

# Emisja masy i liczby cząstek stałych z pojazdu hybrydowego w teście RDE

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2019.165

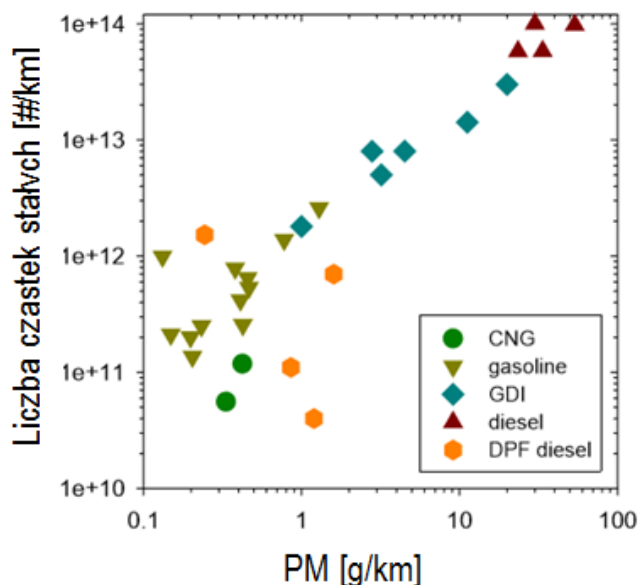
Data zgłoszenia: 05.04.2019 Data akceptacji: 26.06.2019

Przedmiotem niniejszego artykułu jest analiza drogowej emisji liczby oraz masy cząstek stałych w rzeczywistych warunkach eksploatacji z pojazdu hybrydowego. Co więcej, analizie poddano również warunki pracy badanego pojazdu oraz silnika. W tym celu wykonane zostały badania emisji cząstek stałych i parametrów eksploatacyjnych z lekkiego pojazdu samochodowego z napędem hybrydowym, wyposażonego w 104 kW silnik o objętości skokowej 1,58 dm<sup>3</sup>. Badania przeprowadzono w rzeczywistych warunkach ruchu, przestrzegając procedury RDE (Real Driving Emission). Test wykonano na obszarze aglomeracji poznańskiej, trasa obejmowała drogi o różnych dopuszczalnych prędkościach. Do badań wykorzystano mobilną aparaturę, należącą do grupy PEMS (Portable Emissions Measurement System), w skład której wchodziły takie urządzenia jak: SEMTECH DS., AVL MSS (Micro Soot Sensor) oraz EEPS 3090 (Engine Exhaust Particle Sizer). Uzyskane wyniki zostały odniesione do wartości dopuszczalnych emisji zgodnie ze standardem EURO 6.

**Słowa kluczowe:** silniki spalinowe, pojazd hybrydowy, test RDE, emisja cząstek, PEMS.

## Wstęp

Rozwój motoryzacji, który do niedawna ukierunkowany był w głównej mierze na poprawę parametrów użytkowych pojazdów, w ostatnich dekadach został spowolniony. Główną przyczyną takiego trendu są działania, mające na celu zmniejszenie negatywnego oddziaływania motoryzacji na środowisko. Spowodowane jest to większą świadomością społeczeństwa w zakresie wpływu zanieczyszczeń za zdrowie organizmów żywych, która jest kształtowana przez powszechnie dostępne publikacje, jak np. raport WHO dotyczący kancerogennego działania spalin z silników o zapłonie samoczynnym, które zawierają cząstki stałe [10]. Kolejny czynnik mający wpływ na rozwój motoryzacji, to próba ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, a w szczególności CO<sub>2</sub>, które można osiągnąć np. przez ograniczenie zużycia paliw kopalnych [2]. W celu zmniejszenia emisji związków toksycznych oraz zmniejszenia zużycia paliwa, dokonuje się modyfikacji silników spalinowych oraz całych układów napędowych. Wadą silników o zapłonie samoczynnym jest duża emisja cząstek stałych oraz tlenków azotu, z kolei silników o zapłonie iskrowym – większe zużycie paliwa wynikające z mniejszej sprawności. Konstruktorzy w celu zwiększenia sprawności silników o zapłonie iskrowym zastosowali m.in. wtrysk bezpośredni benzyny oraz strategie spalania mieszanek uwarstwionych, czego efektem ubocznym jest większa emisja cząstek stałych (rys. 1). Ze względu na charakter pracy jednostek ZI oraz lżejsze frakcje węglowodorów w paliwie, cząstki stałe emitowane przez tego typu jednostki mają bardzo małe średnice, które są szczególnie niebezpieczne dla organizmów żywych [6]. Uwarunkowania te przyczyniły się do konieczności wprowadzenia pomiaru emisji cząstek stałych również w zakresie liczbowym.



