

Jerzy MERKISZ<sup>1</sup>  
Maciej ANDRZEJEWSKI<sup>2</sup>  
Jacek PIELECHA<sup>3</sup>  
Jarosław MARKOWSKI<sup>4</sup>

### **ANALIZA ROZKŁADU WYMIAROWEGO CZĄSTEK STAŁYCH DLA POJAZDÓW UŻYTKOWYCH W TESTACH DROGOWYCH**

*W artykule zaprezentowano wyniki badań drogowych pojazdów użytkowych (typu LDV) napędzanych silnikami ZS. Celem badań była weryfikacja wpływu obciążenia pojazdów ładunkiem na parametry cząstek stałych. Artykuł zawiera wyniki pomiarów stężenia, masy oraz rozkładów wymiarowych (m.in. koncentracji, powierzchni) cząstek stałych emitowanych przez silniki tych pojazdów.*

*Badania przeprowadzono w rzeczywistych warunkach ruchu pojazdów w mieście oraz na trasie Poznań–Września. W pomiarach wykorzystano aparaturę do badań emisji cząstek stałych firmy AVL List GmbH – Micro Soot Sensor (pomiar stężenia i masy PM) oraz aparaturę firmy TSI Inc. – spektrometr masowy Engine Exhaust Particle Sizer 3090 (pomiar rozkładu wymiarowego cząstek stałych).*

### **DIMENSIONAL DISTRIBUTION ANALYSIS OF PM FOR COMMERCIAL VEHICLES IN ROAD TESTS**

*The purpose of the tests described in the article was to verify how the load of vehicle affects on the PM emissions. It presents the results of road tests of commercial vehicles (LDV type) powered by diesel engines. The article contains the results of measurements of concentration, mass and dimensional distribution of PM emitted by the engines of these vehicles.*

*The tests were conducted in real traffic conditions on the route from Poznań to Września. The AVL Micro Soot Sensor (measurement of the concentration and mass) and Engine Exhaust Particle Sizer 3090 by TSI Inc. (measurement of the dimensional distribution) were used to measure PM emissions.*

<sup>1</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3.  
Tel. +48 61 665-22-07, Fax. +48 61 665-22-04. E-mail: Jerzy.Merkisz@put.poznan.pl

<sup>2</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3.  
Tel. +48 61 665-20-04, Fax. +48 61 665-22-04. E-mail: Maciej.Andrzejewski@doctorate.put.poznan.pl

<sup>3</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3.  
Tel. +48 61 665-21-18, Fax. +48 61 665-22-04. E-mail: Jacek.Pielecha@put.poznan.pl

<sup>4</sup> Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3.  
Tel. +48 61 665-27-05, Fax. +48 61 665-22-04. E-mail: Jaroslaw.Markowski@put.poznan.pl

## 1. WSTĘP

W transporcie ładunków znaczącą rolę odgrywają pojazdy użytkowe. Dostępnych jest wiele typów takich pojazdów o różnej ładowności, ograniczonej dopuszczalną masą całkowitą (dmc). Źródłem napędu samochodów przewożących towary są w większości silniki o zapłonie samoczynnym, charakteryzujące się dużymi wartościami momentu obrotowego. Jeśli chodzi o pojazdy przeznaczone do najcięższych zastosowań (o dmc powyżej 16 t) ich jednostki napędowe charakteryzują się ponadto dużą objętością skokową, z czego wynika także duże przebiegowe zużycie paliwa. Jest to istotna kwestia z punktu widzenia ekonomii eksploatacji i zyskowności prowadzenia działalności przewozowej przez podmioty gospodarcze. Słuszne zatem jest maksymalne wykorzystywanie ładowności danego pojazdu (maksymalne obciążanie go ładunkiem, tak aby nie przekroczyć dmc) oraz unikanie tzw. pustych przebiegów.

Badania opisane w niniejszym artykule przeprowadzono w celu weryfikacji wpływu obciążenia pojazdu ładunkiem na emisję cząstek stałych. Wpływ obciążenia ładunkiem na zużycie paliwa jest bowiem łatwiej mierzalny i powszechnie możliwy do określenia, natomiast w celu określenia emisji cząstek stałych należy posłużyć się już specjalistyczną aparaturą badawczą.

