widoczne jest to, gdy rozpatruje się emisję drogową dwutlenku węgla (przedstawioną narastająco), z której wynika, że pojazd o najmniejszej pojemności elektrycznej akumulatora przejechał na silniku elektrycznym około 40 km. Pozostałe pojazdy wykorzystywały silnik elektryczny do napędu pojazdu przez ponad 50 km. Zaletą tego jest znaczące skrócenie okresu nagrzewania silnika, gdyż w fazie pozamiejskiej wykorzystywane jest większe obciążenie i większa prędkość obrotowa silnika, co skutkuje znacznie szybszym nagrzewaniem się reaktora katalitycznego i skróceniem okresu, w którym następuje praca w warunkach zimnego rozruchu. Wadą jest jednak fakt, że zimny okres pracy silnika obciążony dużym obciążeniem i dużą prędkością obrotową silnika powoduje znaczącą emisję drogową poszczególnych związków toksycznych. Jest to szczególnie widoczne rozpatrując emisję drogową tlenku węgla (rys. 5.18b), gdzie uruchomienie zimnego silnika dla pojazdu A powodowało, w bardzo krótkim czasie, emisję prawie 50% całkowitej masy tego związku (około 30 mg/km dla dystansu około 50 km, a dla całego testu była to wartość około 60 mg/km – przy około 100 km). Osobnego komentarza wymaga charakter zmian emisji drogowej tlenku węgla dla pojazdu C (PHEV 8,8), w którym emisja drogowa maleje w miarę wykonywania testu (od 70 km). Spowodowane jest to mniejszym przyrostem masy tlenku węgla w porównaniu do przyrostu pokonywanej przez drugi przez pojazd. W dwóch pozostałych obiektach zwiększenie masy tlenku węgla było większe niż przyrost pokonywanego dystansu. Dla każdego pojazdu poddanego badaniu, emisja drogowa tlenku węgla była mniejsza niż dopuszczalny limit tej emisji, określony jako 1000 mg/km (Euro 6d-temp). Dla poszczególnych pojazdów uzyskane wartości emisji drogowej, określone jako całkowita masa wyemitowanego związku do całkowitej przebytej drogi wynosiły 63 mg/km, 74 mg/km i 109 mg/km, odpowiednio dla pojazdu D, pojazdu C i pojazdu B. Charakter zmian emisji drogowej tlenków azotu (rys. 5.18c) był w dużej mierze zależny od objętości skokowej silnika oraz od masy pojazdu.

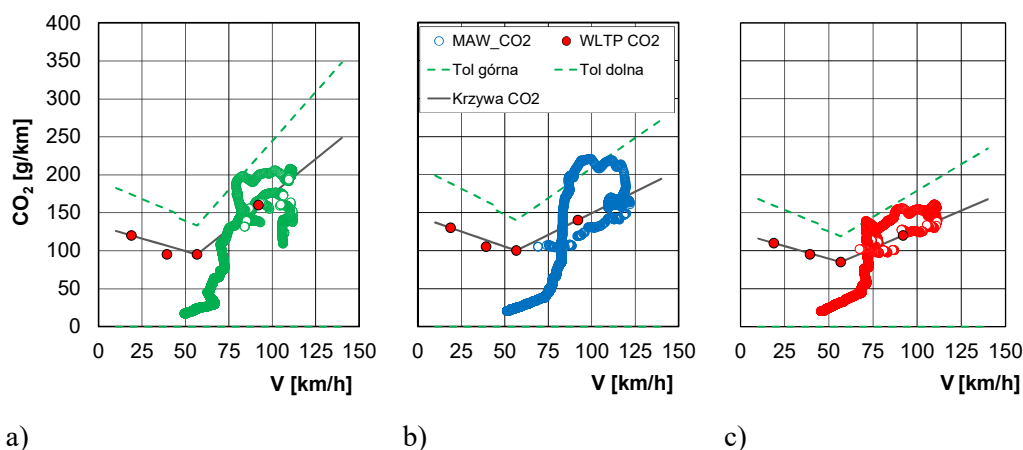


**Rysunek 5.18.** Zależność emisji drogowej dwutlenku węgla (a), tlenku węgla (b), tlenków azotu (c), liczby cząstek stałych (d) od dystansu przebytego podczas badań drogowych dla w poszczególnych pojazdów; wykresy wyznaczone z wykorzystaniem wyników natężenia emisji uzyskanych w każdej sekundzie testu

Końcowa wartość emisji drogowej tlenków azotu uzyskana z wykorzystaniem wszystkich danych dotyczących natężenia emisji w całym teście RDE wyniosła 9,5 mg/km, co jest o około 50% większą wartością w stosunku do pojazdu C (6,4 mg/km) oraz ponad 3 razy większą wartością od wyniku uzyskanego dla pojazdu B (około 3 mg/km). W ostatnim opisanym obiekcie – pojazd B charakteryzował się silnikiem o najmniejszej objętości skokowej, a jednocześnie był to jedyny silnik doładowany. Należy przy tym mieć na uwadze zakłócające działanie reaktora katalitycznego, który znacząco redukuje stężenie tlenków azotu w układzie wylotowym, co szczególnie jest widoczne w silnikach doładowanych o najnowszych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Uzyskane wartości emisji drogowej tlenków azotu nie przekraczają limitów emisji spalin określonej w normie Euro 6d-temp, który wynosi 60 mg/km.

Odmienne przebiegi od poprzedniego otrzymano dla liczby cząstek stałych (rys. 5.18d). Najmniejszy przyrost zanotowano dla pojazdu D, dla którego stwierdzono największą emisję drogową tlenków azotu, co potwierdza odwrotnie proporcjonalną zależność między tymi składnikami spalin. Porównując uzyskane wyniki dla wszystkich badanych pojazdów należy stwierdzić, że liczba cząstek stałych jest mniejsza od określonego limitu, który dla silników o bezpośrednim wtrysku paliwa wynosi  $6 \cdot 10^{11}$  1/km.

Wyznaczenie całkowitej emisji spalin w testach drogowych wymaga zastosowania algorytmu uśredniania emisji spalin w oknach pomiarowych, które wyznacza się na podstawie emisji dwutlenku węgla w poszczególnych fazach testu WLTC (czerwone punkty na rysunku 5.19).



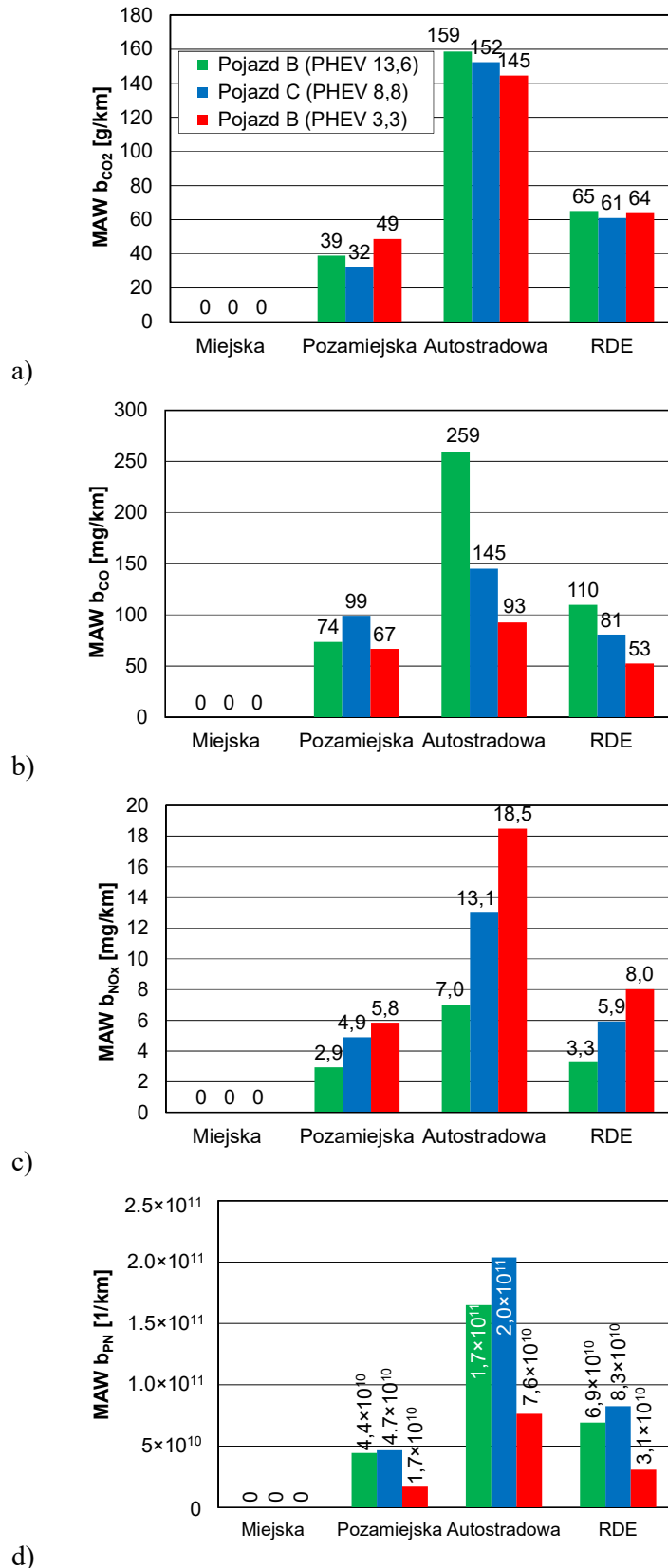
**Rysunek 5.19.** Krzywe charakterystyczne określające zależność emisji dwutlenku węgla w oknach pomiarowych, będące podstawą do wyznaczenia emisji drogowej poszczególnych związków szkodliwych w teście RDE dla: a) pojazdu B (PHEV 13,6), c) pojazdu C (PHEV 8,8), c) pojazdu D (PHEV 3,3)

Wartość emisji drogowej dwutlenku węgla w teście RDE, określona indywidualnie dla każdego pojazdu, w większości przypadków mieści się między dolną ( $Tol_{dolna} = 0$ ), a górną granicą tolerancji ( $Tol_{górna} = +45\%$ ). We wszystkich badaniach pojazdów typu

plug-in widoczne jest podobieństwo rozkładu średniej emisji dwutlenku węgla w oknach pomiarowych: dla prędkości z zakresu do 75 km/h obserwowane wartości nie przekraczają 100 g/km. Natomiast w przedziale prędkości od 75 km/h do 125 km/h wartości emisji drogowej dwutlenku węgla wynoszą od 100 g/km do 200 g/km – dla pojazdu B (rys. 5.19a), dla pojazdu C – do 220 g/km (rys. 5.19b), a dla pojazdu D – do 150 g/km (rys. 5.19c). Wartości końcowe emisji drogowej w teście RDE to średnia wartość z odpowiednich przedziałów prędkości pojazdu dla części miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej, a suma emisji w fazie miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej z wagami odpowiednio 0,34, 0,33 i 0,33 pozwala wyznaczyć emisję odpowiedniego składnika w teście RDE.

Rozpatrując emisję spalin dwutlenku węgla w poszczególnych fazach testu RDE widoczna jest zerowa emisja tego składnika w fazie miejskiej dla wszystkich badanych pojazdów typu plug-in (rys. 5.20a). Różnice są widoczne dopiero w kolejnych fazach testu: w fazie pozamiejskiej największa emisja występuje dla pojazdu o najmniejszej pojemności elektrycznej akumulatora (49 g/km), najmniejsza – dla pojazdu B o średniej pojemności elektrycznej akumulatora (32 g/km). Największe wartości emisji dwutlenku węgla zanotowano w fazie autostradowej – 3–4-krotnie większe niż w fazie pozamiejskiej. Największa wartość emisji drogowej dwutlenku węgla (159 g/km) odnosi się do pojazdu o najmniejszej objętości skokowej silnika, co sugeruje największe obciążenie tej jednostki napędowej. Jednocześnie jest to potwierdzenie, że jednostki po downsizingu w pojazdach o dość znacznej masie własnej nie przynoszą spodziewanych rezultatów ekologicznych. Wynik końcowy emisji drogowej dwutlenku węgla dla w pojazdów  $63 \pm 2$  g/km, co oznacza że wszystkie wartości nie odbiegały od siebie o więcej niż 3,2%. Jest to bardzo zbliżony wynik, potwierdzony przebiegowym zużyciem paliwa, które wynosiło 2,6; 2,8 i 3,0 dm<sup>3</sup>/100 km, odpowiednio dla pojazdu B, C i D. Jest to spowodowane tym, że tryb elektryczny był wykorzystywany w każdej fazie takiego testu przez każdy pojazd, i wynosił on 60%, 53% i 48%, odpowiednio dla pojazdu B, C i D.

Znacznie większe różnice w poszczególnych fazach testu odnotowano przy wyznaczeniu emisji drogowej tlenku węgla (rys. 5.20b). Tak jak poprzednio faza miejska charakteryzowała się zerową emisją tego składnika spalin, a w fazie pozamiejskiej różnice były znaczne i wynosiły do 33% (dla pojazdu C emisja wynosiła 99 mg/km, a dla pojazdu D – 67 mg/km). Pojazd B charakteryzował się wartością pośrednią wynoszącą 74 mg/km. Jeszcze większe zróżnicowanie odnotowano w fazie autostradowej, gdzie – podobnie jak dla dwutlenku węgla – największe wartości (259 mg/km) odnotowano dla pojazdu B (downsizing), a najmniejsze (93 mg/km) dla pojazdu D (o największej objętości skokowej). Miało to przełożenie na uzyskane wartości końcowe, które dla pojazdu B (110 mg/km) były dwukrotnie większe niż dla pojazdu D (53 mg/km). Należy jednak zauważyć, że są o wartości 10–20-krotnie mniejsze niż dopuszczalne, określone w normie Euro 6d-temp, gdzie limit wynosi 1000 mg/km.



**Rysunek 5.20.** Wartości emisji drogowej dwutlenku węgla (a), tlenku węgla (b), tlenków azotu (c), liczby cząstek stałych (d) dla każdej fazy testu i w całym teście RDE dla poszczególnych pojazdów hybrydowych typu plug-in; wartości wyznaczone z wykorzystaniem algorytmu uwzględniającego uśrednianie w oknach pomiarowych



Emisja drogowa tlenków azotu miała charakter zależny od objętości skokowej silnika – im większa objętość silnika tym większa emisja drogowa w poszczególnych fazach testu RDE (rys. 5.20c). Emisja drogowa tlenków azotu w fazie pozamiejskiej dla wszystkich badanych pojazdów o niewielkich wartościach była spowodowana zimnym rozruchem silnika w tej fazie. Zanotowane wartości emisji drogowej w fazie pozamiejskiej to 2,9 g/km, 4,9 mg/km i 5,8 mg/km odpowiednio dla pojazdu B, C i D. Pojazd D wyemitował 2-krotnie większą masę tlenków azotu niż pojazd B (zakładając ten sam dystans fazy pozamiejskiej). Wartości tego parametru w fazie autostradowej były jeszcze bardziej różnorodne: pojazd D charakteryzował się 2,5-krotnie większą emisją tlenków azotu niż pojazd B, co mogło być spowodowane przede wszystkim przebiegiem tego pojazdu oraz faktem mniejszej skuteczności redukcji reaktora katalitycznego. Skutkiem tego jest wynik końcowy emisji drogowej tlenków azotu, która dla pojazdu B wynosiła 3,3 mg/km, a dla pojazdu D była ponad 2-krotnie większa (8 mg/km). Są to jednak wartości ponad 10-krotnie mniejsze niż określone w normie dotyczącej testów RDE:  $60 \text{ mg/km (b}_{\text{NO}_x} \text{ Euro 6d-temp)} \times 1.43 \text{ (CF}_{\text{NO}_x}) = 86 \text{ mg/km}$ . Emisja drogowa liczby cząstek stałych miała charakter odwrotny w stosunku do tlenków azotu. Największe wartości w każdej fazie testu i w całym teście odnotowano dla pojazdu C (rys. 5.20d). Były to wartości o około 10–20% większe niż dla pojazdu B, który charakteryzował się wartościami  $4,4 \cdot 10^{10}$ ,  $1,7 \cdot 10^{11}$  oraz  $6,9 \cdot 10^{10}$  1/km, odpowiednio w fazie miejskiej, pozamiejskiej, autostradowej i całym teście RDE. Najmniejszą emisją drogową liczby cząstek stałych charakteryzował się pojazd D, dla którego wartość ta w całym teście RDE wynosiła  $3,1 \cdot 10^{10}$  1/km. Wszystkie uzyskane wartości były kilkanaście razy mniejsze niż dopuszczalny limit emisji tego związku w teście RDE wynoszący 1,5-krotność limitu Euro 6d-temp ( $6 \cdot 10^{10}$  1/km  $\times$  1,5 =  $9 \cdot 10^{11}$  1/km).

Przedstawiona powyżej procedura dotycząca wyznaczania emisji związków szkodliwych spalin w testach drogowych posłużyła do oceny ekologicznej trzech różnych pojazdów hybrydowych typu plug-in. Na jej podstawie uzyskano wartości emisji, które mieszczą się w dopuszczalnych limitach emisji, czyli uzyskano informację ilościową. Natomiast nie uzyskano informacji o jakości takiego wyniku, tzn. nie określono tego wyniku na tle możliwości jakie oferuje dany konkretny model pojazdu z napędem hybrydowym plug-in. Otrzymane wyniki nie zawierają informacji o zakresie zmienności oraz o położeniu uzyskanego wyniku na tle wartości minimalnej i maksymalnej do uzyskania przez każdy badany pojazd. Powyższa sugestia będzie rozważana w kolejnym punkcie niniejszej rozprawy.

Emisja spalin była uzależniona od warunków testu drogowego, z zerową emisją CO<sub>2</sub> w fazie miejskiej, a zauważalną emisją tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) w fazie pozamiejskiej i autostradowej. Wartości emisji i zużycia energii mieściły się w normach ekologicznych dla wszystkich badanych pojazdów, jednak różnice w emisji NO<sub>x</sub> sugerują wpływ parametrów technicznych na wyniki emisji. Pojazd D, o największej objętości skokowej

silnika, okazał się najbardziej ekologiczny, osiągając najniższą emisję NO<sub>x</sub> w badaniach, co czyni go atrakcyjnym wyborem z uwagi na jego pozytywny wpływ na środowisko i efektywność energetyczną. Emisja spalin w początkowej fazie testu była związana z pracą silnika elektrycznego, co miało wpływ na wyniki emisji w fazie pozamiejskiej. Wartości uzyskane w badaniach dostarczają istotnych informacji przy wyborze pojazdu, biorąc pod uwagę jego wpływ na środowisko i efektywność energetyczną.