Rys. 1. Emisja cząstek stałych z pojazdów napędzanych silnikami spalinowymi, wykorzystującymi różne systemy zasilania [4]

Przemysł motoryzacyjny oraz przedstawiciele władz publicznych lobbują pojazdy elektryczne, które nie emitują zanieczyszczeń w miejscu eksploatacji, jednak są bardzo drogie w zakupie oraz ich eksploatacja jest utrudniona ze względu na długi czas ładowania akumulatorów i często ograniczony zasięg. Przy obecnym stanie rozwoju techniki, preferowany jest napęd hybrydowy, który szczególnie w ruchu miejskim umożliwia znaczące zmniejszenie zużycia paliwa. Główną zaletą tego typu napędu jest wykorzystanie silnika elektrycznego, który podczas ruszania oraz przyspieszania częściowo lub całkowicie zastępuje silnik spalinowy. Umożliwia to ograniczenie zakresu pracy silnika spalinowego do punktów pracy o jak największej sprawności. Z kolei podczas hamowania część energii, która w tradycyjnych pojazdach jest tracona, może zostać odzyskana i zmagazynowana w akumulatorach.

W ramach prac przeprowadzonych w artykule przebadano pojazd hybrydowy zgodnie z metodyką RDE (ang. *Real Driving Emission*) aspekcie liczby i masy cząstek stałych [1,3,9]. Jest on wyposażony w równoległy układ hybrydowy, w którym silnik działa cyklicznie. Takie działanie może spowodować problemy z dograniem pozasilnikowych układów oczyszczania spalin i w efekcie zwiększyć emisję składników toksycznych, w tym cząstek stałych w zakresie masy i liczby, gdyż silnik wyposażony jest w bezpośredni wtrysk paliwa do komory spalania. Wyniki emisji drogowej uzyskane poprzez zastosowanie aparatury PEMS (ang. *Portable Emission Measurement System*) porównano z normą homologacyjną w zakresie emisji związków toksycznych spalin.

## 2. Metodologia badawcza

### 2.1. Obiekt badawczy

Obiekt badawczy stanowił hybrydowy samochód osobowy, wyposażony w silnik o zapłonie iskrowym o mocy 104 kW i objętości

skokowej 1,58 dm<sup>3</sup>. Silnik zasilany jest układem paliwowym z bezpośrednim wtryskiem. Synchroniczny silnik elektryczny z magnesami stałymi pojazdu charakteryzuje się maksymalną mocą 32 kW przy 170 Nm momentu obrotowego. Pojazd wyprodukowano w 2107 roku, a więc był homologowany zgodnie z normą EURO 6. Rysunek 2 przedstawia obiekt badawczy wraz z aparaturą pomiarową.



Rys. 2. Obiekt badawczy wraz z aparaturą pomiarową

### 2.2. Aparatura badawcza

Pomiar emisji liczby i masy cząstek stałych, zużycia paliwa oraz parametrów pracy silnika przeprowadzono za pomocą mobilnych aparatur z grupy PEMS (ang. *Portable Emissions Measurement System*) [5].

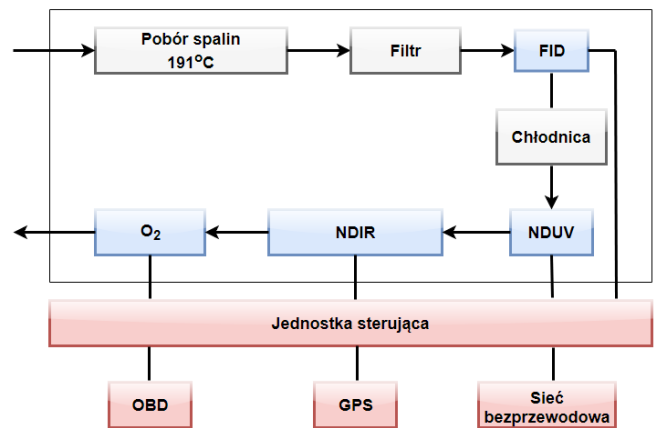
Aparaturą SEMTECH DS. (Rys. 3) dokonano pomiaru przepływu spalin oraz parametrów pracy silnika i pojazdu za pośrednictwem komunikacji z OBD (ang. *On-Board Diagnostics*).