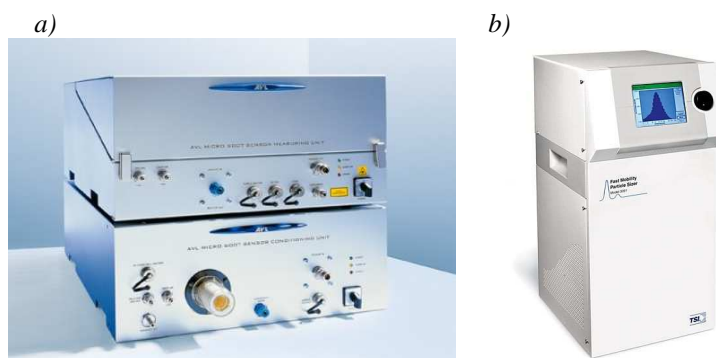
## 2. OBIEKTY BADAŃ I STOSOWANA APARATURA POMIAROWA

Badaniom w rzeczywistych warunkach eksploatacji poddano dwa samochody użytkowe typu LDV (*Light Duty Vehicle*). Były nimi: Peugeot Expert i Mercedes-Benz Vito. Oba samochody dostawcze charakteryzowały się zbliżonymi wymiarami zewnętrznymi i dopuszczalną masą całkowitą oraz były napędzane 4-cylindrowymi silnikami o zapłonie samoczynnym (tab. 1). Główne różnice były związane z rodzajem zamontowanej skrzyni przekładniowej oraz parametrami eksploatacyjnymi jednostek napędowych.

Tab. 1. Dane techniczne badanych pojazdów

Parametr	Samochód U1	Samochód U2
	Peugeot Expert	Mercedes-Benz Vito
Silnik	ZS	ZS
Liczba cylindrów	R4	R4
Objętość skokowa [dm <sup>3</sup> ]	1,9	2,2
Układ wtryskowy	pompa rotacyjna	Common Rail
Moc maksymalna [kW/KM] przy [obr/min]	68/92 przy 4000	90/122 przy 3800
Moment obrotowy [N·m] przy [obr/min]	196 przy 2250	300 przy 1800÷2500
Doładowanie/rodzaj	tak/turbosprężarkowe	tak/turbosprężarkowe
Skrzynia przekładniowa	manualna, 5-biegowa	automatyczna
Masa własna [kg]	1400	1675
Wskaźnik mocy [kW/dm <sup>3</sup> ]	36	41
Wskaźnik masy [kg/kW]	21	19

Do określenia masy cząstek stałych wykorzystano mobilny analizator firmy AVL List GmbH – Micro Soot Sensor, umożliwiający ciągły pomiar stężenia cząstek stałych w rozcieńczonych spalinach (rys. 1a). Wykorzystanie metody fotoakustycznej pozwala na pomiar stężenia cząstek już od wartości  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pomiar cząstek stałych (urządzenie mierzy część węglową cząstki stałej) polega na znacznej absorpcji modulowanego światła laserowego przez cząstki sadzy. Skutkuje to okresowym (przebiegiem) ogrzewaniem i chłodzeniem gazu nośnego (zmianą ciśnienia w komorze pomiarowej), a powstająca fala dźwiękowa jest rejestrowana przez mikrofony.



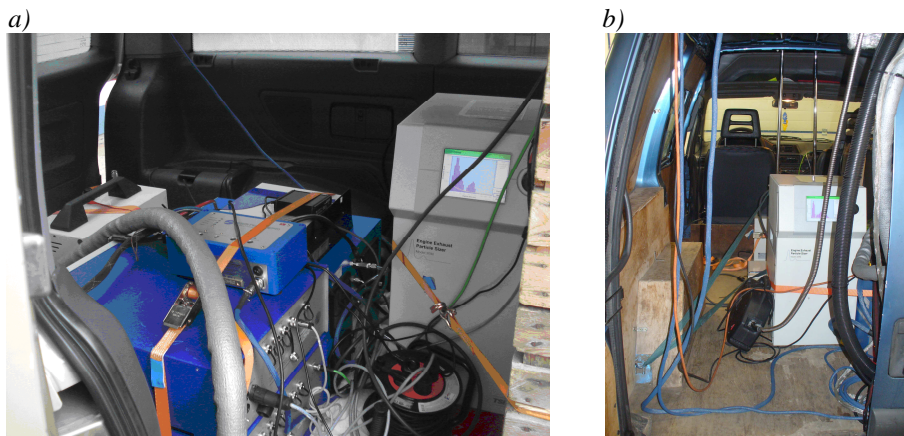
Rys. 1. Aparatura służąca do pomiaru zawartości cząstek stałych w spalinach [3]:  
a) AVL Micro Soot Sensor, b) TSI Engine Exhaust Particle Sizer 3090