### 5.2.3. Wyznaczenie minimalnej wartości emisji drogowej spalin

Uzyskane wartości emisji drogowej związków szkodliwych spalin poszczególnych pojazdów posłużyły jako parametry wejściowe do wyznaczenia granic, w których takie wartości są możliwe do uzyskania w teście. Wyznaczenie wartości maksymalnej nie budzi żadnych wątpliwości, gdyż za wartość graniczną należy przyjąć wartość:

$$b_{j,max} = b_{j,Euro6d-Temp} \times CF_j \quad (5.7)$$

gdzie  $b_{j,Euro6d-Temp}$  oznacza dopuszczalną wartość emisji drogowej dla j-tego składnika spalin ( $b_{CO,Euro6d-Temp} = 1000$  mg/km;  $b_{NO_x,Euro6d-Temp} = 60$  mg/km;  $b_{PN,Euro6d-Temp} = 6 \cdot 10^{11}$  1/km;  $CF_j$  – wskaźnik emisji dla j-tego składnika spalin:  $CF_{CO} = 2,1$ ;  $CF_{NO_x} = 1,43$ ;  $CF_{PN} = 1,5$ ).

Wartości minimalne, teoretycznie możliwe do osiągnięcia przez badane pojazdy zostały wyznaczone, przy założeniu stałego i zmiennego natężenia emisji spalin. Stałe natężenie emisji spalin należałoby przyjąć wtedy, gdy brak jest zmian natężenia emisji spalin w poszczególnych fazach testu RDE. Oznacza to, że od wartości średniej występuje znacząco małe odchylenie standardowe, określone współczynnikiem CoV < 10%. Dokładne wartości wskaźnika CoV dla natężenia emisji wszystkich składników spalin badanych pojazdów zaprezentowano w tabelicy 5.3.

**Tablica 5.3.** Wartości współczynnika CoV dla wszystkich badanych składników spalin

Składnik spalin	Pojazd B (PHEV)		Pojazd C (PHEV)		Pojazd D (PHEV)	
	Faza pozamiejaska	Faza autostradowa	Faza pozamiejaska	Faza autostradowa	Faza pozamiejaska	Faza autostradowa
CoV <sub>CO<sub>2</sub></sub> [%]	93,9	21,7	78,3	28,4	125,4	14,6
CoV <sub>CO</sub> [%]	86,0	33,5	77,5	61,0	552,0	17,5
CoV <sub>NO<sub>x</sub></sub> [%]	83,2	30,6	77,5	17,2	125,9	14,6
CoV <sub>PN</sub> [%]	128,2	61,8	77,2	35,5	131,7	104,3

Z danych zawartych w tabelicy 5.3 wynika, że wszystkie wartości CoV są większe od 10%, w związku z czym należy uzależnić natężenie emisji spalin (lub wartość emisji

drogowej) od znanego parametru, który z dużą dokładnością opisuje charakter zmian natężenia emisji lub emisję drogową.

W kolejnych podpunktach zaprezentowano wyznaczenie minimum emisji drogowej omawianych związków szkodliwych dla dwóch przypadków, w których przyjęto:

- 1) stałe natężenie emisji danego związku szkodliwego w odpowiedniej części testu RDE (niezależnie od przebytego dystansu),
- 2) zmienne natężenie emisji danego związku szkodliwego w odpowiedniej części testu RDE, które będzie uzależnione od przebytego dystansu.

### Stale natężenie emisji drogowej związków szkodliwych spalin

Do wyznaczenia teoretycznych wartości minimalnej emisji spalin wykorzystano metodykę opisaną w podrozdziale 4.5. Jako wielkości wejściowe wykorzystano wartości natężenia emisji danego związku  $E_{j,k}$ , wyznaczone z emisji drogowej  $b_{j,k}$ ;  $j = \text{CO}_2, \text{CO}, \text{NO}_x, \text{PN}$ , dla części pozamiejskiej i autostradowej. W części miejskiej wartości natężenia emisji spalin wynosiły 0. Wielkościami zmiennymi algorytmu były: czas testu części miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej ( $t_k$ ) oraz długość drogi w części miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej ( $S_k$ ). Ograniczeniami były następujące wielkości:

- suma czasu całego testu:  $t_M + t_P + t_A \in (90-120 \text{ min})$ ,
- średnia prędkość w części miejskiej  $S_M/t_M \in (15-40 \text{ km/h})$ ,
- średnia prędkość w części pozamiejskiej  $S_P/t_P \in (40-80 \text{ km/h})$ ,
- średnia prędkość w części autostradowej  $S_A/t_A \in (80-140 \text{ km/h})$ .

Wartościami początkowymi były:  $t_M = t_P = t_A = 30 \text{ min}$  oraz  $S_M = S_P = S_A = 16 \text{ km}$ .

Wartości natężenia emisji poszczególnych związków spalin (tab. 5.3) uzyskano na podstawie średniej emisji drogowej oraz czasu każdej fazy testu oraz przebytego w tej fazie dystansu. W związku z tym funkcja celu miała postać:

$$b_{j,\text{RDE}} = 0,34 b_{j,\text{M}} + 0,33 b_{j,\text{P}} + 0,33 b_{j,\text{A}} \quad (5.8)$$

a po uwzględnieniu stałego natężenia emisji  $E_{j,k}$  w każdej fazie testu:

$$b_{j,\text{RDE}} = 0,34 E_{j,\text{M}} t_M/S_M + 0,33 E_{j,\text{P}} t_P/S_P + 0,33 E_{j,\text{A}} t_A/S_A \quad (5.9)$$

**Tablica 5.3.** Wartości stałego natężenia emisji spalin dla faz testu RDE jako dane wejściowe do algorytmu

Składnik spalin	Pojazd B (PHEV)		Pojazd C (PHEV)		Pojazd D (PHEV)	
	Faza pozamiejaska	Faza autostradowa	Faza pozamiejaska	Faza autostradowa	Faza pozamiejaska	Faza autostradowa
$E_{CO_2}$ [g/s]	0,80	4,74	0,69	4,80	1,02	4,37
$E_{CO}$ [mg/s]	1,51	7,75	2,10	4,57	1,40	2,80
$E_{NO_x}$ [mg/s]	0,06	0,21	0,10	0,41	0,12	0,56
$E_{PN}$ [1/s]	$9,1 \cdot 10^8$	$4,9 \cdot 10^9$	$9,9 \cdot 10^8$	$6,4 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^8$	$2,3 \cdot 10^9$

Wykorzystując narzędzie Solver w pakiecie Excel MS Office™, wyznaczono dla każdego pojazdu wartości czasu każdej fazy testu ( $t_k$ ), długości każdej z faz testu ( $S_k$ ) oraz udziału każdej z faz testu RDE ( $u_k$ ). Szczegółowe dane zamieszczono w tablicach 5.4–5.6, odpowiednio dla pojazdów B–D.

**Tablica 5.4.** Wartości emisji drogowej spalin dla testu RDE (przy założeniu stałego natężenia emisji spalin) – dane wyjściowe otrzymane z algorytmu oraz wartości proponowane dla testu uogólnionego; pojazd B (PHEV 13,6)

Składnik spalin	Czas fazy (t)			Długość fazy (S)			Udział fazy (u)			Emisja drogowa
	M	P	A	M	P	A	M	P	A	
	[s]	[s]	[s]	[km]	[km]	[km]	[-]	[-]	[-]	
CO <sub>2</sub>	4157	640	603	19,1	16,0	24,3	0,321	0,270	0,409	49,4 g/km
CO	3999	717	684	18,6	17,9	27,5	0,290	0,280	0,430	83,4 mg/km
NO <sub>x</sub>	4106	640	654	18,9	16,0	26,3	0,309	0,261	0,430	2,51 mg/km
PN	3999	718	683	18,6	18,0	27,5	0,290	0,280	0,430	$5,2 \cdot 10^{10}$ 1/km
Średnia	4065	679	656	18,8	17,0	26,4	0,303	0,273	0,425	–
Odchylenie	68,8	38,8	33,0	0,21	0,97	1,33	0,01	0,01	0,01	–
CoV [%]	1,7%	5,7%	5,0%	1,1%	5,7%	5,0%	4,4%	2,9%	2,1%	–

**Tablica 5.5.** Wartości emisji drogowej spalin dla testu RDE (przy założeniu stałego natężenia emisji spalin) – dane wyjściowe otrzymane z algorytmu oraz wartości proponowane dla testu uogólnionego; pojazd C (PHEV 8,8)

Składnik spalin	Czas fazy (t)			Długość fazy (S)			Udział fazy (u)			Emisja drogowa
	M	P	A	M	P	A	M	P	A	
	[s]	[s]	[s]	[km]	[km]	[km]	[-]	[-]	[-]	
CO <sub>2</sub>	4096	878	427	16,0	21,9	17,2	0,290	0,398	0,312	48,4 g/km
CO	4013	710	677	18,4	17,8	27,2	0,290	0,280	0,430	65,2 mg/km
NO <sub>x</sub>	4004	715	681	18,5	17,9	27,4	0,290	0,280	0,430	4,68 mg/km
PN	4040	640	720	22,4	16,0	29,0	0,333	0,237	0,430	6,6·10 <sup>10</sup> 1/km
Średnia	4038	736	626	18,8	18,4	25,2	0,301	0,299	0,400	–
Odchylenie	35,8	87,2	116,4	2,31	2,18	4,69	0,02	0,06	0,05	–
CoV [%]	0,9%	11,8%	18,6%	12,3%	11,8%	18,6%	6,1%	20,0%	12,8%	–

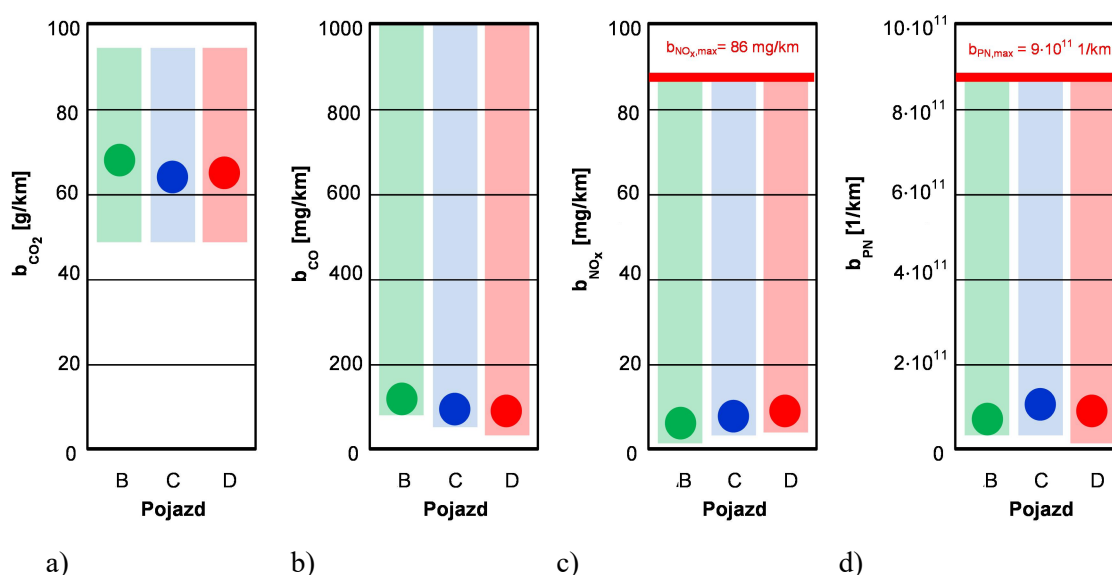
**Tablica 5.6.** Wartości emisji drogowej spalin dla testu RDE (przy założeniu stałego natężenia emisji spalin) – dane wyjściowe otrzymane z algorytmu oraz wartości proponowane dla testu uogólnionego; pojazd D (PHEV 3,3)

Składnik spalin	Czas fazy (t)			Długość fazy (S)			Udział fazy (u)			Emisja drogowa
	M	P	A	M	P	A	M	P	A	
	[s]	[s]	[s]	[km]	[km]	[km]	[-]	[-]	[-]	
CO <sub>2</sub>	3673	915	812	22,7	22,9	32,7	0,290	0,292	0,418	49,3 g/km
CO	4015	709	676	18,4	17,7	27,2	0,290	0,280	0,430	41,4 mg/km
NO <sub>x</sub>	4002	716	682	18,5	17,9	27,5	0,290	0,280	0,430	6,2 mg/km
PN	3811	911	678	20,5	22,8	27,3	0,290	0,323	0,387	2,4·10 <sup>10</sup> 1/km
Średnia	3875	813	712	20,0	20,3	28,7	0,290	0,294	0,416	–
Odchylenie	142	101	58	1,75	2,51	2,32	0,00	0,02	0,02	–
CoV [%]	3,7%	12,4%	8,1%	8,7%	12,4%	8,1%	0,0%	6,0%	4,2%	–

Z porównania danych w wymienionych tablicach 5.4–5.6 wynika, że teoretyczna wartość minimalna związków szkodliwych jest większa od zera, co oznacza, że pojazd hybrydowy typu plug-in w teście RDE będzie wykorzystywał zawsze silnik spalinowy. Dla pojazdu B minimalna wartość emisji drogowej dwutlenku węgla wynosiła 49 g/km, tlenku węgla 83 mg/km, tlenków azotu 2,5 mg/km, a liczby cząstek stałych 5,2·10<sup>10</sup> 1/km. Należy zaznaczyć, że uzyskane wartości parametrów czasu ( $t_k$ ), długości fazy testu ( $S_k$ ) oraz udziału fazy ( $u_k$ ) są różne dla każdego związku szkodliwego, a rozrzut wyników w poszczególnych rozpatrywanych kategoriach mierzony wskaźnikiem CoV zawierał się w granicach od 1,1% do 5,7%. Dla pojazdu C uzyskano według takiego samego schematu następujące wartości emisji drogowej:  $b_{CO_2} = 48$  g/km,  $b_{CO} = 65$  mg/km,  $b_{NO_x} = 4,7$  mg/km, a  $b_{PN} = 6,6 \cdot 10^{10}$  1/km, przy współczynniku zmienności CoV zmieniającym się w granicach od 0,9% do 20%. Dla pojazdu D wartości poszczegól-

nych parametrów był następujące:  $b_{\text{CO}_2} = 49 \text{ g/km}$ ,  $b_{\text{CO}} = 41 \text{ mg/km}$ ,  $b_{\text{NO}_x} = 6,2 \text{ mg/km}$ , a  $b_{\text{PN}} = 2,4 \cdot 10^{10} \text{ 1/km}$ , przy współczynniku zmienności CoV z przedziału od 0,0% do 12,4%.

Uzyskane wartości średnie dla poszczególnych pojazdów i każdego związku szkodliwego zobrazowano na rysunku 5.21 z którego wynika, że emisja drogowa dwutlenku węgla dla każdego pojazdu zawiera się w granicach 60–80 g/km (rys. 5.21a), przy minimalnej wartości wynoszącej około 49 g/km; maksymalną wartość przyjęto obligatoryjnie na poziomie 95 g/km (jest to wartość docelowa dla floty pojazdów danego producenta, jednak trzeba mieć na uwadze, że wartość ta ulega zmniejszeniu w kolejnych latach).



**Rysunek 5.21.** Wartości minimalnej emisji drogowej dwutlenku węgla (a), tlenku węgla (b), tlenków azotu (c) oraz liczby cząstek stałych (d) w teście RDE uzyskane zgodnie z algorytmem dla stałego natężenia emisji spalin – dane w tablicach 5.4–5.6

Emisja drogowa tlenku węgla dla wszystkich badanych pojazdów była na poziomie z zakresu 50–110 mg/km (rys. 5.21b), przy wartości maksymalnej 2100 mg/km, i minimalnej z zakresu 40–80 mg/km. Emisja drogowa tlenków azotu zawierała się w granicach 3,3 mg/km–8,0 mg/km (rys. 5.21c), przy wartości maksymalnej (86 mg/km) wyznaczonej zgodnie wcześniej podanym równaniem; teoretyczna wartość minimalna emisji drogowej tlenków azotu wynosiła z zakresu od 2,5 mg/km do 4,7 mg/km. Ostatni badany składnik spalin – emisja drogowa liczby cząstek stałych wynosiła z zakresu od  $3,1 \cdot 10^{10} \text{ 1/km}$  do  $8,3 \cdot 10^{10} \text{ 1/km}$  (rys. 5.21d). Dla tego parametru wartość maksymalna wyznaczona z równania (5.9) wynosi  $9 \cdot 10^{11} \text{ 1/km}$ , a wyznaczona wartość minimalna zawiera się w przedziale od  $2,4 \cdot 10^{10} \text{ 1/km}$  do  $6,6 \cdot 10^{10} \text{ 1/km}$ .

### Zmienne natężenie emisji drogowej związków szkodliwych spalin

Wyznaczenie minimalnej emisji drogowej z wykorzystaniem stałego natężenia emisji danego składnika spalin ma swoje wady w postaci braku uwzględnienia np. nagrzewania silnika i zmniejszania się emisji zanieczyszczeń w trakcie jazdy po uwzględnieniu nagrzewania reaktora katalitycznego. Bardziej uogólnionym podejściem może być również wykorzystanie opisu matematycznego wykresów przedstawionych na rysunku 5.18, w związku z czym ogólna postać równania (5.9), przyjmuje postać, w którym poszczególne wartości emisji drogowej dla każdego związku oraz w każdej fazie testu będą uzależnione od przebytej drogi przez pojazd:

$$b_{j,RDE} = 0,34 b_{j,M}(S) + 0,33 b_{j,P}(S) + 0,33 b_{j,A}(S) \quad (5.10)$$

Należy tu jednak zastosować funkcję nieciągłą dla każdego związku spalin, która będzie uwzględniała pracę silnika elektrycznego w zakresie ( $S_k \leq S_{EV}$ ) jazdy miejskiej i częściowo pozamiejskiej. Dla pozostałego dystansu każdy przebieg emisji drogowej opisano równaniem kwadratowym:

$$b_{j,k}(S_k) = \begin{cases} 0 & \text{dla } S_k \leq S_{EV} \\ x_{j,k}(S_k)^2 + y_{j,k}S_k + z_{j,k} & \text{dla } S_k > S_{EV} \end{cases} \quad (5.11)$$

gdzie:

$j = \text{CO}_2, \text{CO}, \text{NO}_x, \text{PN}$ ,

$S$  – droga, km,

$S_{EV}$  – droga przebyta przez pojazd z wykorzystaniem silnika elektrycznego, km,

$k = \text{pojazd B, pojazd C, pojazd D}$ ,

$x_{j,k}, y_{j,k}, z_{j,k}$  – współczynniki wielomianu (tablica 5.7).

Wartości współczynników wielomianu obliczone za pomocą dodatku do Excela Solver ( $x_{j,k}, y_{j,k}, z_{j,k}$ ) pokazano w tablicy 5.7, a ich analiza wskazuje, na zwiększanie się wartości emisji drogowej po przekroczeniu długości drogi ( $S_k > S_{EV}$ ), co jest efektem ujemnej wartości każdego współczynnika  $x_{j,k}$ . Wartość dodatnia wskaźnika  $y_{j,k}$  wskazuje na przesunięcie wykresu emisji drogowej w prawą stronę – dla zwiększającego się dystansu od początku testu, a wartość ujemna współczynnika  $z_{j,k}$  – potwierdza przyjęte założenia o zerowej emisji każdego związku spalin podczas pracy pojazdu z wykorzystaniem silnika elektrycznego. W tablicy 5.7 podano również wartości współczynnika determinacji ( $R^2$ ), który wskazuje na bardzo dobre dopasowanie przyjętego równania do wykresów obrazujących emisję drogową każdego związku szkodliwego w teście RDE.