Rys. 3. Widok aparatury SEMTECH DS

Urządzenie to służy przede wszystkim do pomiaru emisji szkodliwych związków gazowych spalin takich jak: HC, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> oraz tlenu. Celem wyznaczenia poszczególnych związków gazów wylotowych, próbka spalin pobierana z sondy masowego natężenia przepływu gazów musi przejść przez szereg analizatorów. Jednakże w pierwszej kolejności próbka poddawana jest filtracji, co ma na celu odseparowanie cząstek stałych. Pierwszym analizatorem, do którego trafia badana próbka jest analizator FID (ang. *Flame Ionization Detector*), umożliwiający wyznaczenie emisji węglowodorów. Po schłodzeniu spalin do około 4°C, próbka transportowana jest do analizatora NDUV (ang. *Non-dyspersive Detector Ultra Fiolet*), który wyznacza tlenki azotu. Zawartość tlenu oraz dwutlenku węgla określa się za pomocą analizatora NDIR (ang. *Non-dyspersive Detector Infrared*). W ostatnim etapie próbka trafia do analizatora elektrochemicznego, gdzie następuje pomiar tlenu. Ostatnim krokiem jest pomiar ilości tlenu (O<sub>2</sub>). Pojazd pozycjonowany jest dzięki i zsynchronizowaniu systemu GPS z analizatorem. Aparatura umożli-

wia także połączenie z siecią WLAN oraz komunikację z OBD (Rys 4.) [10].



Rys. 4. Zasada działania aparatury SEMTECH DS.

Pomiar masy cząstek stałych umożliwił natomiast mobilny analizator MSS (ang. *Micro Soot Sensor*) firmy AVL (Rys. 5), oparty na metodzie PAAS (Photo Acoustic Soot Sensor). W metodzie tej cząstki stałe poddawane są promieniowaniu światłem modulowanym, czego wynikiem jest ich okresowe nagrzewanie i chłodzenie się. Prowadzi to do zmian objętości badanego gazu nośnego, działając jak fala dźwiękowa. W pomiarze wykorzystywane są mikrofony czułe na drgania tylko w pewnym zakresie częstotliwości i amplitud. Gdy powietrze jest czyste, nie jest wykrywany żaden sygnał, natomiast podczas zwiększania liczby cząstek stałych sadzy w gazie (wzrost stężenia) zwiększa się wartość sygnału dźwiękowego. W celu uniknięcia powstania kondensatu sadzy spaliny są rozcieńczane [11]



Rys. 5. Widok aparatury AVL MSS

Pomiaru liczby cząstek stałych dokonano za pomocą urządzenia TSI EEPS 3090 (ang. *Engine Exhaust Particle Sizer*) (Rys. 6). Aparatura ta umożliwia na pomiar dyskretnego zakresu średnic cząstek od 5,6 nm do 560 nm. Pomiar ten jest możliwy dzięki zjawisku zróżnicowanych prędkościach poruszania się cząstek różnych wielkości. Próbkę spalin kierowana jest do spektrometru masowego za pośrednictwem układu rozcieńczającego oraz układu utrzymującego odpowiednią temperaturę. Cząstki stałe o średnicach większych niż 1µm zatrzymywane są przez filtr wstępny. Następnie badane cząstki stałe kierowane są na elektrodę ładującą, gdzie następuje ich klasyfikacja pod względem wielkości. Następnie wysokonapięciowa elektroda odpycha cząstki, które trafiają na szczelną pomiędzy dwoma cylindrami. Pole elektryczne występujące w