Do pomiaru rozkładu średnic cząstek stałych wykorzystano spektrometr masowy firmy TSI Inc. – EEPS 3090 (*Engine Exhaust Particle Sizer*; rys. 1b). Spektrometr umożliwił ciągły pomiar rozkładu wielkości PM emitowanych przez silnik badanego samochodu dostawczego. Analizatory tego typu umożliwiają pomiar koncentracji dla dyskretnego zakresu średnic cząstek (od 5,6 do 560 nm) na podstawie zróżnicowanej ich prędkości. Zakres elektrycznej ruchliwości cząstek jest zmieniany wykładniczo, a pomiar wielkości cząstek stałych odbywa się z częstotliwością 10 Hz.

Na rysunku 2 i 3 przedstawiono obiekty badawcze wraz z aparaturą pomiarową.



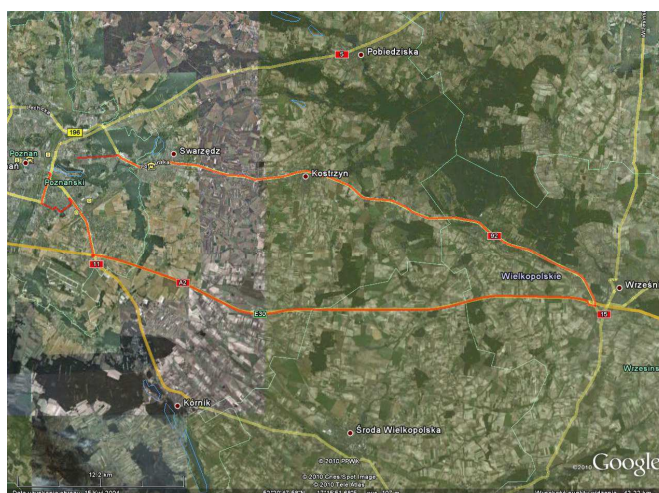
Rys. 2. Obiekty badawcze wraz z zamontowaną aparaturą pomiarową



Rys. 3. Aparatura służąca do określania zawartości PM w spalinach: a) samochód z ładunkiem, b) samochód bez ładunku

### 3. WARUNKI PRZEPROWADZANIA POMIARÓW

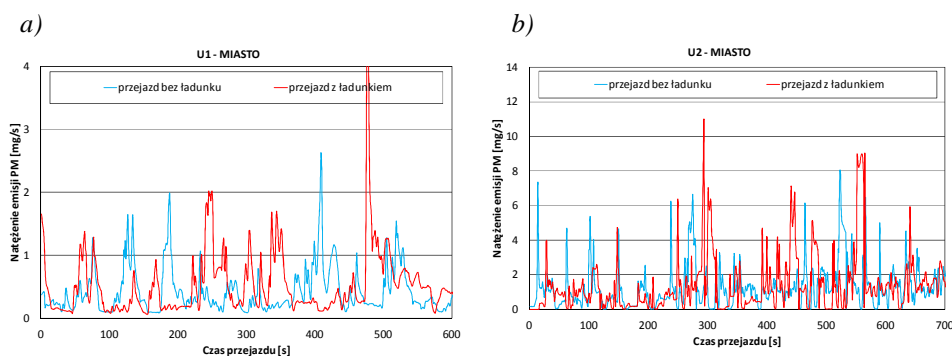
Badania drogowe emisji cząstek stałych przeprowadzono w rzeczywistych warunkach ruchu samochodów na trasie Poznań–Wrzesnia (rys. 4). Trasa przejazdu podzielona została na trzy podstawowe cykle (odcinki) pomiarowe, różniące się między sobą przede wszystkim charakterystyką ruchu: miejski (zwany dalej „Miasto”), autostradowy („A2”) oraz mieszany („Droga 92”). Badania przeprowadzono na tej samej trasie samochodem bez obciążenia oraz z obciążeniem. Obciążenie samochodu stanowiło około 500 kg ładunku (łącznie z masą aparatury badawczej).