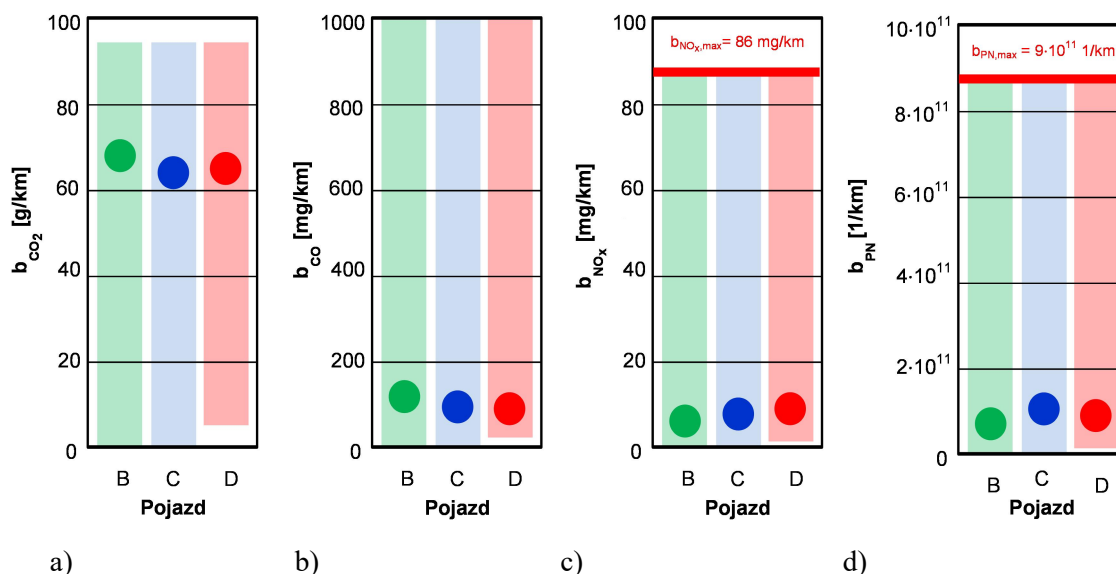
**Tablica 5.7.** Wartości wskaźników równania wielomianu  $x, y, z$  oraz współczynnik determinacji ( $R^2$ ) do wyznaczenia emisji drogowej w teście RDE dla wykorzystanych pojazdów hybrydowych typu plug-in

j \ k		Pojazd B (PHEV 13,6)	Pojazd C (PHEV 8,8)	Pojazd D (PHEV 3,3)
S <sub>EV</sub> [km]		52,2	51,6	40,0
b <sub>CO<sub>2</sub></sub> [g/km]	x	-0,0351	-0,0332	-0,0201
	y	6,6697	6,5103	4,1145
	z	-250,92	-248,93	-132,92
	R <sup>2</sup>	0,996	0,998	0,998
b <sub>CO</sub> [mg/km]	x	-0,0579	-0,0322	-0,0067
	y	10,922	5,2708	1,5469
	z	-404,81	-138,60	-24,207
	R <sup>2</sup>	0,990	0,919	0,995
b <sub>NO<sub>x</sub></sub> [mg/km]	x	-0,0024	-0,0013	-0,0021
	y	0,4972	0,2977	0,3557
	z	-16,292	-10,467	-12,417
	R <sup>2</sup>	0,976	0,994	0,998
b <sub>PN</sub> [l/km]	x	$-5,91 \cdot 10^7$	$-9,62 \cdot 10^7$	$-6,33 \cdot 10^6$
	y	$1,08 \cdot 10^{10}$	$1,59 \cdot 10^{10}$	$1,58 \cdot 10^9$
	z	$-4,05 \cdot 10^{11}$	$-5,76 \cdot 10^{11}$	$-5,51 \cdot 10^{10}$
	R <sup>2</sup>	0,983	0,996	0,979

Wykorzystując równanie (5.11) oraz dane zawarte w tablicy 5.7, wyznaczono minimalną emisję drogową każdego związku szkodliwego w poszczególnych fazach testu RDE oraz w całym teście RDE. Uzyskane szczegółowe wyniki dotyczące czasu trwania każdej fazy testu, drogi w każdej fazie testu oraz udziału fazy w teście dla każdego pojazdu zamieszczono w tablicach 5.8–5.10. Graficzne przedstawienie końcowych zależności pokazano na rysunku 5.22. Wynika z niego, że minimalna wartość emisji dwutlenku dla pojazdu B i C wynosi 0 g/km, co jest równoznaczne z tym, że pojazd może przebyć cały test RDE tylko i wyłącznie na silniku elektrycznym (co jest zgodne z wymaganiami szczegółowymi dotyczącymi przejazdu). Jest to możliwe, gdyż zasięg pojazdów B i C na silniku elektrycznym wynosił około 52 km, a minimalny dystans testu RDE to 48 km. W związku z brakiem pracy silnika spalinowego również dla pozostałych składników spalin dla pojazdu B i C emisja drogowa jest zerowa. Jedynie w przypadku pojazdu D, o małej pojemności elektrycznej akumulatora (3,3 kWh), brak jest możliwości wykonania testu RDE z wykorzystaniem silnika elektrycznego.







**Rysunek 5.22.** Wartości minimalnej emisji drogowej dwutlenku węgla (a), tlenku węgla (b), tlenków azotu (c) oraz liczby cząstek stałych (d) uzyskane zgodnie z algorytmem dla zmiennego natężenia emisji spalin – dane w tablicach 5.8–5.10

Dla tego konkretnego pojazdu teoretyczne wartości minimalnej emisji drogowej spalin są większe od zera dla każdego związku szkodliwego. Jednakże porównując wyniki otrzymane dla stałego i zmiennego natężenia emisji spalin, zauważa się mniejsze wartości dla tego drugiego sposobu. Prawdopodobne jest, że teoretyczne wartości minimalnej emisji drogowej osiągnęte z wykorzystaniem metody zmiennego natężenia emisji podczas badań drogowych są bliższe rzeczywistości i takie są rekomendowane do zastosowania w dalszych rozważaniach.

#### 5.2.4. Kategoria emisyjna pojazdów hybrydowych typu plug-in

Do oceny ekologicznej badanych pojazdów przystąpiono po analizie uzyskanych wyników rzeczywistej emisji drogowej poszczególnych związków szkodliwych, a także po przyjętych wartościach maksymalnych (przyjętych na podstawie norm emisji spalin) i minimalnych (przyjętych na podstawie wyznaczenia teoretycznego minimum dla zmiennego natężenia emisji spalin). Kategoryzacji pod względem ekologicznym EC (*ecological category*) – dla każdego związku szkodliwego – dokonano na podstawie wyznaczenia wartości procentowej uzyskanej rzeczywistej emisji drogowej w zależności od wartości minimalnej i maksymalnej, zgodnie ze wzorem:

$$EC_j [\%] = 100\% \times (b_j - b_{j,\min}) / (b_{j,\max} - b_{j,\min}) \quad (5.12)$$

Równanie (5.12) opisuje proces skalowania, który dostosowuje wartość dowolnego związku do nowych granic określonych wartością minimalną (0%) i maksymalną

(100%). Takie podejście sprawia, że każdą wartość emisji drogowej można przedstawić jako wartość z zakresu 0–100%, co przedstawiono w tabelicy 5.11. Zgodnie z wynikami, można stwierdzić, że największe wartości ( $EC = 64\text{--}68\%$ ) osiąmane są dla emisji drogowej dwutlenku węgla, co świadczy o dużych możliwościach poprawy w tym zakresie. W przypadku kategorii ekologicznej odnoszącej się do emisji drogowej tlenku węgla wyznaczone wartości są z zakresu od 4% do 11%. Świadczy to o znaczącym zapasie wynoszącym około 90%, co jest równoznaczne, że rozpatrywane pojazdy emitują znacznie mniej tego związku w stosunku do normy emisji spalin określonej dla testu RDE. Podobnie jest w przypadku kategorii ekologicznej dotyczącej emisji drogowej tlenków azotu i liczby cząstek stałych – osiąmane wartości z przedziału 4–7%, również potwierdzają powyższą regułę.

**Tablica 5.11.** Wielkości rzeczywiste emisji drogowej spalin ( $b_j$ ), wyznaczonej teoretycznie wartości maksymalnej ( $b_{j,max}$ ) i minimalnej ( $b_{j,min}$ ) oraz ocena ekologiczna ( $EC_j$ ) dla poszczególnych pojazdów hybrydowych typu plug-in

Parametr	Pojazd B (PHEV)	Pojazd C (PHEV)	Pojazd D (PHEV)
$b_{CO_2}$ [g/km]	65	61	64
$b_{CO}$ [mg/km]	110	81	53
$b_{NO_x}$ [mg/km]	3,3	5,9	8
$b_{PN}$ [1/km]	$6,90 \cdot 10^{10}$	$8,30 \cdot 10^{10}$	$3,10 \cdot 10^{10}$
$b_{CO_2, max}$ [g/km]	95	95	95
$b_{CO, max}$ [mg/km]	1000	1000	1000
$b_{NO_x, max}$ [mg/km]	86	86	86
$b_{PN, max}$ [1/km]	$9,00 \cdot 10^{11}$	$9,00 \cdot 10^{11}$	$9,00 \cdot 10^{11}$
$b_{CO_2, min}$ [g/km]	0	0	5,99
$b_{CO, min}$ [mg/km]	0	0	11,43
$b_{NO_x, min}$ [mg/km]	0	0	2,35
$b_{PN, min}$ [1/km]	0	0	$2,00 \cdot 10^9$
$EC_{CO_2}$ [%]	68	64	65
$EC_{CO}$ [%]	11	8	4
$EC_{NO_x}$ [%]	4	7	7
$EC_{PN}$ [%]	8	9	3

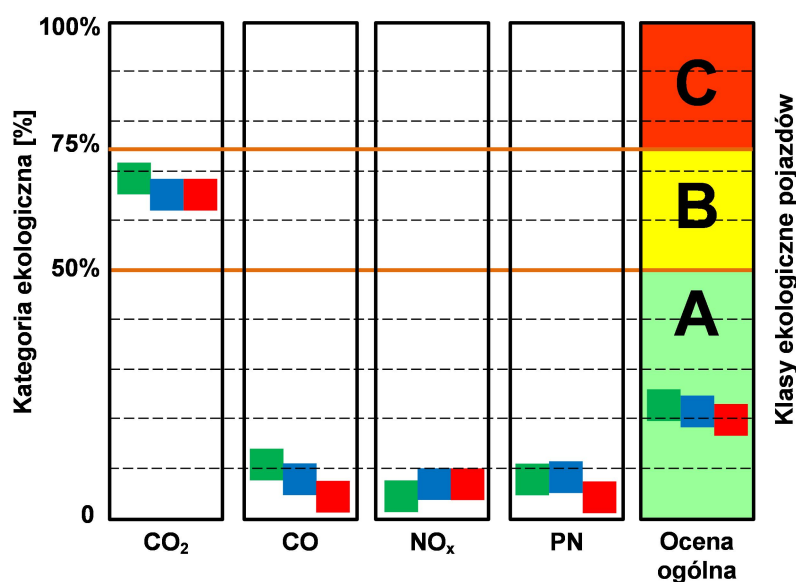
Wyznaczone poszczególne wartości oceny ekologicznej dla każdego związku i rozpatrywanych pojazdów wykorzystano do całkowitej oceny ekologicznej pojazdów. Wykorzystano zależność dotyczącą średniej arytmetycznej, jednakże można wprowadzić wartościowanie pod względem ważności każdego związku szkodliwego. Taki zabieg wymagałby jednak rozpatrzenia np. ważności poszczególnych składników spalin w odniesieniu do zdrowia ludzkiego, a kryteria ich ustalenia wymagałyby kolejnych analiz. W związku z tym wykorzystanie średniej arytmetycznej pozwala na równorzędne traktowanie wszystkich określanych składników spalin. Ponadto w badaniach przyjęto naładowanie akumulatorów 100% przed rozpoczęciem testów, co pozwoliło uzyskać tak korzystne rezultaty. Przyjęcie innych warunków w tym zakresie z pewnością wpłynie na

uzyskane wyniki, jednak to także wymaga postawienia kolejnych założeń opartych na testach i analizach związanych np. z oceną średniego naładowania akumulatorów przed podróżą w określonej grupie reprezentatywnej w aspekcie rzeczywistej eksploatacji pojazdów.

W pracy zaproponowano, aby kategoria emisyjna pojazdu była ściśle uzależniona od procentowej wartości wskaźnika CF. Zaproponowano, aby klasy ekologiczne pojazdów hybrydowych typu plug-in były następujące:

- klasa ekologiczna A – odpowiadałaby wartości CF z zakresu 0–50%,
- klasa ekologiczna B – odpowiadałaby wartości CF z zakresu 50–75%,
- klasa ekologiczna C – odpowiadałaby wartości CF z zakresu 75–100%.

Otrzymane wartości, pokazane na rysunku 5.23, uwiadcniają, że wszystkie badane pojazdy osiągają wartość kategorii ekologicznej mniejszej od 50%, co jest jednoznacznie z kwalifikacją do **klasy ekologicznej A**.



**Rysunek 5.23.** Wartości minimalnej emisji drogowej w teście RDE uzyskane zgodnie z algorytmem dla zmiennego natężenia emisji spalin – dane w tablicach 5.8–5.10

Wyjaśnienia wymaga przypadek w którym wartość emisji drogowej związku szkodliwego będzie większa niż iloczyn wskaźnika CF i wartości normy emisji spalin. Wówczas wartość EC będzie większa od 100%, co np. dla pojazdów konwencjonalnych będzie powodowało konieczność rozszerzenia zakresu kwalifikacji i klas emisyjnych.

Oszacowane minimalne wyniki emisji związków szkodliwych spalin w teście RDE przy założeniu stałego natężenia emisji spalin są o około 20–40% mniejsze, niż wartości rzeczywiste. Jednakże oszacowanie wartości minimalnych, dla zmiennego natężenia emisji, uwiadczenia największe różnice, gdyż wartości minimalne mogą być równe zero. Jest to cecha charakterystyczna pojazdów hybrydowych, szczególnie PHEV, gdzie wy-

korzystając dużą pojemność elektryczną akumulatora można osiągnąć zerową emisję związków szkodliwych w teście RDE. Dlatego kolejnym etapem badań powinna być analiza równoległa polegająca na ocenie z jednej strony aspektów emisyjnych, a z drugiej – aspektów energochłonności. Propozycję koncepcji oparto w głównej mierze na wskazaniu metodyki opracowania wyników emisji spalin pojazdów hybrydowych, aczkolwiek może być ona przydatna zarówno dla pojazdów konwencjonalnych – tylko względem emisyjnych. Również nie ma przeciwwskazań do wykorzystania opisanej metodyki w zastosowaniu do pojazdów ciężkich, w których do opisu emisji spalin wykorzystuje się inne wskaźniki (odnoszone do wykonanej pracy pojazdów).

### **5.3. Analiza emisji spalin pojazdu z napędem hybrydowym dla obecnych i przyszłych testów drogowych**

#### **5.3.1. Charakterystyka tras badawczych**

Realizacja homologacyjnych testów drogowych wymaga spełnienia szeregu wymogów opisanych wcześniej. Proces kategoryzacji przedstawiony w rozdziale 5.2 także musi być oparty o testy RDE. Na podstawie doświadczenia Autorki, przytoczonych danych literaturowych oraz trendów w rozwoju metod badań w rzeczywistej eksploatacji, konieczne staje się podjęcie rozważań dotyczących zmian w procedurach RDE. Głównym nurtem trzeciego celu szczegółowego badań jest ocena emisji spalin pojazdów w testach drogowych, które spełniają (lub spełniają częściowo) kryteria testów RDE, a różnią się przede wszystkim długością testu (i czasem jego trwania). Aby wypełnić założony cel szczegółowy porównano emisję związków szkodliwych spalin w trzech różnych trasach badawczych:

- spełniających wymagania RDE (nazwane RDE),
- niespełniających wymagań RDE o długości 16 km (oznaczane jako N-RDE 16),
- niespełniających wymagań RDE o długości 8 km (oznaczane jako N-RDE 8),

które różniły się całkowitą długością i czasem trwania testu.

Testy drogowe realizowano w Poznaniu i jego okolicach, a do badań wykorzystano pojazd E. Cechą wspólną testów badawczych był ich spójny podział na trzy części: miejską, pozamiejską i autostradową, o podobnych udziałach. Pozostałe parametry dotyczące m.in. zakresów prędkości oraz warunków dynamicznych pozostały bez zmian. Podstawowa charakterystyka testów badawczych została przedstawiona w tabelicy 5.12.