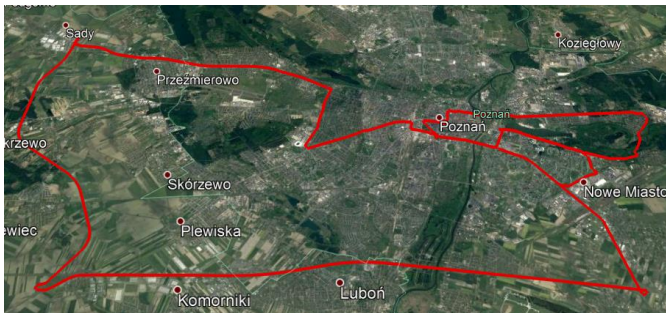
szczeliny powoduje cząstek do elektrody naładowanej dodatnio do elektrod zewnętrznych. Uderzenia cząstek o elektrody powodują wytworzenie prądu, który odczytywany jest przez układ przetwarzający [14].



Rys. 6. Widok aparatury TSI EEPS 3090

### 2.3. Trasa badawcza

Badania przeprowadzono na terenie aglomeracji poznańskiej, a trasa badawcza została ułożona zgodnie z procedurą RDE (Rys. 7). Zaplanowana trasa przejazdu musi zapewnić ciągłość danych podlegających rejestracji, minimalny czas niezbędny do przeprowadzenia prawidłowego badania oraz brak przerw podczas jazdy. Co więcej, trasa taka musi się składać z trzech cykli: cyklu miejskiego, cyklu pozamiejskiego oraz cyklu autostradowego. Cykle definiowane są na podstawie odpowiednich prędkości pojazdu: miejski < 60 km/h, pozamiejski 60-90 km/h, autostradowy > 90 km/h., a każdy z nich musi stanowić 33% całego dystansu. Minimalna długość trasy musi przekraczać 48 km. Badania RDE należy przeprowadzać w dni robocze na drogach charakteryzujących się określonym utwardzeniem, a czas trwania testu musi zawierać się w przedziale 90-120 minut.



Rys. 6. Widok aparatury TSI EEPS 3090 [12]

## 3. Wyniki badań

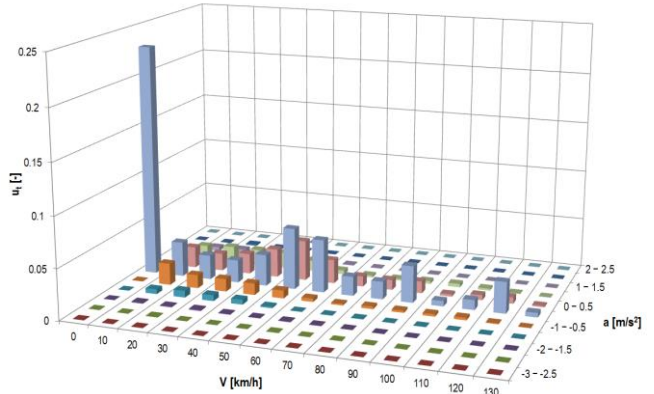
### 3.1. Analiza parametrów pracy pojazdu

Dane uzyskane podczas wykonywania testu w rzeczywistych warunkach eksploatacji na terenie aglomeracji poznańskiej pozwoliły na wykreślenie charakterystyki udziału czasu pracy pojazdu. Charakterystyka ta stanowi graficzne przedstawienie udziału czasu pracy (w odniesieniu do czasu trwania całego testu) dla poszczególnych przedziałów prędkości pojazdu oraz przyspieszeń. W tabeli 1 przedstawiono dane dotyczące przejazdu w teście RDE.

Tab. 1. Dane dotyczące przejazdu w teście RDE [5]

Dystans [km]	74
Czas trwania testu [s]	7592
Średnia prędkość [km/h]	35,1
Średnie przyspieszenie [m/s <sup>2</sup> ]	0,462
Średnie hamowanie [m/s <sup>2</sup> ]	0,473

Na podstawie uzyskanych zależności stwierdzono, że badany pojazd pracował najczęściej w obszarze prędkości 0-10 km/h oraz przyspieszeń w zakresie -0,5-0, 5 m/s<sup>2</sup> (rys 7.).