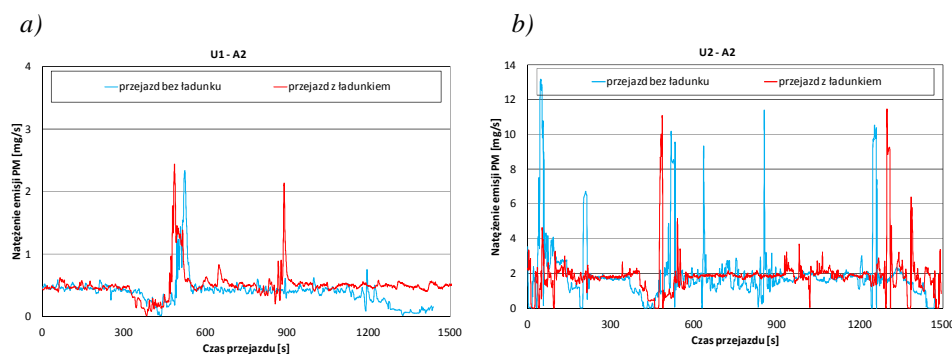
Rys. 4. Trasa przejazdu (kolor czerwony)

#### 4. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

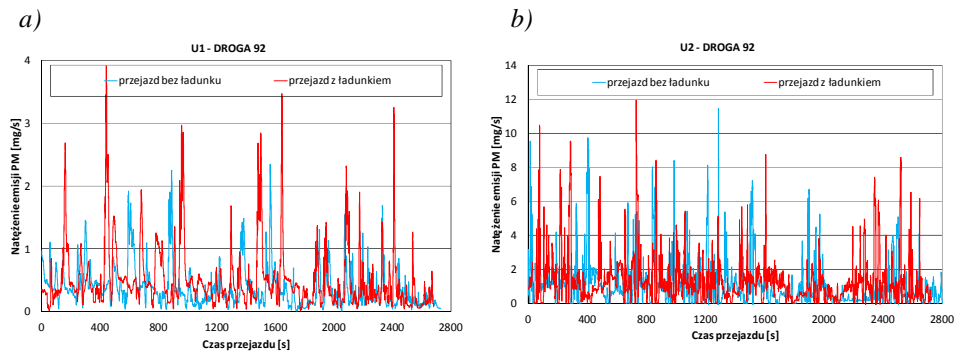
W trakcie wykonywania badań drogowych mierzono stężenie cząstek stałych w spalinach emitowanych przez samochody dostawcze U1 i U2 na poszczególnych odcinkach pomiarowych. Dzięki temu można było określić natężenie emisji (w mg/s) tych toksycznych składników spalin, zarówno dla przejazdu nieobciążonym samochodem, jak i obciążonym (rys. 5–7). Dla obu pojazdów na całej trasie przejazdu (trzech odcinkach pomiarowych) zaobserwowano znaczący wzrost natężenia emisji cząstek stałych w trakcie przewożenia ładunku. Największe różnice różnicę odnotowano dla warunków miejskich (zarówno dla pojazdu U1 oraz U2); wynika to głównie z dużej dynamiki jazdy (częste zatrzymania i gwałtowny wzrost prędkości) przy znacznym wzroście zapotrzebowania energetycznego silnika (pojazdu). Dla pozostałych odcinków pomiarowych zwiększenie natężenia emisji dla pojazdu obciążonego wynosiło około 10÷50%.



Rys. 5. Natężenie emisji cząstek stałych na odcinku pomiarowym „Miasto”:  
a) samochód U1, b) samochód U2



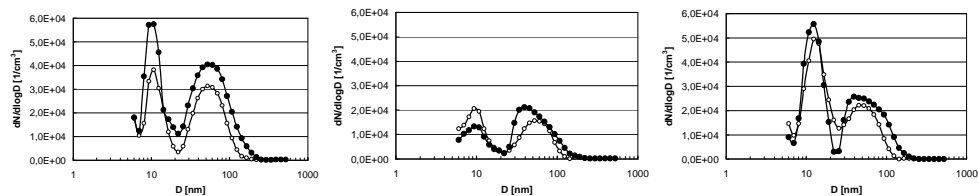
Rys. 6. Natężenie emisji cząstek stałych na odcinku pomiarowym „A2”:  
a) samochód U1, b) samochód U2



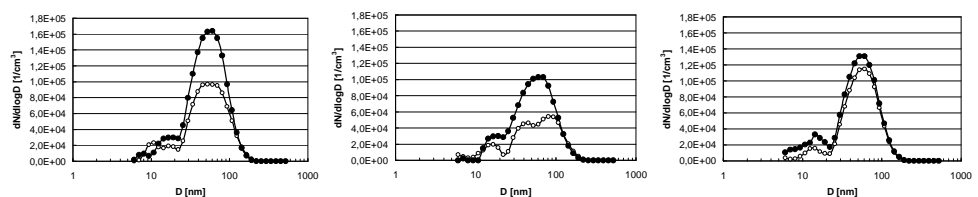
Rys. 7. Natężenie emisji cząstek stałych na odcinku pomiarowym „Droga 92”:  
a) samochód U1, b) samochód U2