**Tablica 5.12.** Charakterystyka testów badawczych wykorzystanych w etapie 3 (boldem zaznaczono zmiany w stosunku do testu RDE)

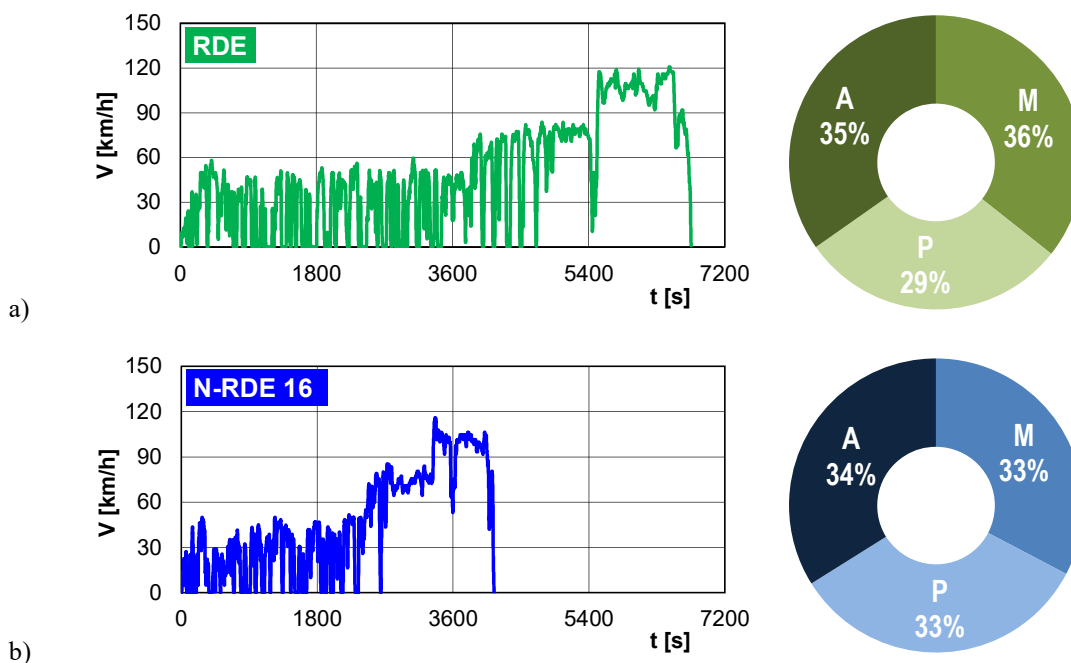
Wymagania	RDE	N-RDE 16	N-RDE 8
Dystans (faza) [km]			
Miejska	$> 16 (30 \pm 5)^1$	<b>16 ±3</b>	<b>8 ±2</b>
Pozamiejska	$> 16 (30 \pm 5)^1$	<b>16 ±3</b>	<b>8 ±2</b>
Autostradowa	$> 16 (30 \pm 5)^1$	<b>16 ±3</b>	<b>8 ±2</b>
Udział faz w teście [%]			
Miejska	29–44	29–44	29–44
Pozamiejska	23–43	23–43	23–43
Autostradowa	23–43	23–43	23–43
Średnia prędkość w fazie miejskiej [km/h]	15–40	15–40	15–40
Udział postoju w fazie miejskiej [%]	6–30	6–30	6–30
Całkowity czas testu [min]	90–120	<b>60–90</b>	<b>30–60</b>

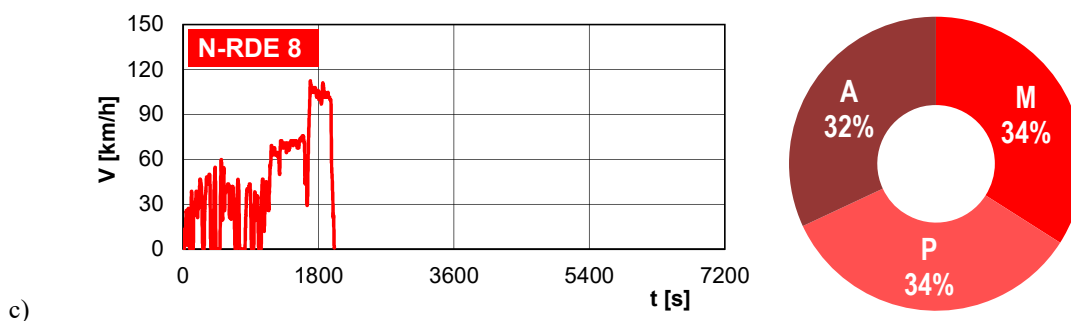
<sup>1</sup> Wartości najczęściej obserwowane.

Wybrane trasy badawcze dobrano w ten sposób, aby spełniały wymagania przepisów dotyczących RDE, ale różniły się długością (a zatem i czasem trwania). Zróżnicowanie długości testów badawczych nie miało wpływu na udział każdej fazy (miejskiej, pozamiejskiej, autostradowej): średnie wartości wynosiły (rys. 5.24):

- udział fazy miejskiej zmieniał się w zakresie 33%–36%,
- udział fazy pozamiejskiej zmieniał się w zakresie 29%–34%,
- udział fazy autostradowej zmieniał się w zakresie 32%–35%.

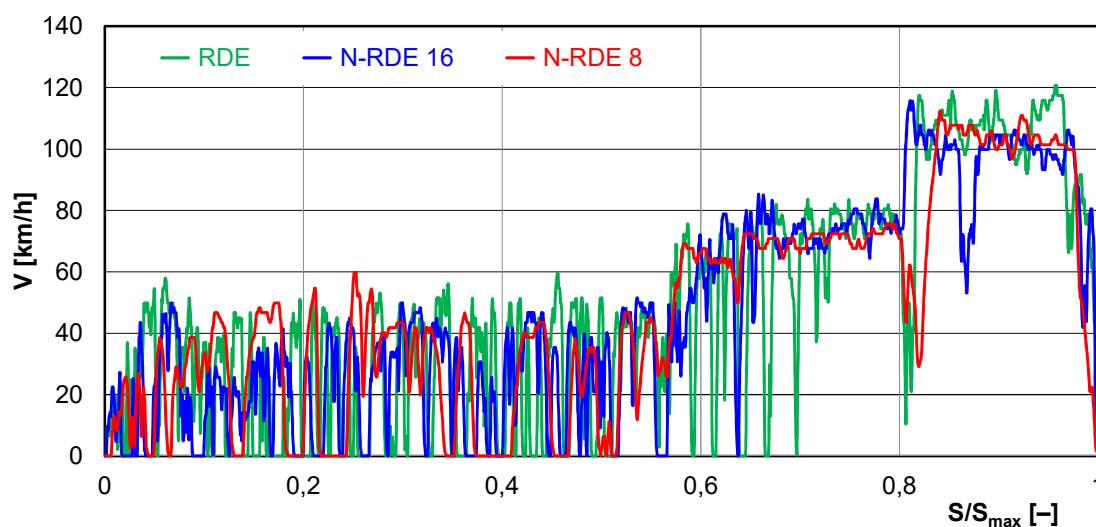
Kompozycja testów spełniała wymagania procedury testów RDE. Testy były realizowane w dniach roboczych w godzinach przedpołudniowych.





**Rysunek 5.24.** Profil prędkości dla każdego testu badawczego: RDE, N-RDE 16 oraz N-RDE 8 wraz z podaniem udziałów procentowych poszczególnych części w całym teście

Porównanie testów badawczych (RDE, N-RDE 16, N-RDE 8) jako funkcji zależnej od czasu  $V = f(t)$  wskazuje na różnice, z których największa to czas trwania testu (rys. 5.24). Jednakże porównanie testów jako funkcji  $V = f(S/S_{\max})$  wskazuje na znaczne podobieństwo wykonanych testów drogowych i ich spójność (rys. 5.25). Właściwość ta powoduje, że możliwe jest porównanie testów drogowych pod względem względnej długości a uzyskane wyniki będą reprezentatywne dla poszczególnych testów drogowych.



**Rysunek 5.25.** Względna długość testów: RDE, N-RDE 16 oraz N-RDE 8

Wszystkie testy (a także pomiary emisji spalin) powtarzane były trzykrotnie, a wartości prezentowane na wykresach (o ile nie podano zakresu zmienności danych lub odchylenia wyników od średniej) są reprezentatywne dla danego testu (np. profil prędkości jazdy). Obliczenia emisji spalin zostały wykonane zgodnie z procedurą MAW, a wyniki badań przedstawiono jako emisję drogową poszczególnych związków szkodliwych. Jedynym parametrem niespójnym we wszystkich testach badawczych była liczba okien pomiarowych, która dla testów o długości 8 km (N-RDE 8) nie była zgodna z normą dotyczącą badań RDE (niewystarczająca liczba okien pomiarowych).

### 5.3.2. Charakterystyka parametrów dynamicznych testów

Aby móc porównywać emisję związków szkodliwych spalin w wykonanych testach najważniejsza jest ich weryfikacja pod względem spełnienia wymagań RDE oraz spełnienia kryteriów dynamiki jazdy. O ile długość testów i czas ich trwania nie były zgodne z przepisami, o tyle pozostałe parametry mieściły się w zakresach zgodnych z wymaganiami. Chodzi tu głównie o przedziały prędkości w poszczególnych częściach testów, udział poszczególnych faz i ich kompozycja. Szczegółowe wyniki porównania testów i ich zgodność z wymaganiami zostały przedstawione w tabelicy 5.13.

**Tablica 5.13.** Szczegółowe dane dotyczące testów badawczych RDE, N-RDE 16 oraz N-RDE 8 (wartości średnie z 3 powtórzeń)

Parametr	Wymagania RDE	RDE	N-RDE 16	N-RDE 8
Dystans (faza) [km]				
Miejska	> 16	31,95	17,70	8,90
Pozamiejska	> 16	26,49	18,08	8,92
Autostradowa	> 16	31,15	18,34	8,36
Udział fazy [%]				
Miejska	29–44	35,66	32,71	34,02
Pozamiejska	23–43	29,57	33,41	34,06
Autostradowa	23–43	34,77	33,89	31,95
Średnia prędkość w fazie miejskiej [km/h]	15–40	26,00	24,53	25,73
Średnia prędkość w fazie pozamiejskiej [km/h]		74,39	73,28	69,51
Średnia prędkość w fazie autostradowej [km/h]		107,82	101,4	103,73
Średnia prędkość w teście [km/h]		47,81	47,10	47,17
Udział postoju w fazie miejskiej [%]	6–30	21,99	18,79	20,48
Parametry dynamiczne [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]				
95. centyl $v \cdot a_+$ (faza)				
Miejska		9,83	9,08	10,32
Pozamiejska		10,89	14,54	11,87
Autostradowa		13,32	13,29	12,58
Względne przyspieszenie dodatnie (RPA) [m/s <sup>2</sup> ]				
Miejska		0,17 m/s <sup>2</sup>	0,18 m/s <sup>2</sup>	0,18 m/s <sup>2</sup>
Pozamiejska		0,07 m/s <sup>2</sup>	0,09 m/s <sup>2</sup>	0,08 m/s <sup>2</sup>
Autostradowa		0,04 m/s <sup>2</sup>	0,05 m/s <sup>2</sup>	0,05 m/s <sup>2</sup>
Całkowity czas testu	90–120 min	112,43 min	68,93 min	33,27 min



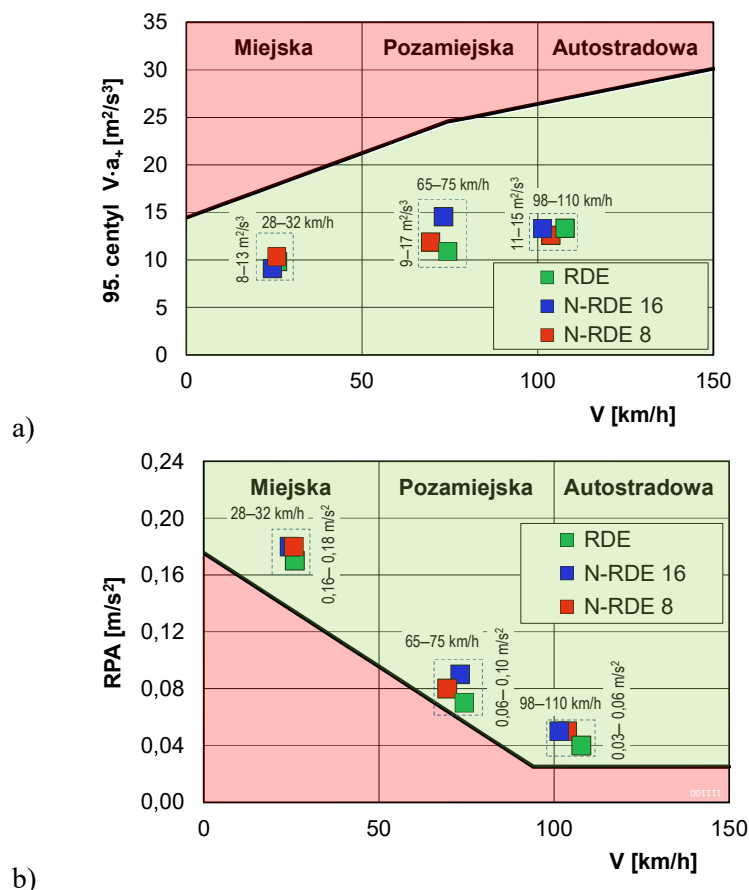
Biorąc pod uwagę warunki dynamiczne, to poddano analizie dwa parametry: 95. centyl iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego (rys. 5.26a) oraz względne przyspieszenie dodatnie (rys. 5.26b). Na rysunkach tych przedstawiono uzyskane wartości średnie w rozpatrywanych testach pomiarowych, a linią przerywaną zaznaczono zmienność tych wartości dla wszystkich wykonanych badań. Wartość 95. centyla iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego wynosiła (rys. 5.26a):

- dla części miejskiej:  $10,5 \text{ m}^2/\text{s}^3 \pm 2,5 \text{ m}^2/\text{s}^3$ ;
- dla części pozamiejskiej:  $13 \text{ m}^2/\text{s}^3 \pm 4 \text{ m}^2/\text{s}^3$ ;
- dla części autostradowej:  $13 \text{ m}^2/\text{s}^3 \pm 2 \text{ m}^2/\text{s}^3$ .

przy różnych wartościach prędkości średniej w danej fazie.

Wartość względnego przyspieszenia dodatniego w rozpatrywanych testach wynosiła (rys. 5.26b):

- dla części miejskiej:  $0,17 \text{ m/s}^2 \pm 0,1 \text{ m/s}^2$ ;
- dla części pozamiejskiej:  $0,08 \text{ m/s}^2 \pm 0,2 \text{ m/s}^2$ ;
- dla części autostradowej:  $0,045 \text{ m/s}^2 \pm 0,015 \text{ m/s}^2$ .



**Rysunek 5.26.** Warunki dynamiczne (średnie wartości) w poszczególnych testach: RDE, N-RDE 16 oraz N-RDE 8: (a) 95.centyl iloczynu prędkości i dodatniego przyspieszenia; (b) względne przyspieszenie dodatnie. Linią przerywaną zaznaczono zakres zmienności prędkości oraz wskaźników dynamicznych dla wszystkich wykonanych powtórzeń testów

Wszystkie uzyskane wartości mieszczą się w dopuszczalnych limitach zmienności: wartości 95. centyla iloczynu prędkości i przyspieszenia dodatniego są mniejsze od maksymalnych wartości dopuszczalnych dla poszczególnych przedziałów prędkości (rys. 5.26a), a jednocześnie wszystkie zarejestrowane wartości względnego przyspieszenia dodatniego są większe od dopuszczalnego minimum (rys. 5.26b). Oznacza to że przeprowadzone testy drogowe spełniają wymagania odnośnie warunków dynamicznych, co pozwala na ich wzajemną ocenę pod kątem emisyjnym.

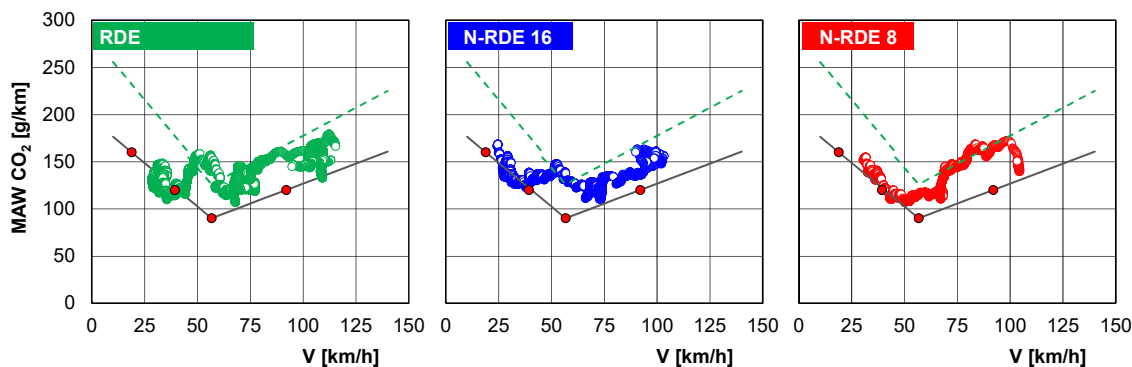
### 5.3.3. Porównanie emisji drogowej związków szkodliwych w zróżnicowanych testach drogowych

Do wyznaczenia emisji drogowej poszczególnych związków szkodliwych według procedury MAW, wymagana jest znajomość emisji drogowej dwutlenku węgla w teście WLTC. Dla badanego pojazdu wartości emisji drogowej CO<sub>2</sub> w poszczególnych fazach testu WLTC wynosiły 158, 118, 97 oraz 125 g/km, odpowiednio w I, II, III, i IV fazie testu homologacyjnego (zaznaczono je kolorem czerwonym na rys. 5.27). Jak wynika z przedstawionych wykresów dotyczących wartości emisji CO<sub>2</sub> w oknach pomiarowych, 92% okien pomiarowych (5010 z 5464 okien) wyznaczonych w teście RDE mieści się w granicach dopuszczalnego limitu, w którym udział wagowy okna wartości CO<sub>2</sub> wynosi 1. Dla testu N-RDE 16 liczba okien pomiarowych była mniejsza (3386 – krótszy czas testu), a udział okien pomiarowych zawierających się w dopuszczalnych granicach wynosił 96% (3248 z 3386 okien). W teście N-RDE 8 liczba okien pomiarowych wynosiła 1326 z 1462 wszystkich okien, co stanowi 91%. Udział normalnych okien w poszczególnych częściach wykonanych testów był następujący (wymagany jest udział większy niż 50%):

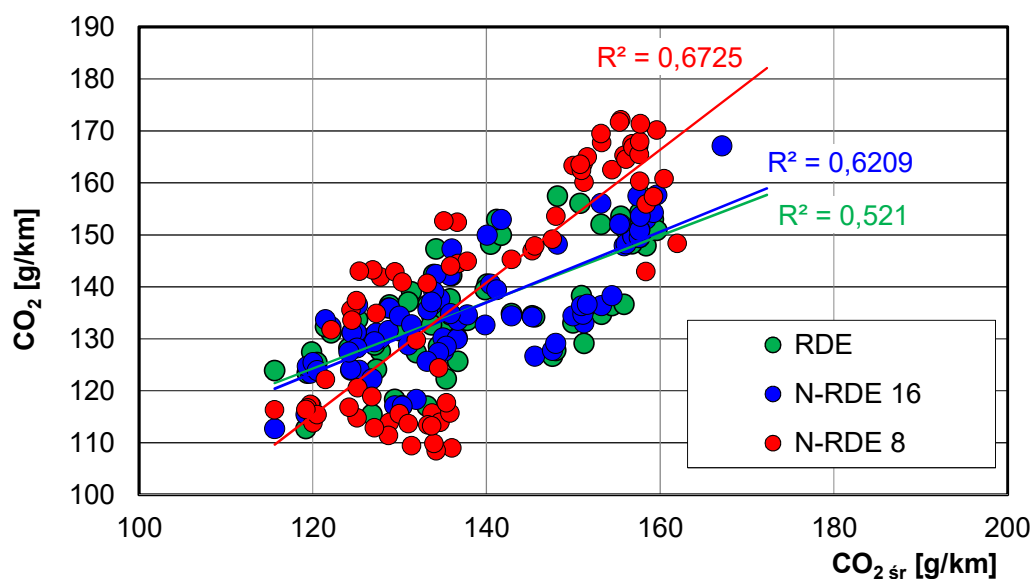
- dla testu RDE: 100% (M), 74,0% (P) oraz 100% (A),
- dla testu N-RDE 16: 100% (M), 85,4% (P) oraz 100% (A),
- dla testu N-RDE 8: 100% (M), 93,2% (P) oraz 64,3% (A).