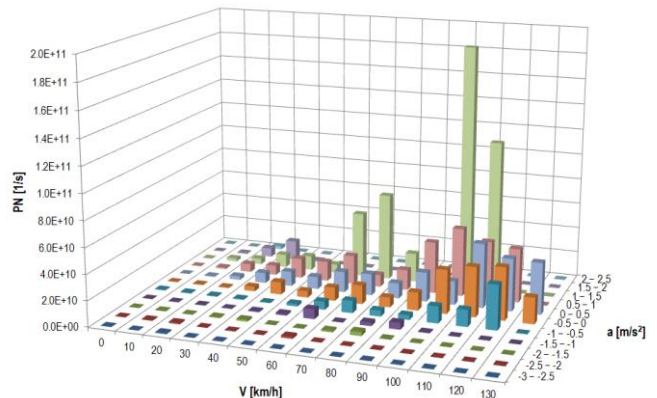


Rys. 7. Charakterystyka gęstości czasu pracy badanego pojazdu

Udział czasu pracy w tym obszarze wyniósł prawie 30%. Znaczący udział czasu pracy miał również zakres prędkości 30-50 km/h dla przyspieszeń w przedziale -1-1 m/s<sup>2</sup>, który wyniósł 21%. Potwierdza to również wartość średniej prędkości pojazdu, wynosząca 35,1 km/h.

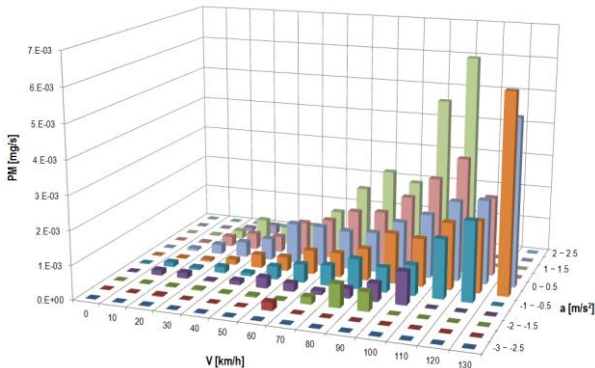
### 3.2. Analiza wskaźników ekologicznych silnika

Charakterystyki ekologiczności badanego obiektu, podobnie jak w przypadku charakterystyki udziału czasu pracy przedstawiono w funkcji prędkości pojazdu oraz jego przyspieszeń podczas testu. Wpływ parametrów pracy pojazdu na wskaźniki ekologiczne wyznaczono dla limitowanych normą Euro 6 cząstek stałych, zarówno w zakresie ich masy jak i liczby. Sekundowa emisja liczby cząstek stałych jest zależna zarówno od prędkości pojazdu jak i jego przyspieszeń. Jej najwyższą wartość, wynoszącą 1,89e11 zarejestrowano dla prędkości 90-100 km/h oraz przyspieszeń z z zakresu 1-1,5 m/s<sup>2</sup>, a więc dla pracy silnika przy największym obciążeniu (Rys. 8).



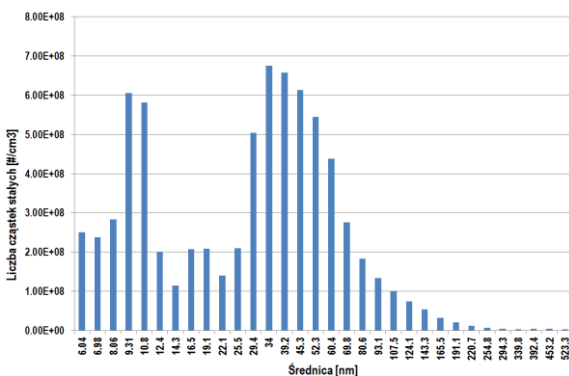
Rys. 8. Sekundowa emisja liczby cząstek stałych w przedziałach prędkości pojazdu oraz jego przyspieszeń

Charakterystyka sekundowej emisji masy cząstek stałych w funkcji prędkości pojazdu oraz jego przyspieszeń (rys. 9) wykazała, iż największe wartości emisji cząstek stałych pod względem masowym przypadły na obszar dużych przyspieszeń 0–1,5 m/s<sup>2</sup> w całym zakresie prędkości pojazdu. Najwyższą wartość emisji masy cząstek stałych, wynoszącą 6,23e3 zarejestrowano dla prędkości w przedziale 100–110 km/h i przyspieszenia z zakresu 1–1,5 m/s<sup>2</sup>.