Porównanie uzyskanych wartości emisji drogowej CO<sub>2</sub> pozwala ocenić adekwatność poszczególnych pomiarów w stosunku do uśrednionych wartości ze wszystkich testów (rys. 5.28). Porównanie takie świadczy o najlepszej korelacji uśrednionych wartości emisji CO<sub>2</sub> ( $R^2 = 0,67$ ) z wartościami uzyskanymi w najkrótszym teście drogowym N-RDE 8. Zestawienie wartości emisji drogowej CO<sub>2</sub> w teście N-RDE 16 ze średnimi charakteryzującą się mniejszym wskaźnikiem korelacji wynoszącym 0,62. Najmniejsze wartości korelacji (0,52) uzyskano porównując test RDE z wartościami średnimi. Przedstawiona właściwość porównywanych testów badawczych świadczy o tym, że prawidłowo dobrano trasę testu N-RDE 8, której charakterystyka pokrywa się z testem prawidłowo-

wym pod względem emisji CO<sub>2</sub>. Zauważalne natomiast jest zagęszczenie punktów pomiarowych (emisji drogowej CO<sub>2</sub>) w przedziałach zależności CO<sub>2</sub> = f(CO<sub>2</sub> śr) wynoszących {120–140 g/km; 110–120 g/km}, co powoduje większe nachylenie prostej regresji dla testu N-RDE 8. Jest to wynik krótkiego dystansu testu i mniejszej liczby zarejestrowanych okien pomiarowych.



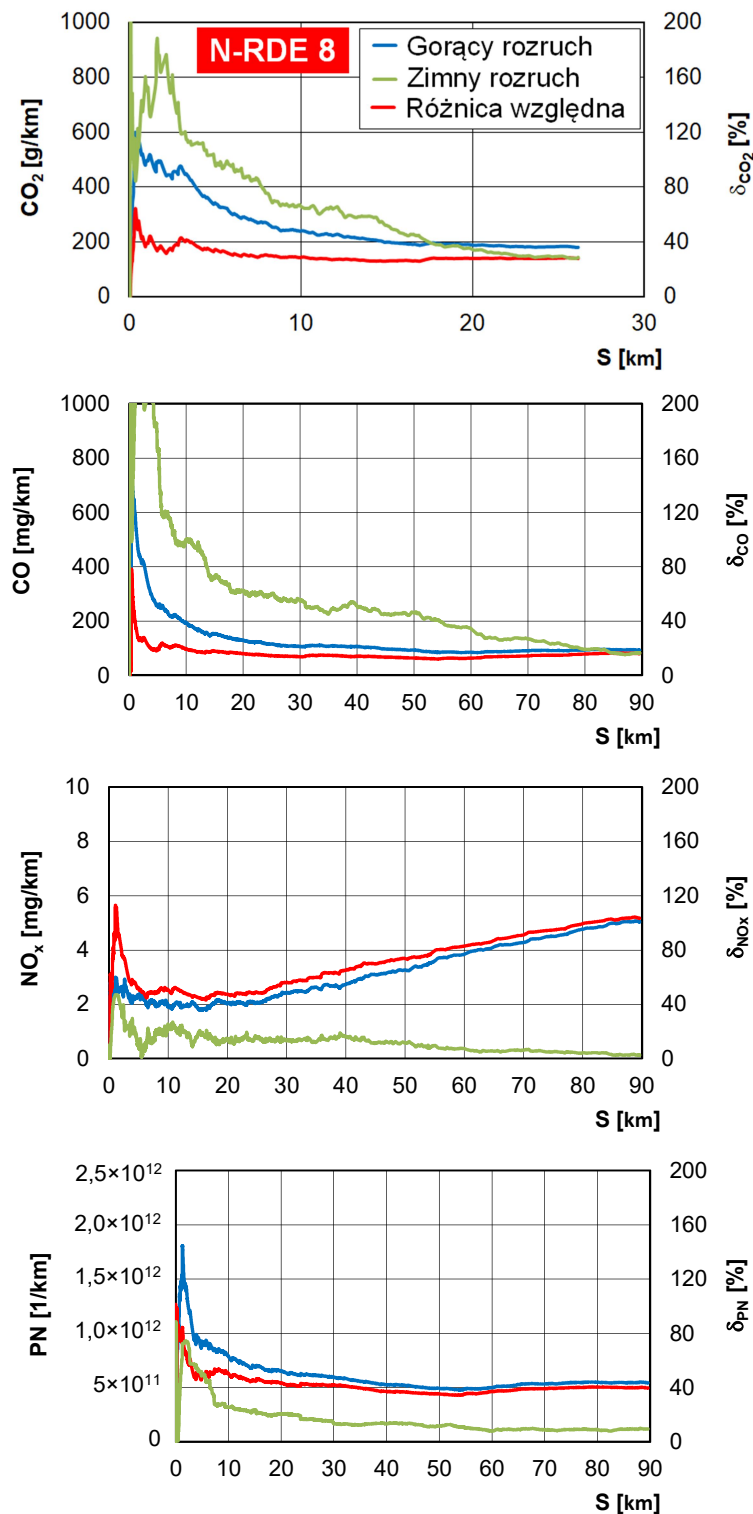
**Rysunek 5.27.** Wartości emisji drogowej CO<sub>2</sub> w oknach pomiarowych na tle wartości w poszczególnych częściach testu WLTC (pełne czerwone punkty) oraz dopuszczalne tolerancje (linia zielona przerywana) dla wykonanych testów RDE, N-RDE 16 oraz N-RDE 8



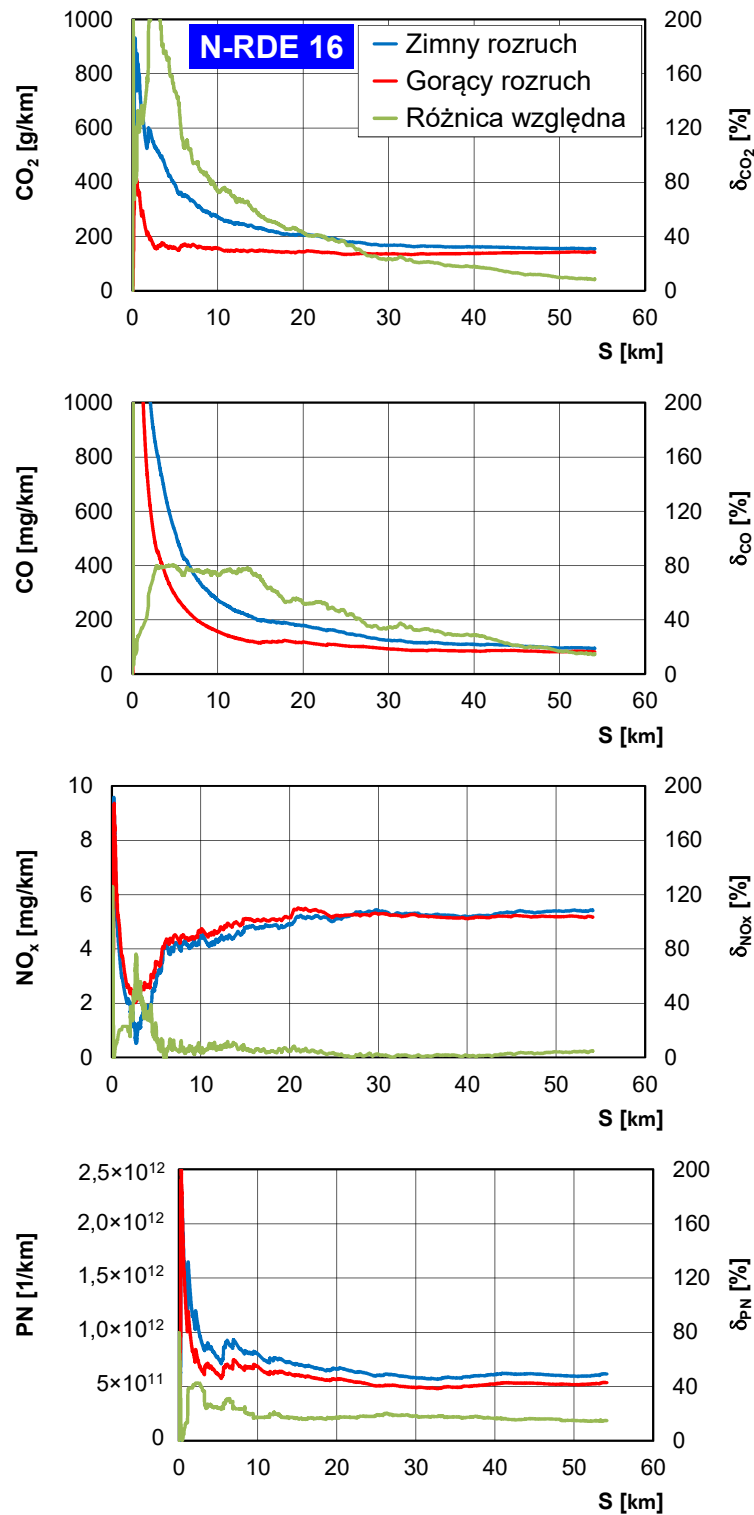
**Rysunek 5.28.** Porównanie emisji drogowej CO<sub>2</sub> w poszczególnych testach drogowych (RDE, N-RDE 16 i N-RDE 8) w zależności od uśrednionej ze wszystkich testów emisji drogowej CO<sub>2</sub>

Uzyskane wartości emisji drogowej poszczególnych związków szkodliwych wyznaczono w zależności od przebytej drogi i uzależniono je od stanu termicznego silnika na początku testu badawczego. Badania wykonano dla dwóch opcji: zimnego i gorącego rozruchu silnika (rys. 5.29–5.31).

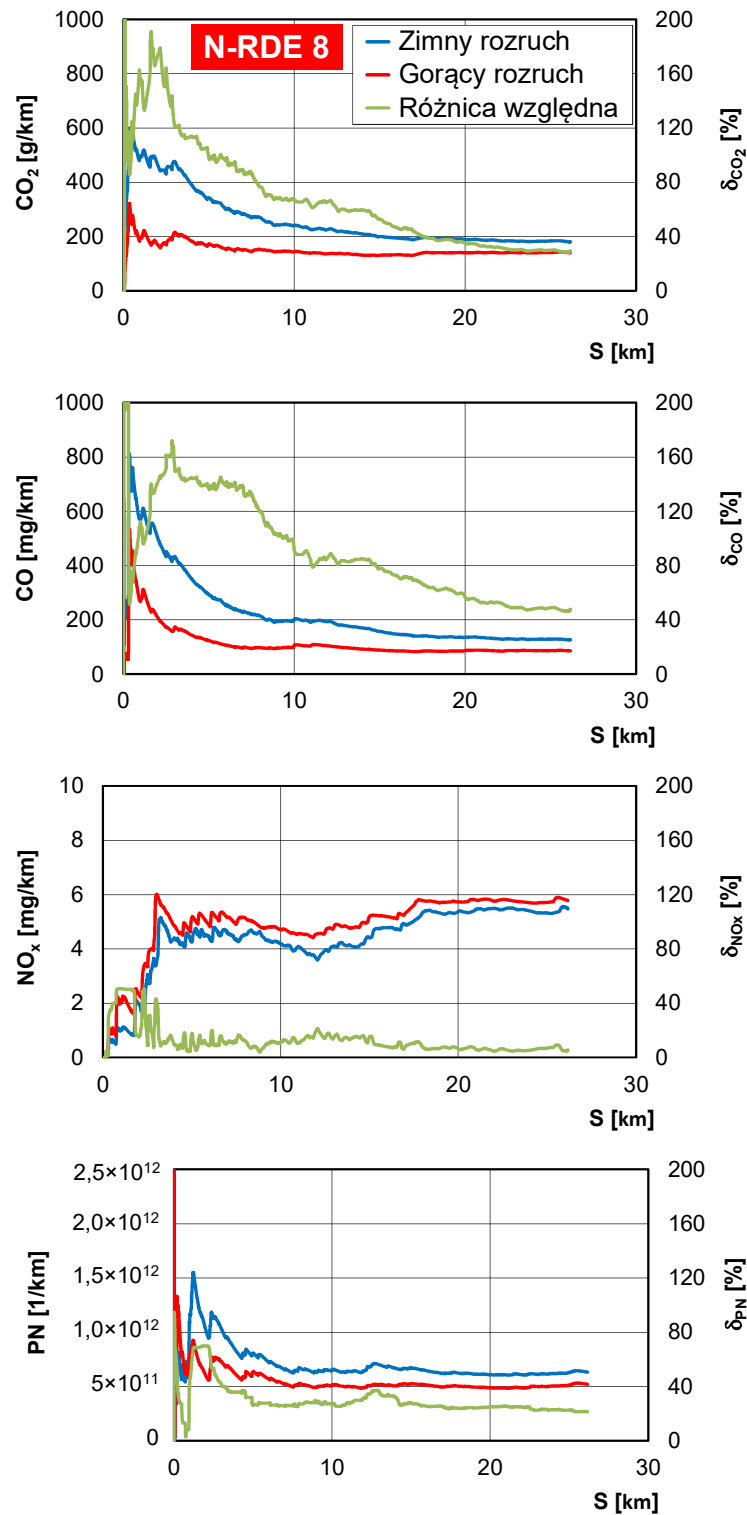
Rozpatrując emisję drogową dwutlenku węgla w zależności od pokonanego dystansu  $CO_2 = f(S)$ , należy stwierdzić zbliżony jej charakter zmienności dla wszystkich wykonanych testów. Emisja drogową  $CO_2$  od zimnego rozruchu po 10 km przebytego dystansu zmniejszyła się od wartości 600 g/km do wartości około 200 g/km.



Rysunek 5.29. Porównanie drogowej emisji zanieczyszczeń w teście drogowym RDE w zależności od drogi testu



Rysunek 5.30. Porównanie drogowej emisji zanieczyszczeń w teście drogowym N-RDE 16 w zależności od drogi testu



Rysunek 5.31. Porównanie drogowej emisji zanieczyszczeń w teście drogowym N-RDE 8 w zależności od drogi testu

Dla gorącego rozruchu wartości te były mniejsze o około 10% w stosunku do rozruchu zimnego (170–180 g/km). Wartości końcowe emisji drogowej CO<sub>2</sub> były najmniejsze dla testu RDE, a największe dla testu N-RDE 8. Dla każdego testu badawczego wyznaczono również różnicę względną między wartością emisji dla zimnego i gorącego

rozruchu. Cechą charakterystyczną jest wartość tego parametru wynosząca około 80% po przebyciu pierwszych 10 km oraz 40% po przebyciu 20 km. Jest to jednoznaczne ze zwiększonym zużyciem paliwa po rozruchu zimnego silnika, które na krótkich odcinkach (do 10 km) jazdy miejskiej może być dwukrotnie większe niż zużycie paliwa dla rozruchu gorącego. Dla testów RDE (rys. 5.29) oraz N-RDE 16 (rys. 5.30) wartość różnicy względnej zmniejszała się osiągając wartości 10–15% na końcu testu. Z tego względu krótkie testy RDE (rys. 5.31) byłyby bardziej wiarygodne a wartości emisji CO<sub>2</sub> (pośrednio zużycia paliwa) byłyby zbliżone do tych, które są uzyskiwane podczas normalnego użytkowania pojazdu.

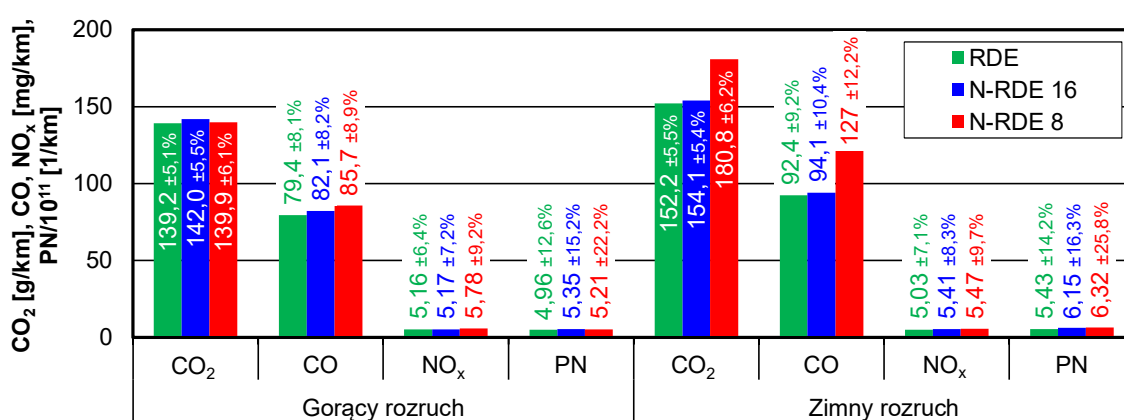
W przypadku emisji drogowej CO dla różnych testów badawczych charakter zmian był podobny do zmian odnotowanych dla emisji CO<sub>2</sub>. Znaczącą różnicą były natomiast wartości tej emisji stanowiące 1/1000 wartości emisji CO<sub>2</sub>. Uzyskane chwilowe wyniki miały najszybciej na dystansie 10 km i wynosiły (odpowiednio dla zimnego i gorącego rozruchu): 200 mg/km i 100 mg/km (w teście RDE, rys. 5.29), 210 mg/km i 130 mg/km (w teście N-RDE 16, rys. 5.30) oraz 200 mg/km i 100 mg/km (w teście N-RDE 8, rys. 5.31). Po zakończeniu każdego testu wartości emisji drogowej CO były zbliżone do siebie i wynosiły około 100 mg/km. Należy zaznaczyć, że wartości końcowe emisji CO dla testu rozpoczynającego się od zimnego rozruchu były większe niż dla testu, którego początkiem był rozruch gorący. Różnica względna emisji CO dla zimnego i gorącego rozruchu po przebyciu pierwszych 10 km wynosiła: około 100% w teście RDE, około 90% w teście N-RDE 16 oraz 85% w teście N-RDE 8. Po kolejnych 10 km różnica względna CO zmniejszyła się do 60% niezależnie od wykonywanego testu badawczego. Wartość końcowa  $\delta_{CO}$  była największa dla testu krótkiego N-RDE 8 i wynosiła ponad 40%, a dla testów RDE i N-RDE 16 stanowiła około 20%.

Odmienny charakter zmian emisji drogowej obserwowano podczas pomiarów tlenków azotu. Wartość emisji NO<sub>x</sub> = f(S) w teście RDE (rys. 5.29) tuż po rozpoczęciu testu osiągała wartość maksymalną (wynoszącą około 6 mg/km), a następnie malała i w okresie kilkunastu kilometrów utrzymywała się na dość stabilnym poziomie (około 2 mg/km). Po rozpoczęciu fazy pozamiejskiej emisja drogowa tlenków azotu zwiększała się w tempie 1 mg/km na każde przebyte 10 km drogi. Taki trend również utrzymywał się podczas jazdy autostradowej. Różnica względna dla pomiarów NO<sub>x</sub> z gorącego i zimnego rozruchu wynosiła 20% do 40 km drogi, a następnie zanikała. Dla testu N-RDE 16 (rys. 5.30) emisja drogowa tlenków azotu malała przez pierwsze 2–3 km, a następnie wzrastała do wartości 4–5 mg/km po przebyciu fazy miejskiej (0–18 km). W fazie pozamiejskiej (18–35 km) emisja tlenków azotu stabilizowała się na poziomie 5,5 mg/km i taki wynik utrzymywał się również w fazie autostradowej. Różnica względna dla tych pomiarów wynosiła kilkanaście procent w fazie miejskiej i zanikała w fazie pozamiejskiej i autostradowej. Największe zmiany w emisji drogowej NO<sub>x</sub> odnotowano w teście N-RDE 8 (rys. 5.31), w którym w fazie miejskiej (0–8 km) początkowa emisja

drogowa była niewielka z racji wykorzystania silnika elektrycznego pojazdu z napędem hybrydowym (dzięki sprzyjającym ku temu warunkom). Natomiast po przebyciu około 3 km, emisja drogowa NO<sub>x</sub> gwałtownie wzrosła do wartości około 6 mg/km, a następnie utrzymywała się w zakresie 4–5 mg/km (niezależnie od stanu termicznego silnika spalinowego). W fazie pozamiejskiej emisja drogowa zwiększyła się do poziomu 6 mg/km i taki wynik utrzymywał się do końca testu. Różnica względna emisji dla gorącego i zimnego rozruchu dla tego testu wynosiła w fazie miejskiej około 30–40%, w fazie pozamiejskiej – około 20% a w fazie autostradowej wynosiła poniżej 10%. We przeprowadzonych testach emisja drogowa tlenków azotu z gorącego rozruchu w przeważającej części była większa od emisji z rozruchu zimnego.

Charakter zmian liczby cząstek stałych był najbardziej zbliżony do zmian emisji drogowej tlenku węgla, co wynika z podstawowych prawidłowości tworzenia się tych związków (m.in. z lokalnego niedoboru tlenu w cylindrze silnika oraz gaszenia płomienia przy chłodnych ściankach cylindra). Niezależnie od wykonywanego testu, tuż po rozruchu obserwowane było zwiększenie liczby cząstek stałych do wartości 1,5–2,0×10<sup>12</sup> 1/km (podczas zimnego rozruchu), a następnie zmniejszanie liczby cząstek do wartości 1,0×10<sup>12</sup> 1/km po przebyciu około 5 km. Po kolejnych 10 km testu wartości stabilizowały się w zakresie około 5,0×10<sup>11</sup> 1/km. Różnica między wartością emisji liczby cząstek stałych dla zimnego i gorącego rozruchu była największa dla testu krótkiego (N-RDE 8, rys. 5.31), a najmniejsza dla testu RDE (rys. 5.29).

Końcowe wartości emisji poszczególnych związków szkodliwych dla wszystkich testów przedstawiono na rysunku 5.32. Podano również wartości odchylenia standardowego dla poszczególnych badań z podziałem na zimny i gorący rozruch silnika. Jak wynika z przedstawionych danych wykonywanie testów z zimnego rozruchu skutkuje większą emisją wszystkich związków szkodliwych szczególnie dla krótkich testów (N-RDE 8).



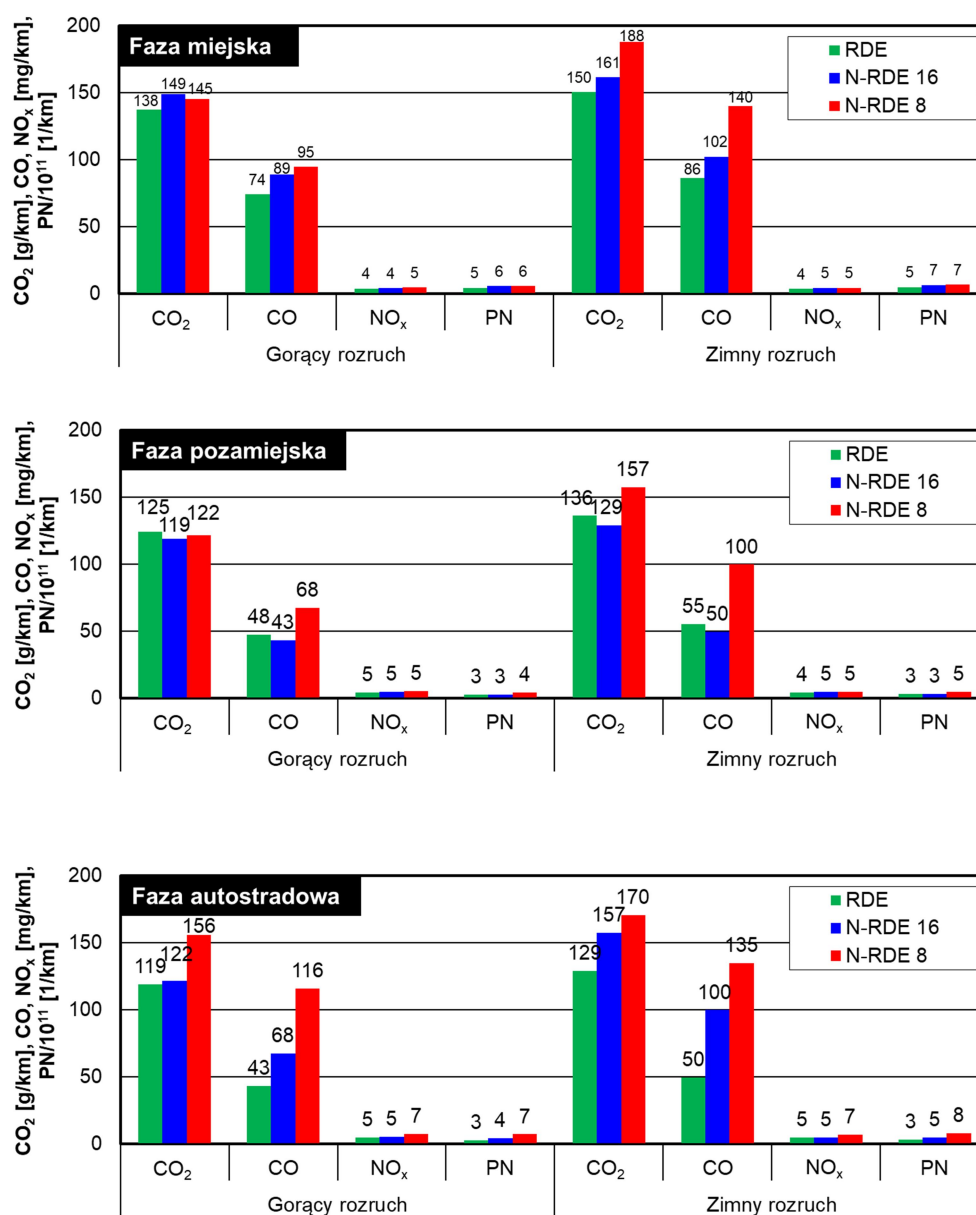
**Rysunek 5.32.** Wartości emisji drogowej (wraz z odchyleniem standardowym) dla zimnego i gorącego rozruchu dla testów RDE, N-RDE 16 oraz N-RDE 8



Zwiększenie wartości emisji dla testu rozpoczynanego z zimnego rozruchu wynika głównie z faktu braku uzyskania ustalonego stanu termicznego silnika w fazie miejskiej.

Dystans testu N-RDE 8 praktycznie zawiera się w długości fazy miejskiej testu RDE. Cechą niekorzystną jest obarczenie wyniku większym odchyleniem standardowym, wynikającym z mniejszej liczby okien pomiarowych.

Przedstawione dane należy rozpatrywać dodatkowo w poszczególnych częściach testu drogowego w fazie miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej. Największe różnice w wartościach między testami RDE, N-RDE 16 oraz N-RDE 8 uwidaczniają się gdy test rozpoczyna się od zimnego rozruchu silnika (rys. 5.33).



**Rysunek 5.33.** Emisja drogowa (wartości średnie) zanieczyszczeń dla zimnego i gorącego rozruchu w części miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej testów RDE, N-RDE 16 oraz N-RDE 8

W fazie miejskiej największe zmiany emisji drogowej odnotowano dla emisji drogowej dwutlenku węgla (180 i 150 g/km) i tlenku węgla (140 i 90 mg/km), odpowiednio dla testu N-RDE 8 oraz RDE. W fazie pozamiejskiej różnice w emisji drogowej dwutlenku węgla były mniejsze

(165 i 130 g/km), natomiast uwidoczniły się różnice w emisji drogowej tlenku węgla (100 i 55 mg/km). W fazie autostradowej – ze względu na termiczną stabilizacji układów oczyszczających spaliny – znaczące różnice w emisji drogowej tlenku węgla występowały zarówno dla testów rozpoczynających się od gorącego (115 i 456 mg/km), jak i zimnego rozruchu (140 i 55 mg/km). Uogólniając uzyskane dane można stwierdzić, że wykonywanie krótkich testów drogowych skutkuje zwiększeniem emisji drogowej wszystkich składników niezależnie od warunków termicznych, w których odbywa się rozruch silnika do takiego testu.

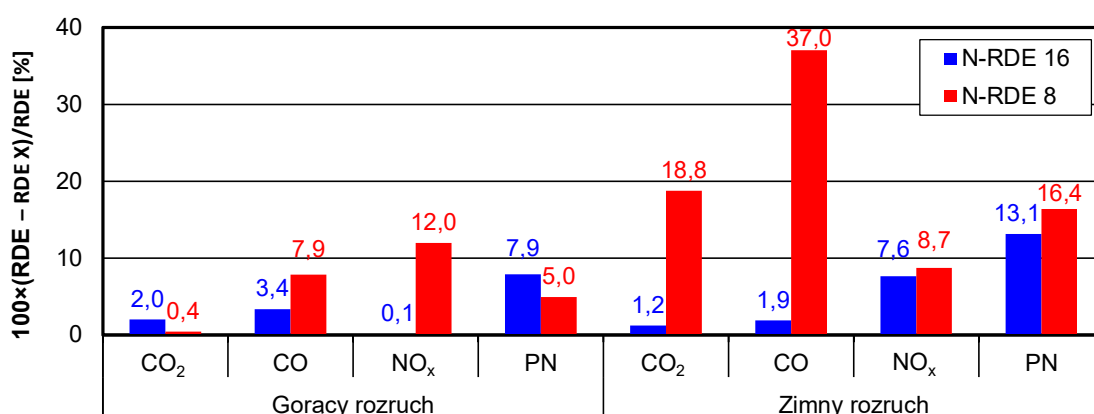
Rozpatrując względną różnicę w emisji spalin w testach N-RDE 16 i N-RDE 8 w stosunku do testu RDE wykorzystano równanie:

$$(RDE - N-RDE X) / RDE \times 100\% \quad (5.13)$$

gdzie:

N-RDE X oznacza emisję drogową danego związku szkodliwego w teście N-RDE 16 lub N-RDE 8.

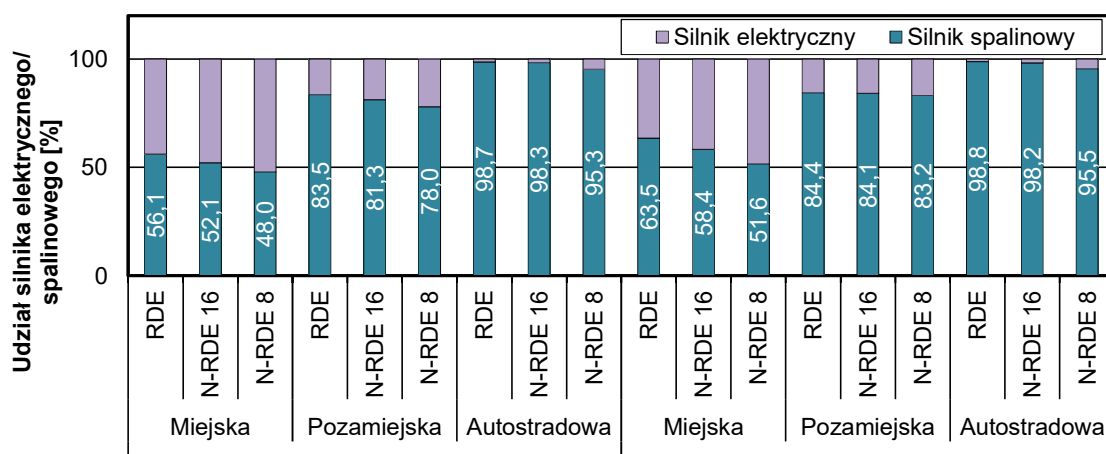
Zgodnie z równaniem (5.13) wykonano porównanie dla wszystkich związków szkodliwych, które zaprezentowano na rysunku 5.34. Wynika z niego, że dla gorącego rozruchu największe różnice względne (zwiększenie emisji) między testem RDE a pozostałymi testami występują dla emisji drogowej tlenków azotu (o 12% dla N-RDE 8), tlenku węgla (o 7,9% dla N-RDE 8) oraz liczby cząstek stałych (o 7,9% dla N-RDE 16 oraz 5% dla N-RDE 8).



**Rysunek 5.34.** Różnica względna wartości emisji zanieczyszczeń (wartości średnie) dla zimnego i gorącego rozruchu podczas testów N-RDE 16 oraz N-RDE 8 w stosunku do testu RDE (N-RDE X oznacza test N-RDE 16 lub N-RDE 8)

Rozpatrując testy rozpoczynające się od zimnego rozruchu silnika, to wyniki emisji w krótkim teście drogowym N-RDE 8 charakteryzują się większymi wartościami: dwutlenku węgla o 18,8%, tlenku węgla o 37%, tlenków azotu o 8,7%, emisją liczby cząstek stałych o 16,4% w stosunku do testu RDE.

Wszystkie przedstawione analizy dotyczące emisji związków szkodliwych w testach drogowych nie mogą być analizowane w oderwaniu od charakteru obiektu badawczego, którym był samochód hybrydowy typu *full hybrid*. Charakterystyka pracy pojazdu, która nie pozwala na wybór opcji napędu (spalinowy/hybrydowy/elektryczny), a jedynie jest oparta na strategii wykorzystywania silnika elektrycznego do wspomagania lub częściowego zastępowania silnika spalinowego. W wykorzystanym układzie, zmniejszenie emisji spalin (zmniejszenie zużycia paliwa), można osiągnąć jedynie przez stosowanie zasad ecodrivingu. Jednakże wykonywanie testów drogowych przez jednego kierowcę i możliwość zachowania wymogów kryteriów dynamicznych testów RDE wykluczały taką możliwość. Udział pracy silnika spalinowego i elektrycznego wynikał jedynie ze strategii sterowania silnikiem. Jak wynika z rysunku 5.35 największy udział pracy silnika elektrycznego występował dla fazy miejskiej podczas testów rozpoczynających się od gorącego rozruchu i wynosił 56%, 52% i 48% odpowiednio dla testów RDE, N-RDE 16 oraz N-RDE 8. Dla testów rozpoczynających się od zimnego rozruchu udział pracy silnika elektrycznego w fazie miejskiej był o kilka procent mniejszy. Podobna sytuacja była również w fazie pozamiejskiej, w której wykorzystanie silnika elektrycznego zmniejszyło się do zakresu 17–23% (gorący rozruch) i 16–17% dla rozruchu zimnego. Faza autostradowa charakteryzowała się bardzo małym wykorzystaniem silnika elektrycznego, co wynika głównie z dużych prędkości jazdy i małego udziału hamowania silnikiem. Charakterystyczne jest natomiast, niezależnie od fazy testu oraz gorącego lub zimnego rozruchu, że im dłuższy dystans fazy jazdy, tym krótszy był udział pracy silnika elektrycznego.



**Rysunek 5.35.** Udział pracy silnika elektrycznego/spalinowego w poszczególnych częściach testów RDE, N-RDE 16 oraz N-RDE 8 dla zimnego i gorącego rozruchu

W teście N-RDE 8 silnik elektryczny był wykorzystany średnio o 10% więcej niż podczas testu RDE (48% w stosunku do 36%; część miejska, zimny rozruch).

Wyniki porównania wskazują, że wykorzystanie krótkich testów drogowych (o długości każdej fazy około 8 km) do oceny emisji spalin wpływają na mniejszą stabilizację termiczną silnika spalinowego i układu oczyszczania spalin. Powoduje to zwiększenie emisji drogowej wszystkich składników spalin: dwutlenku węgla (o 19%), tlenku węgla (o 37%), tlenków azotu (o 9%) i liczby cząstek stałych (o 16%). Jednocześnie zwiększona jest emisja związków szkodliwych we wszystkich fazach testu drogowego co pozytywnie wpływa na dokładność pomiarów, mając na uwadze bardzo małe wartości stężenia rejestrowane przez analizatory.

W pracy zaproponowano dwa testy (mogące być wykorzystane w przyszłości), które odpowiadają zgłaszanym postulatom dotyczącym skrócenia testów drogowych. Testy te bazują w dużej mierze na zasadach określonych w przepisach RDE (prędkości jazdy, kompozycja testu, podział faz, udział), a różnice wynikają głównie z charakterystyki tych testów (długości, czasu trwania).

Przedstawione wyniki badań dotyczą porównania emisji związków szkodliwych spalin z pojazdu z napędem hybrydowym w testach drogowych, zgodnych z wymaganiami obecnymi (RDE) oraz wymaganiami proponowanymi (N-RDE 16 oraz N-RDE 8). Krótsze testy RDE, w porównaniu do długotrwałych testów, oferują większą precyzję i dokładność pomiarów emisji zanieczyszczeń, eliminując zakłócenia związane np. z różnymi niespodziewanymi kongestiami. Są bardziej ekonomiczne i efektywne czasowo, co jest istotne w badaniach naukowych. Dodatkowo, są bardziej dostosowane do rzeczywistych warunków użytkowania pojazdów, co może przynieść bardziej wiarygodne wyniki. Warto również podkreślić, że krótsze testy RDE pozostają zgodne z obowiązującymi przepisami i normami emisji, co może ułatwić ich implementację w przemyśle motoryzacyjnym. Ostatecznie, wprowadzenie tych skróconych testów może pomóc w bardziej efektywnym badaniu emisji pojazdów w realnych warunkach i przyczynić się do rozwoju bardziej precyzyjnych metod oceny emisji, zgodnych z aktualnymi potrzebami i regulacjami.

## 6. Wnioski i kierunki dalszych badań

### 6.1. Wnioski ogólne

Transport, stanowiący jedną z najbardziej rozwijających się gałęzi przemysłu, jest problematyczny ze względu na zanieczyszczenie środowiska wpływające na stężenie niebezpiecznych substancji w powietrzu. Odpowiedzią na ten negatywny wpływ są coraz bardziej zaostrzane normy emisji zanieczyszczeń, a także związane z nimi testy homologacyjne, które bardziej odpowiadają warunkom użytkowania pojazdów. Aby sprostać wciąż rosnącym wymaganiom, opracowywane są technologie, które mają na celu minimalizowanie degradacji środowiska przez pojazdy. Stosowanie zaawansowanych technologii w silnikach spalinowych i wykorzystywanie ich we wszystkich środkach transportu wymuszone jest przez ciągłe ograniczanie emisji ze źródeł napędu. W ramach strategii ograniczania emisji gazów cieplarnianych, Unia Europejska wprowadziła limity emisji dwutlenku węgla dla nowych samochodów osobowych i lekkich samochodów użytkowych. To trzeci najbardziej kluczowy związek poza tlenkami azotu i liczbą cząstek stałych brany pod uwagę, zarówno w drogowych testach jezdnych, jak i w testach hamownianych.