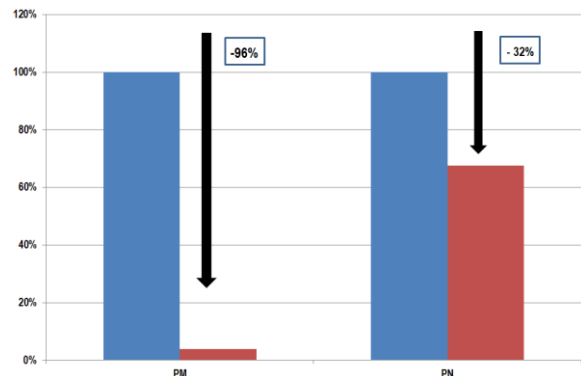
Rys. 9. Sekundowa emisja masy cząstek stałych w przedziałach prędkości pojazdu oraz jego przyspieszeń

Co więcej, wykonano także charakterystykę rozkładu wymiarowego liczby cząstek stałych (Rys. 10). Na jego podstawie można zauważyć, iż badany pojazd cechuje się typową emisją cząstek stałych dla silnika o zapłonie iskrowym. Są to cząstki o małych średnicach z zakresu 50–80 nm, a ich masa zajmuje 20% masy wszystkich cząstek. Zaobserwowano również cząstki o bardzo małych średnicach poniżej 50nm. Jest to negatywne zjawisko w aspekcie zdrowia ludzkiego, gdyż zaobserwowane cząstki o najmniejszych średnicach (tzw. nanocząstki), mają kancerogenny wpływ na układ oddechowy.



Rys. 10. Rozkład wymiarowy cząstek stałych

Na podstawie wyznaczonej całkowitej masy oraz liczby cząstek stałych, a także dystansu, jaki pokonał pojazd podczas całego testu określono wartość emisji drogowej. Otrzymane wartości emisji porównano z wartościami dopuszczalnymi określonymi dla normy EURO 6 (Rys.11). Dodatkowo uwzględniono współczynnik zgodności CF (*ang. Conformity Factor*), wynoszący 2,1 [7,8]. Nie odnotowano żadnych przekroczeń limitów. Dla emisji masy cząstek stałych zarejestrowano wartość emisji o 96% mniejszą od wartości dopuszczalnej, dla emisji liczby cząstek stałych natomiast mniejszą o 32%. Badany pojazd cechuje się emisją cząstek stałych o małych i bardzo małych średnicach z zakresu 6–100 nm. Powstanie zbioru masy z tych cząstek wynika z mechanizmu nukleacji, podczas rozcieńczania i ochładzania gazów wylotowych. Cząstki te złożone są zatem z substancji wchodzących w skład lotnych frakcji SOF, niewielkiej ilości węgla oraz związków metali [P].



Rys. 11. Porównanie emisji masy i liczby cząstek stałych z normą EURO 6, przy uwzględnieniu CF

### Podsumowanie

Wykonane badania i analiza wyników w rzeczywistych warunkach eksploatacji z pojazdu hybrydowego umożliwiły sformułowanie wniosków odnośnie wskaźników pracy i charakterystyk ekologicznych w aspekcie cząstek stałych. W przypadku charakterystyki porównawczej z normami emisji wzięto pod uwagę współczynnik zgodności CF, obowiązujący dla testu RDE. Analiza nie wykazała żadnych przekroczeń narzuconych przez ustawodawców standardów emisji spalin, co potwierdza zasadność prowadzonych obecnie kierunków rozwoju pojazdów samochodowych. Główną tendencją rozwojową jest spełnienie coraz to bardziej restrykcyjnych norm emisji spalin poprzez zastosowanie pozasilnikowych układów oczyszczania gazów wylotowych czy hybrydyzację lub całkowitą elektryfikację pojazdów samochodowych. Obiekt badawczy, stanowiący samochód hybrydowy wyposażono w układ paliwowy z bezpośrednim wtryskiem paliwa oraz w silnik o zapłonie iskrowym. Silniki takie charakteryzują się emisją cząstek o najmniejszych średnicach, które mają negatywny wpływ na zdrowie ludzkie. W związku z tym, pomimo lepszych wskaźników ekologicznych pojazdów hybrydowych, każdy nowo produkowany pojazd z bezpośrednim wtryskiem paliwa powinien być wyposażony przez producentów w filtr cząstek stałych.