Obiekty badań w pracy zostały dobrane w sposób celowy, uwzględniając ich popularność oraz fakt, że napędy hybrydowe stanowią pośrednie rozwiązanie pomiędzy konstrukcjami spalinowymi, a pełną elektryfikacją. Było to istotne w kontekście kategoryzacji pojazdów pod względem emisji spalin. Wybór konkretnych pojazdów był podyktowany ich powszechnym zastosowaniem na rynku, co zapewniło reprezentatywność dla szerokiego spektrum użytkowników. To podejście umożliwia lepsze zrozumienie, w jaki sposób konkretne konstrukcje układów napędowych, wpisują się w kontekst globalnych norm emisji i jakie mogą mieć konsekwencje dla środowiska.

W rozprawie opracowano metodykę badań, wykonano pomiary i analizowano wyniki emisji dwutlenku węgla, tlenku węgla, węglowodorów, tlenków azotu oraz masy i liczby cząstek stałych w drogowych testach emisyjnych dla najbardziej reprezentatywnych pojazdów sprzedawanych w Polsce. Efektem tego była ocena ekologiczna takich pojazdów w rzeczywistych warunkach jazdy. Oceny dokonano w trzech etapach:

- 1) w etapie 1 określono rzeczywisty poziom emisji spalin i zużycia energii dla samochodów osobowych (konwencjonalnego, hybrydowego oraz elektrycznego); badania były prowadzone w drogowych testach emisyjnych zgodnie z wymaganiami przepisów;
- 2) w etapie 2 –wyznaczono wartości minimalne emisji spalin, które są możliwe do osiągnięcia w teście drogowym; efektem była odpowiedź na pytanie: czy testy

drogowe odzwierciedlają rzeczywisty poziom emisji spalin, a także jakie są możliwe do osiągnięcia minimalne wartości emisji drogowej poszczególnych związków szkodliwych;

- 3) w etapie 3 porównano wartości emisji drogowej związków szkodliwych spalin w testach drogowych, obecnie obowiązujących, z wartościami możliwymi do uzyskania w zmienionych testach drogowych, które są przewidywane do wprowadzenia w przyszłości.

W pracy zrealizowano cele szczegółowe (odpowiadające poszczególnym etapom pracy):

- dokonano oceny emisji spalin i energochłonności samochodów osobowych o różnych układach napędowych podczas ich rzeczywistej eksploatacji,
- opracowano procedurę według której można ocenić, czy wykonany jezdny test emisyjny dla pojazdu jest wiarygodny, a jednocześnie wskazano zakres spełnienia wymagań w ruchu drogowym; wprowadzono wartościowanie pojazdów w testach drogowych, na podstawie którego można zakwalifikować pojazd do opowiadającej mu klasy ekologicznej pojazdu (tzw. kategoryzacja pojazdów);
- określono wpływ zapowiadanych zmian w odniesieniu do procedury RDE (m.in. skrócenie testów emisyjnych) na wyniki emisji spalin pojazdów samochodowych, a jednocześnie zwrócono uwagę na zwiększony udział fazy zimnego rozruchu w tych testach na emisję związków szkodliwych spalin.

Realizacja zaawansowanego zagadnienia przedstawionego w punkcie 2, pozwoliła na opracowanie nowego narzędzia do ekologicznej oceny pojazdów samochodowych w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego. Obecnie, świadectwo homologacji dostarcza informacji o spełnieniu klasy ekologicznej pojazdu, ale bez uwzględnienia wartości energetycznych i emisyjnych w danej klasie ekologicznej pojazdu. Dostępne na rynku pojazdy o klasie emisyjnej Euro 6 nie są klasyfikowane pod kątem adekwatności emisji spalin i zużycia paliwa w rzeczywistych warunkach eksploatacji w odniesieniu do wartości podawanych w świadectwie homologacji.

Efektem pracy doktorskiej jest możliwość określenia adekwatności emisji związków szkodliwych w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego na podstawie klasy emisyjnej pojazdu oraz ustalenie wskaźnika (wartościowania), który ma bezpośrednie przełożenie między wynikami testu homologacyjnego a testu drogowego. Dzięki wartościowaniu pojazdów hybrydowych w testach ekologicznych, jest możliwe nie tylko określenie ich rzeczywistych aspektów ekologicznych, ale także opracowanie wytycznych, które w przyszłości będą pomocne w projektowaniu bardziej ekologicznych jednostek napędowych. Realizacja celów szczegółowych upoważnia do stwierdzenia realizacji celu głównego pracy.

## 6.2. Wnioski szczegółowe

Współczesne pojazdy z układem hybrydowym typu plug-in, wskutek znacznego postępu, zarówno technicznego, jak i eksploatacyjnego (związanego m.in. z systemami ładowania akumulatorów), stanowią konkurencję dla pojazdów napędzanych silnikami spalinowymi. Za najbardziej obiecujące rozwiązanie jednak należy obecnie traktować pojazdy z napędami całkowicie elektrycznymi. Ważnym problemem, związanym z eksploatacją współczesnych pojazdów (o różnych napędach) jest ocena zużycia energii i sprawności w warunkach rzeczywistego użytkowania pojazdów. Dla oceny badanych obiektów wpływ ma energochłonność w poszczególnych częściach testu RDE, której wartości wynoszą odpowiednio (podano wartości średnie):

- 1) dla pojazdu z silnikiem spalinowym:
  - w fazie miejskiej 33 kWh/100 km,
  - w fazie pozamiejskiej 17 kWh/100 km,
  - w fazie autostradowej 19,5 kWh/100 km,
- 2) dla pojazdu z napędem hybrydowym:
  - w fazie miejskiej 17 kWh/100 km,
  - w fazie pozamiejskiej 21 kWh/100 km,
  - w fazie autostradowej 18 kWh/100 km,
- 3) dla pojazdu elektrycznego:
  - w fazie miejskiej 12,5 kWh/100 km,
  - w fazie pozamiejskiej 17 kWh/100 km,
  - w fazie autostradowej 20,5 kWh/100 km.

Największa sumaryczna energochłonność w teście RDE (na tej samej trasie badawczej) występuje dla pojazdu zasilanego benzynowym silnikiem spalinowym (23 kWh), mniejsza o około 20% dla pojazdu z napędem hybrydowym typu plug-in (18,7 kWh), a najmniejsza dla pojazdu elektrycznego (16,5 kWh).

Analizy wykonane na podstawie badań w rzeczywistych warunkach eksploatacji pojazdów osobowych uzupełnione nową metodyką dotyczącą ich oceny pod kątem emisyjnym pozwalają sformułować ważniejsze wnioski szczegółowe:

1. W rozprawie opracowano autorską metodykę badań w warunkach drogowych, umożliwiającą dokonanie oceny i kategoryzację pod względem emisyjnym pojazdów.
2. Trasy badawcze zostały starannie dostosowane pod kątem rygorystycznych wymogów testów RDE. W procesie planowania tras uwzględniono specyfikę każdej z trzech faz testu RDE: miejskiej, pozamiejskiej i autostradowej. Dbałość o zgodność z wymogami procedury RDE gwarantuje, że badane pojazdy były

poddawane różnorodnym warunkom jazdy, od charakterystycznych dla obszarów miejskich po dynamiczne trasy autostradowe. Adaptacja tras pod kątem testów RDE miała na celu zapewnienie pełnej reprezentacji rzeczywistych warunków użytkowania pojazdów. Dzięki temu podejściu możliwe było uzyskanie wiarygodnych danych dotyczących emisji spalin w różnych scenariuszach jazdy, co jest kluczowe dla skutecznej kategoryzacji pojazdów pod względem ich wpływu na środowisko.

3. Dla kompleksowej oceny emisji spalin przeprowadzono analizy, które obejmowały weryfikację formalną testów drogowych, analizę wyników emisji spalin oraz pomiar energochłonności dla wszystkich badanych pojazdów. W pierwszym etapie, dbano o zgodność przeprowadzonych testów z ustalonymi normami i wymaganiami procedury RDE, co obejmowało formalną analizę procedur testowych oraz potwierdzenie zgodności z wymaganiami normatywnymi. Następnie, dokonano szczegółowej analizy wyników emisji spalin, koncentrując się na identyfikacji i porównaniu emisji szkodliwych związków spalin w aspekcie różnych warunków jazdy. Dodatkowo, przeprowadzono pomiary energochłonności dla każdego pojazdu, co dostarczyło informacji o efektywności energetycznej.
4. W ramach przeprowadzonych badań, opracowano procedurę określającą minimalną emisję spalin w trakcie testu drogowego. Została ona dostosowana w kontekście badań nad kategoryzacją pojazdów pod względem emisji spalin, a jej głównym celem było zapewnienie precyzyjnej oceny minimalnej emisji w warunkach drogowych. W ten sposób możliwe było zidentyfikowanie pojazdów, które osiągają najniższe poziomy emisji spalin, co stanowi kluczową informację dla dalszych analiz oraz dla oceny, w jakim stopniu spełniają one wymagania stawiane przez obecne standardy emisji. Dzięki tej wypracowanej procedurze możliwe jest bardziej kompleksowe zrozumienie i porównywanie efektywności różnych pojazdów pod względem minimalnej emisji spalin w warunkach rzeczywistych.
5. W ramach przeprowadzonych badań nad kategoryzacją pojazdów pod względem emisji spalin, zastosowano metodę okien uśrednionych. Metoda ta została wykorzystana w celu dokładnego obliczenia wyników emisji spalin. Stosując metodę MAV, możliwe było skoncentrowanie się na dynamicznych zmianach emisji w różnych warunkach jazdy, co przyczyniło się do bardziej precyzyjnego zrozumienia efektów badawczych. Wybór tej metody pozwolił na bardziej reprezentatywną ocenę emisji spalin pojazdów w trakcie różnych faz testu RDE, co stanowi istotny aspekt analizy wpływu różnych czynników na wyniki badań.
6. Podsumowując analizę emisji szkodliwych związków w spalinach pojazdów konwencjonalnych (benzynowych) i hybrydowych, można stwierdzić, że pojaz-



dy hybrydowe uzyskują istotnie niższe wyniki dla całego testu RDE. Osiągają one około 3–4-krotnie mniejsze emisje tlenku węgla i około 2–3-krotnie mniejsze emisje tlenków azotu w porównaniu do pojazdów konwencjonalnych. Warto jednak zauważyć, że ze względu na przerywany tryb pracy silników spalinych pojazdów hybrydowych, odnotowano ponad dwukrotnie większą ilość cząstek stałych w teście RDE w porównaniu do pojazdów konwencjonalnych.

7. Do oceny przyszłościowej perspektywy zmian testów homologacyjnych, przeprowadzono szczegółową analizę emisji spalin pojazdu z napędem hybrydowym, uwzględniając zarówno obecne, jak i potencjalne przyszłe testy drogowe. W ramach tego podejścia dokonano kompleksowej charakterystyki tras badawczych oraz parametrów dynamicznych testów, uwzględniając różnice między obowiązującymi a potencjalnymi przyszłymi standardami emisji. Ponadto, przeprowadzono szczegółowe porównania związków szkodliwych w spalinach pojazdu z napędem hybrydowym w zróżnicowanych warunkach testowych. Analiza ta miała na celu nie tylko zidentyfikowanie ewentualnych rozbieżności w emisji spalin pomiędzy różnymi testami drogowymi, ale także dostarczenie kompleksowej oceny wpływu testów na efektywność energetyczną i emisję związków szkodliwych. Taka analiza stanowi ważny krok w kierunku zrozumienia adaptacji pojazdów hybrydowych do obecnych i przyszłych norm emisji spalin.
8. Aspektem aplikacyjnym pracy jest opracowanie nowego narzędzia, wykorzystanego do ekologicznej oceny pojazdów samochodowych w rzeczywistych warunkach ruchu drogowego. Metodyka przedstawiona w pracy i zastosowana do pojazdów hybrydowych plug-in uwidacznia jej praktyczne zastosowanie, co jest potwierdzeniem, że opisywane pojazdy wpisują się bardzo dobrze w aspekty ekologiczne w dobie elektromobilności, co potwierdza emisyjna klasa A tych pojazdów. Podział na klasy emisyjne pojazdów hybrydowych typu plug-in można rozszerzyć – np. wprowadzając więcej klas ekologicznych. Sposób oceny ekologicznej pojazdów, choć ograniczony jedynie do emisji związków szkodliwych dla pojazdów PHEV nie jest rozwiązaniem zamkniętym.

Przedstawiona analiza predykcjna zmian testów jest aspektem użytecznym pracy. Propozycja dwóch testów, które mogą być wykorzystane w przyszłości, odpowiadają zgłaszanym postulatam dotyczącym skrócenia testów drogowych. Testy te bazują w dużej mierze na zasadach określonych w przepisach RDE (prędkości jazdy, podział faz, ich udział), a różnice wynikają głównie z charakterystyki tych testów (długości, czasu trwania). Wykorzystanie krótkich testów drogowych (o długości każdej fazy około 8 km) do oceny emisji spalin wpływa na mniejszą stabilizację termiczną silnika wszystkich składników spalin w stosunku do obecnego testu RDE, co wpływa na większe wartości:

- dwutlenku węgla o 19%,
- tlenku węgla o 37%,
- tlenków azotu o 9%,
- liczby cząstek stałych o 16%.

Zwiększona emisja związków szkodliwych we wszystkich fazach testu drogowego, pozytywnie wpływa na dokładność pomiarów, mając na uwadze bardzo małe wartości mierzonego stężenia składników spalin przez analizatory.

### 6.3. Kierunki dalszych prac

Opisane w pracy procedury i badania nie wyczerpują złożoności zagadnienia oceny ekologicznej pojazdów w drogowych testach jezdnych. Uzyskane wyniki badań motywują do realizacji dalszych prac badawczych obejmujących dalsze prace w tym zakresie:

- opracowanie metodyki kategoryzacji ekologicznej pojazdów:
  - zasilanych tylko silnikami spalinowymi na podstawie emisji spalin,
  - z napędem hybrydowym HEV oraz PHEV na podstawie emisji spalin i energochłonności,
  - zasilanych energią elektryczną lub ogniwami paliwowymi na podstawie energochłonności;
- rozwiązanie kwestii stanu naładowania akumulatorów (SOC) podczas oceny ekologicznej pojazdów (ujednoczenie lub opracowanie wskaźnika normującego w zależności od m.in. od masy pojazdu);
- badania pojazdów konwencjonalnych i hybrydowych zasilanych paliwami syntetycznymi w różnych testach drogowych;
- ocena ekologiczna pojazdów w różnych temperaturach otoczenia, w szczególności energochłonności pojazdów hybrydowych i elektrycznych.

# Literatura

1. World Health Organization. Regional Office for Europe. Air quality guidelines for Europe. WHO Regional Office for Europe **1987**, 23. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107364> (12.05.2023).
2. WHO Global Air Quality Guidelines. Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. WHO Regional Office for Europe **2021**. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329> (27.05.2023).
3. Monforti-Ferrario F., Borowiak A., Putaud J.P., Perez Ballesta P., Cavalli F., Manca G., Air Pollutants of Emerging Concern. Potential Air Pollutants and How they Could be Monitored under Future Air Quality Directives. Joint Research Centre, Official Journal European Union **2022**. <https://doi.org/10.2760/284694>.
4. European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Pathway to a Healthy Planet for All. EU Action Plan: Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil. Brussels **2021**. [https://ec.europa.eu/environment/pdf/zero-pollution-action-plan/communication\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/zero-pollution-action-plan/communication_en.pdf) (25.02.2023).
5. Parlament Europejski, Emisje CO2 z samochodów fakty i liczby (infografika) **2019**, <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20190313STO31218/emisje-co2-z-samochodow-fakty-i-liczby-infografika> (19.04.2023).
6. Fuel types of new passenger cars in the EU – ACEA – European Automobile Manufacturers' Association **2023**. <https://www.acea.auto/figure/fuel-types-of-new-passenger-cars-in-eu/> (12.03.2023).
7. Raport Branży Motoryzacyjnej PZPM i KPMG 2022/2023. Polski Związek Przemysłu Motoryzacyjnego **2023**, <https://www.pzpm.org.pl/pl/Publikacje/Raporty/Rocznik-Raport-Branzy-Motoryzacyjnej-PZPM-i-KPMG-2022-2023> (15.03.2023).
8. Wzrost produkcji samochodów w Polsce. Dobrze sprzedaje się segment premium, **2023**. <https://polskieradio24.pl/42/273/artykul/3115091,wzrost-produkcji-samochodow-w-polsce-dobrze-sprzedaje-sie-segment-premium> (5.04.2023).
9. Modi S., Bhattacharya J., Basak P., Estimation of Energy Consumption of Electric Vehicles using Deep Convolutional Neural Network to Reduce Driver's Range Anxiety. Elsevier, ISA Transactions **2020**, 98, 454-470. <https://doi:10.1016/j.isatra.2019.08.055>.
10. Bach M., Silnik spalinowy jeszcze pożyje – analiza **2023**. <https://magazynauto.pl/wiadomosci/silnik-spalinowy-jeszcze-pozyje-analiza,aid,2761> (6.06.2023).
11. Oficjalna strona Parlamentu Europejskiego, Unijny zakaz sprzedaży nowych samochodów spalinowych od 2035 r. - co to oznacza?, **2023**. <https://www.europarl.europa.eu/> (dostęp 22.05.2023).

12. Boretti, A., Plug-in hybrid electric vehicles are better than battery electric vehicles to reduce CO<sub>2</sub> emissions until 2030. *Energy Research*, **2022**. <https://doi.org/10.1002/er.8313>
13. Holland S., Mansur E., Muller Z., Yates J., Why electric cars aren't always environmentally sound. *Environmental Science* **2017**.
14. Ajanovic A., Promoting Environmentally Benign Electric Vehicles. *Energy Procedia* **2014**, 57, 807-816. doi: <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.10.289>
15. Lodi C., Serra S., Currò D., Gil-Sayas S., Marotta A., Bonnel P., Riemersma I., Eco-Innovative Technologies Reducing CO<sub>2</sub> Emissions of Light-Duty Vehicles: Evaluation of Interactions. Joint Research Centre, Official Journal European Union **2022**. <https://doi.org/10.2760/258688>.
16. Ktistakis M.A., Pavlovic J., Fontaras G., Sampling Approaches for Road Vehicle Fuel Consumption Monitoring. European Commission, Joint Research Centre, Official Journal European Union **2021**. <https://doi.org/10.2760/39369>.
17. Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO<sub>2</sub> emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011. Official Journal European Union **2019**. <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/631/oj> (20.01.2023).
18. Rodríguez Quintero R., Vidal-Abarca Garrido C., Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Road Transport: Technical Report and Criteria Proposal. Joint Research Centre, Official Journal European Union **2022**. <https://doi.org/10.2760/030068>.
19. Samaras Z., Study on Post-EURO 6/VI Emission Standards in Europe (Part A). Update on the Draft Deliverables. Presentation to the Advisory Group on Vehicle Emission Standards (AGVES). Brussels **2020**. [https://circabc.europa.eu/sd/a/a108e064-c487-4bf6-bb46-7faac76f8205/Post-EURO%206%20WT2.2\\_AGVES\\_2019\\_10\\_18%20V4.pdf](https://circabc.europa.eu/sd/a/a108e064-c487-4bf6-bb46-7faac76f8205/Post-EURO%206%20WT2.2_AGVES_2019_10_18%20V4.pdf) (25.05.2023).
20. Commission Regulation (EU) 2017/1151 of 1 June 2017 supplementing Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information, amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EC) No 692/2008 and Commission Regulation (EU) No 1230/2012 and repealing Commission Regulation (EC) No 692/2008. Official Journal European Union **2017**, L 175. <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/1151/oj> (12.05.2023).
21. Zardini A., Bonnel P., Real Driving Emissions Regulation : European Methodology to Fine Tune the EU Real Driving Emissions Data Evaluation Method. Joint Research Centre, Official Journal European Union **2020**. <https://doi.org/10.2760/176284>.
22. Gis M., Assessment of Exhaust Emissions from Vehicles in Real Traffic Conditions. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science **2019**, 214, 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012035>.

23. Du B., Zhang L., Geng Y., Zhang Y., Xu H., Xiang G., Testing and Evaluation of Cold-Start Emissions in a Real Driving Emissions Test. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **2020**, 86, 102447. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2020.102447>.
24. Gioria R., Martini G., Perujo Mateos Del Parque A., Giechaskiel B., Carriero M., Zappia A., Cadario M., Forloni F., Lähde T., Selleri T., Terenghi R., Bissi L.M., Assessment of On-Road Emissions of Refuse Collection Vehicles: Diesel and Compressed Natural Gas. Joint Research Centre, Official Journal European Union **2020**. <https://doi.org/10.2760/622589>.
25. Bernard Y., Current Situation and Perspectives on Vehicles Real-World Emissions. Bruxelles Environnement – Colloque de Présentation de La Fin de La Consultation Sur La Sortie Des Moteurs Thermiques. The International Council on Clean transportation **2019**. [https://environnement.brussels/sites/default/files/user\\_files/pres\\_20190423\\_colloquesortiethermique\\_icct.pdf](https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/pres_20190423_colloquesortiethermique_icct.pdf) (15.01.2023).
26. Yang Z., Liu Y., Wu L., Martinet S., Zhang Y., Andre M., Mao H., Real-World Gaseous Emission Characteristics of Euro 6b Light-Duty Gasoline- and Diesel-Fueled Vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **2020**, 78, 102215. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2019.102215>.
27. Commission Regulation (EU) 2016/427 of 10 March 2016 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6). Official Journal European Union **2016**. <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/427/oj> (17.05.2023).
28. Commission Regulation (EU) 2016/646 of 20 April 2016 amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6). Official Journal European Union **2016**. <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/646/oj> (19.05.2023).
29. Commission Regulation (EU) 2018/1832 of 5 November 2018 amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EC) No 692/2008 and Commission Regulation (EU) 2017/1151 for the purpose of improving the emission type approval tests and procedures for light passenger and commercial vehicles, including those for in-service conformity and real-driving emissions and introducing devices for monitoring the consumption of fuel and electric energy. Official Journal European Union **2018**. <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1832/oj> (25.05.2023).
30. EU TCMV Approves Euro 6e Amendments. DieselNet.com **2022**. <https://dieselnet.com/news/2022/08tcmv.php> (25.04.2023).
31. Giechaskiel B., Valverde V., Clairotte M., Real Driving Emissions (RDE): 2020 Assessment of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) Measurement Uncertainty. Joint Research Centre, Official Journal European Union **2021**. <https://doi.org/10.2760/440720>.
32. Wang Y., Ge Y., Wang J., Wang X., Yin H., Hao L., Tan J., Impact of Altitude on The Real Driving Emission (RDE) Results Calculated in Accordance to Moving Averaging

- Window (MAW) Method. Fuel **2020**, 277, 117929. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117929>.
33. Mera Z., Fonseca N., López J.M., Casanova J., Analysis of the High Instantaneous NOx Emissions from Euro 6 Diesel Passenger Cars under Real Driving Conditions. Applied Energy **2019**, 242, 1074-1089. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.120>.
34. Claßen J., Krysmon S., Dorscheidt F., Sterlepper S., Pischinger S., Real Driving Emission Calibration – Review of Current Validation Methods against the Background of Future Emission Legislation. Applied Science **2021**, 11, 5429. <https://doi.org/10.3390/app11125429>.
35. Demuynck J., Advanced Emission Controls and Renewable Fuels for Low Pollutants and Lifecycle CO<sub>2</sub> Emissions. Sustainable Internal Combustion Engine Virtual ‘Live’, AECC Presentation **2021**, 210204. <https://www.aecc.eu/wp-content/uploads/2021/02/210204-AECC-presentation-sustainable-ICE-conference-final.pdf> (20.05.2023).
36. Winkler S.L., Anderson J.E., Garza L., Ruona W.C., Vogt R., Wallington T.J., Vehicle Criteria Pollutant (PM, NOx, CO, HCs) Emissions: How Low Should We Go? Climate and Atmospheric Science **2018**, 1, 26. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0037-5>.
37. Noralm Z., Implementing a Method for Conducting Real Driving Emission (RDE). KTH Skolan För Industriell Teknik Och Management. Sverige 2018. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1212016/FULLTEXT02> (10.02.2023).
38. Wang X., Thomas D., Ge Y., Yu W., Song B., Xu X., Zheng S., Yang Z., Su S., Gong H., Yuan S., He H., Xi J., Fu B., Yin H., Chen W., Li H., Proceedings of Real Driving Emission (RDE) Measurement in China. SAE Technical Paper **2018**, 2018-01-0653. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0653>.
39. Suarez-Bertoa R., Valverde V., Clairotte M., Pavlovic J., Giechaskiel B., Franco V., Kregar Z., Astorga C., On-Road Emissions of Passenger Cars beyond the Boundary Conditions of the Real-Driving Emissions Test. Environmental Research **2019**, 176, 108572. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108572>.
40. Prati M.V., Costagliola M.A., Giuzio R., Corsetti C., Beatrice C., Emissions and Energy Consumption of a Plug-in Hybrid Passenger Car in Real Driving Emission (RDE) Test. Transportation Engineering **2021**, 4, 100069. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100069>.
41. Pignatta G., Balazadeh N., Hybrid Vehicles as a Transition for Full E-Mobility Achievement in Positive Energy Districts: A Comparative Assessment of Real-Driving Emissions. Energies **2022**, 15, 2760. <https://doi.org/10.3390/en15082760>.
42. Šarkan, B.; Jaśkiewicz, M.; Kubiak, P.; Tarnapowicz, D.; Loman, M. Exhaust Emissions Measurement of a Vehicle with Retrofitted LPG System. Energies **2022**, 15, 1184. <https://doi.org/10.3390/en15031184>.
43. Valverde V., Mora B.A., Clairotte M., Pavlovic J., Suarez-Bertoa R., Giechaskiel B., Astorga-Llorens C., Fontaras G., Emission Factors Derived from 13 Euro 6b Light-Duty Ve-

- icles Based on Laboratory and On-Road Measurements. *Atmosphere* **2019**, 10, 243. <https://doi.org/10.3390/atmos10050243>.
44. Pavlovic J., Fontaras G., Ktistakis M., Anagnostopoulos K., Komnos D., Ciuffo B., Clairotte M., Valverde V., Understanding the Origins and Variability of the Fuel Consumption Gap: Lessons Learned from Laboratory Tests and a Real-Driving Campaign. *Environmental Sciences Europe*, **2020**, 32-53. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00338-1>.
  45. Dandan H., Jiaqiang E., Yuanwang D., Jingwei C., Erwei L., Gaoliang L., Xiaohuan Z., Changling F., Feng Z., A Review of Studies using Hydrocarbon Adsorption Material for Reducing Hydrocarbon Emissions from Cold Start Of Gasoline Engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2021**, 135, 110079. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110079>.
  46. Pielecha J., Merkisz J., Kurtyka K., Skobiej K., Cold Start Emissions of Passenger Cars with Gasoline and Diesel Engines in Real Driving Emissions Tests. *Combustion Engines* **2019**, 179, 4, 160-168. <https://doi.org/10.19206/CE-2019-427>.
  47. Hooftman N., Messagie M., Van Mierlo J., Coosemans T., A Review of the European Passenger Car Regulations – Real Driving Emissions vs Local Air Quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2018**, 86, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.012>.
  48. Figenbaum E., Weber C., Estimating Real-World Emissions of PHEVs in Norway by Combining Laboratory Measurement with User Surveys. *World Electric Vehicle Journal* **2018**, 9, 31. <https://doi.org/10.3390/wevj9020031>.
  49. Burski Z., Mijalska-Szewczak I., Wasilewski J., Szczepanik M., Evaluation of Energy Consumption of Vehicles in EU Trans-European Transport Network. *Transportation Research Part A, Policy and Practice* **2016**, 92, 120-130. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.07.008>.
  50. Basso R., Kulcsár B., Egardt B., Lindroth P., Sanchez-Diaz I., Energy Consumption Estimation Integrated into the Electric Vehicle Routing Problem. Elsevier, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **2019**, 69, 141-167. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.01.006>.
  51. Qi X., Wu G., Boriboonsomsinb K., Barth M., Data-driven Decomposition Analysis and Estimation of Link-level Electric Vehicle Energy Consumption under real-World Traffic Conditions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **2018**, 64, 36-52. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.08.008>.
  52. Hu K., Wu J., Schwanen T., Differences in Energy Consumption in Electric Vehicles: an Exploratory Real-World Study in Beijing Hindawi. *Journal of Advanced Transportation* **2017**, Article ID 4695975. <https://doi.org/10.1155/2017/4695975>.
  53. Noura N., Erradi I., Desrevaux A., Bouscayrol A., Comparison of the Energy Consumption of a Diesel Car and an Electric Car. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Chicago, IL, **2018**, 1-6. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2018.8605020>.

54. Lasdon L.S., Waren A.D., Jain A., Ratner M., Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. *ACM Transactions on Mathematical Software* **1978**, 4(1), 34–50. <https://doi.org/10.1145/355769.355773>.
55. Commission Regulation (EC) 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. *Official Journal European Union* **2007**. <http://data.europa.eu/eli/reg/2007/715/oj> (12.01.2023).
56. Commission Regulation (EC) 692/2008 of 18 July 2008 implementing and amending Regulation (EC) 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information, European Commission (EC), *Official Journal European Union* **2008**. <http://data.europa.eu/eli/reg/2008/692/oj> (accessed on 12.01.2023).
57. Commission Regulation (EU) 2017/1154 of 7 June 2017 amending Regulation (EU) 2017/1151 supplementing Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information, amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EC) No 692/2008 and Commission Regulation (EU) No 1230/2012 and repealing Regulation (EC) No 692/2008 and Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council as regards real-driving emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6). *Official Journal European Union* **2017**. <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/1154/oj> (22.02.2023).
58. Pielecha J., Andrych-Zalewska M., Skobiej K., The Impact of using an In-Cylinder Catalyst on the Exhaust Gas Emission in Real Driving Conditions Tests of a Diesel Engine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **2018**, 421, 042064. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/421/4/042064>.
59. Gebisa A., Gebresenbet G., Gopal R., Nallamothu R.B., Driving Cycles for Estimating Vehicle Emission Levels and Energy Consumption. *Future Transportation* **2021**, 1, 615–638. <https://doi.org/10.3390/futuretransp1030033>.
60. Rosenblatt D., Winther K., Petri S., Lindgren M., Bütler T., Czerwinski J., Duoba M., Wallner T., A Report from the Advanced Motor Fuels Technology Collaboration Programme: Real Driving Emissions and Fuel Consumption. *Technology Collaboration Programme on Advanced Motor Fuels* **2019**. [https://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF\\_Annex\\_55.pdf](https://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF_Annex_55.pdf) (13.02.2023).
61. Giechaskiel B., Valverde V., Kontses A., Suarez-Bertoa R., Selleri T., Melas A., Otura M., Ferrarese C., Martini G., Balazs A., Andersson J., Samaras Z., Dilara P., Effect of Extreme Temperatures and Driving Conditions on Gaseous Pollutants of a Euro 6d-Temp Gasoline Vehicle. *Atmosphere* **2021**, 12, 1011. <https://doi.org/10.3390/atmos12081011>.



62. Ehrenberger S.I., Qiao J., Konrad M., Philipps F., Analysis of Tail-Pipe Emissions of a Plug-in Hybrid Vehicle and Its Average Emissions for Different Test Cycles. In 22rd International Transport and Air Pollution Conference, Zürich, Switzerland 15–16.11.2017. [https://elib.dlr.de/116955/1/TAP2017\\_Ehrenberger.pdf](https://elib.dlr.de/116955/1/TAP2017_Ehrenberger.pdf) (11.05.2022).
63. Lujan J.M., Piqueras P., de la Morena J., Redondo F., Experimental Characterization of Real Driving Cycles in a Light-Duty Diesel Engine under Different Dynamic Conditions. *Applied Science* **2022**, 12, 2472. <https://doi.org/10.3390/app12052472>.
64. Lejda K., Jaworski A., Savostin-Kosiak D., Mądziel M., Balawender K., Ustrzycki A., Assessment of Petrol and Natural Gas Vehicle Carbon Oxides Emissions in the Laboratory and On-Road Tests. *Energies* **2021**, 14(6), 1631. <https://doi.org/10.3390/en14061631>.
65. Suarez-Bertoa R., Pechout M., Vojtišek M., Astorga C., Regulated and Non-Regulated Emissions from Euro 6 Diesel, Gasoline and CNG Vehicles under Real-World Driving Conditions. *Atmosphere* **2020**, 11, 204. <https://doi.org/10.3390/atmos11020204>.
66. Roberts P.J., Mumby R., Mason A., Redford-Knight L., Kaur P., RDE plus – the Development of a Road, Rig and Engine-in-the-Loop Test Methodology for Real Driving Emissions Compliance. *SAE Technical Papers* **2019**, 2019-01-0756. <https://doi.org/10.4271/2019-01-0756>.
67. Kurtyka K., Pielecha J., The Evaluation of Exhaust Emission in RDE Tests Including Dynamic Driving Conditions. *Transportation Research Procedia* **2019**, 40, 338-345. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.050>.
68. Wang Y., Yin H., Wang J., Hao C., Xu X., Wang Y., Yang Z., Hao L., Tan J., Wang X., Ge Y., China 6 Moving Average Window Method for Real Driving Emission Evaluation: Challenges, Causes, and Impacts. *Journal of Environmental Manage* **2022**, 319, 115737. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115737>.
69. Du B., Zhang L., Geng Y., Zhang Y., Xu H., Xiang G., Testing and Evaluation of Cold-Start Emissions in a Real Driving Emissions Test. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **2020**, 86, 102447. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2020.102447>.
70. Suttakul P., Fongsamootr T., Wongsapai W., Mona Y., Poolsawat K., Energy Consumptions and CO<sub>2</sub> Emissions of Different Powertrains under Real-World Driving with Various Route Characteristics. *Energy Reports* **2022**, 8, 554–561. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.216>.
71. Skobiej K., Pielecha J., Plug-in Hybrid Ecological Category in Real Driving Emissions. *Energies* **2021**, 14, 2340. <https://doi.org/10.3390/en14082340>.
72. Pielecha J., Skobiej K., Kurtyka K., Exhaust Emissions and Energy Consumption Analysis of Conventional, Hybrid, and Electric Vehicles in Real Driving Cycles. *Energies* **2020**, 13, 6423. <https://doi.org/10.3390/en13236423>.

73. Akard M., Gramlich N., Nevius T., Porter S., Comparison of Real-World Urban Driving Route PEMS Fuel Economy with Chassis Dynamometer CVS Results. SAE Technical Papers **2019**, 2019-01-0762. <https://doi.org/10.4271/2019-01-0762>.
  74. Skobiej K., Pielecha J., Analysis of the Exhaust Emissions of Hybrid Vehicles for the Current and Future RDE Driving Cycle. *Energies*. **2022**; 15, 8691. <https://doi.org/10.3390/en15228691>.
  75. Bodisco T., Zare A., Practicalities and Driving Dynamics of a Real Driving Emissions (RDE) Euro 6 Regulation Homologation Test. *Energies* **2019**, 12, 2306. <https://doi.org/10.3390/en12122306>.
  76. Kadijk G., Vermeulen R., Buskermolen E., Elstgeest M., van Heesen D., Heijne V., Ligtterink N., van der Mark P., NOx Emissions of Eighteen Diesel Light Commercial Vehicles: Results of the Dutch Light-Duty Road Vehicle Emission Testing Programme **2017**. TNO 2017, R11473. <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/blg-850339.pdf> (5.04.2023).
  77. Ziólkowski A., Daszkiewicz P., Rymaniak Ł., Fuć P., Ukleja P., Analysis of the Exhaust Emissions from Hybrid Vehicle during RDE Test. MATEC Web Conference **2019**, 294, 02002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929402002>.
  78. Sokolnicka B., Fuć P., Szymlet N., Siedlecki M., Grzeszczyk R., Harmful Exhaust Components and Particles Mass and Number Emission during the Actual Drive of a Passenger Car in Accordance with the RDE Procedure. *Combustion Engines* **2019**, 178, 198-202. <https://doi.org/10.19206/ce-2019-334>.
  79. Selleri T., Melas A., Ferrarese C., Franzetti J., Giechaskiel B., Suarez-Bertoa R., Emissions from a Modern Euro 6d Diesel Plug-In Hybrid. *Atmosphere* **2022**, 13, 1175. <https://doi.org/10.3390/atmos13081175>.
  80. Soo Yu Y., Soo Chon M., Cha J., Evaluation of Real Driving Emissions with Acting Regulations (3rd and 4th RDE Packages) in Korea. *Alexandria Engineering Journal* **2022**, 61, 9471-9484. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.03.025>.
  81. Wang Y., Hao C., Ge Y., Hao L., Tan J., Wang X., Zhang P., Wang Y., Tian W., Lin Z., Li J., Fuel Consumption and Emission Performance from Light-Duty Conventional/Hybrid-Electric Vehicles over Different Cycles and Real Driving Tests. *Fuel* **2020**, 278, 118340. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118340>.
- [A] Oficjalna strona Parlamentu Europejskiego, Unijny zakaz sprzedaży nowych samochodów spalinowych od 2035 r. - co to oznacza?, **2023**. <https://www.europarl.europa.eu/> (dostęp 22.09.2023).
- [B] Boretti, A., Plug-in hybrid electric vehicles are better than battery electric vehicles to reduce CO2 emissions until 2030. *Energy Research*, **2022**. <https://doi.org/10.1002/er.8313>
- [C] Holland S., Mansur E., Muller Z., Yates J., Why electric cars aren't always environmentally sound. *Environmental Science* **2017**. doi: 10.5604/01.3001.0013.7469.

- 
- [D] Ajanovic A., Promoting Environmentally Benign Electric Vehicles. Energy Procedia **2014**, 57, 807-816. doi: <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.10.289>