### Bibliografia

1. Fuć P., Lijewski P., Siedlecki M., Sokolnicka B., Szymlet N., Analysis of particle mass and number emission from a SI engine with direct fuel injection and a particulate filter, "International Automotive Conference KONMOT" 2018, Kraków 13–14.09.2018
2. Komisja Europejska, Biała Księga Transportu– Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu, Bruksela 2011
3. Lijewski P., Szymlet N., Sokolnicka B., Siedlecki M., Analiza emisji tlenku węgla z pojazdu z silnikiem o zapłonie iskrowym i bezpośrednim wtryskiem paliwa według procedury RDE, „Auto-busy: technika, eksploatacja, systemy transportowe” 2017, nr 12.
4. Matti Maricq, Gasoline Engines: ultrafine Particle Emissions, Ford Motor Company
5. Merkisz J., Lijewski P., Fuć P., Weymann S., Exhaust emission tests from non-road vehicles conducted with the use of PEMS analyzer, „Eksploatacja i Niezawodność” 2013, nr 15
6. Merkisz J., Pielecha J., Emisja cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych, wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2017.
7. Merkisz J., Pielecha J., Nowak M., Emisja zanieczyszczeń z pojazdów w rzeczywistych warunkach ruchu na przykładzie aglomeracji poznańskiej, „Postępy Nauki i Techniki” 2012, nr 15.

8. Pielecha J., Merkisz J., Markowski J., Jasinski R., 2016 Analysis of Passenger Car Emission Factors in RDE Tests, "Web of Conferences" 2016, nr 10.
9. Siedlecki M., Galant M., Rymaniak Ł., Ziółkowski A., Badania emisji zanieczyszczeń pojazdu wyposażonego w silnik z bezpośrednim wtryskiem benzyny w rzeczywistych warunkach eksploatacji, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe” 2017, nr 12.
10. World Health Organization, Diesel engines exhaust carcinogenic
11. [www.avl.com](http://www.avl.com)
12. [www.gpsvisualizer.com](http://www.gpsvisualizer.com)
13. [www.semtech.com](http://www.semtech.com)
14. [www.tsi.com](http://www.tsi.com)

### Particulates mass and number emission from hybrid vehicle in RDE test

The subject of this article is the analysis of the particle number and mass road emission from a hybrid vehicle in real operating conditions. Additionally, the operating conditions of the tested vehicle and engine were also analyzed. To this end, particulate emissions and performance tests were carried out from a light hybrid vehicle, equipped with a 77 kW engine with a displacement of 1.58 dm<sup>3</sup>. The tests were conducted in real traffic conditions, following the standard RDE (Real Driving Emission) procedure. The test was

performed within the Poznań agglomeration, the route included roads with different maximum speed limits. The research involved the use of mobile measuring equipment, belonging to the PEMS (Portable Emissions Measurement System) group, which included equipment such as: SEMTECH DS, AVL MSS (Micro Soot Sensor) and EEPS 3090 (Engine Exhaust Particle Sizer). The results obtained have been referred to the vehicle exhaust emission limit values in accordance with the Euro 6 norm.

**Keywords:** combustion engines, hybrid vehicles, RDE test, particulate emissions, PEMS

#### Autorzy:

mgr inż. **Natalia Szymlet** – Politechnika Poznańska – Wydział Inżynierii Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, [natalia.r.szymlet@doctorate.put.poznan.pl](mailto:natalia.r.szymlet@doctorate.put.poznan.pl)

mgr inż. **Barbara Sokolnicka** – Politechnika Poznańska – Wydział Inżynierii Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu

mgr inż. **Maciej Sieldecki** – Politechnika Poznańska – Wydział Inżynierii Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu

dr inż. **Piotr Lijewski**, prof. PP – Politechnika Poznańska – Wydział Inżynierii Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu

dr inż. **Mateusz Nowak** – Politechnika Poznańska – Wydział Inżynierii Transportu, Instytut Silników Spalinowych i Transportu