Charakterystykę parametrów emisji cząstek stałych przeprowadzono dla koncentracji, powierzchni oraz stężenia cząstek stałych w zależności od ich średnicy. Określono rozkłady wymiarowe (zdefiniowane jako zależności danego parametru cząstek stałych od ich średnicy aerodynamicznej) cząstek stałych dla poszczególnych odcinków pomiarowych dla pojazdu U1 i U2 bez obciążenia i z obciążeniem pojazdu ładunkiem. Rezultaty przedstawiono w postaci charakterystyk widmowych rozkładu PM (wielkości uśrednionych w czasie pomiaru) koncentracji, pola powierzchni oraz stężenia. Masę cząstek stałych obliczano z wykorzystaniem zależności, że gęstość cząstek stałych jest niezależna od ich średnicy aerodynamicznej i wynosi  $1 \text{ g/cm}^3$ .

#### Samochód U1



#### Samochód U2



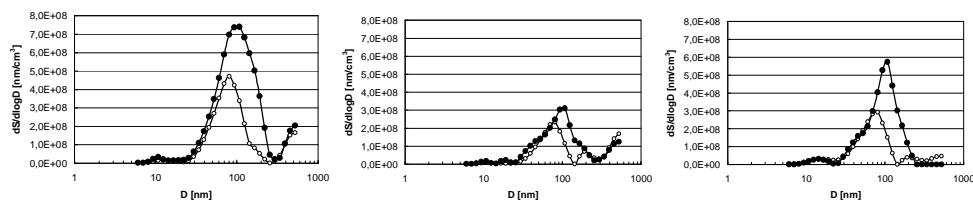
a)

b)

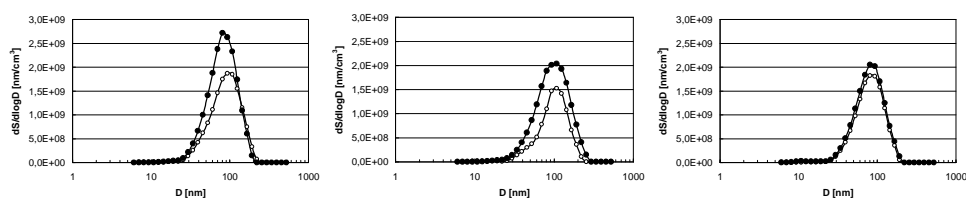
c)

Rys. 8. Koncentracja cząstek stałych jako funkcja ich wymiarów zarejestrowana dla trzech różnych odcinków pomiarowych dla pojazdów U1 i U2: a) „Miasto”, b) „A2”, c) „Droga 92”;  $\circ$  – przejazd bez ładunku,  $\bullet$  – przejazd z ładunkiem

## Samochód U1



## Samochód U2



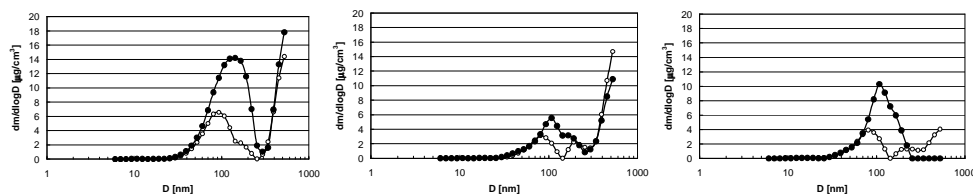
a)

b)

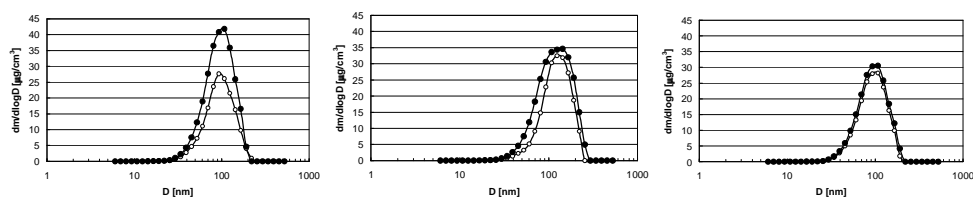
c)

Rys. 9. Powierzchnia cząstek stałych na jednostkę objętości jako funkcja ich wymiarów zarejestrowana dla trzech różnych odcinków pomiarowych dla pojazdów U1 i U2: a) „Miasto”, b) „A2”, c) „Droga 92”; ○ – przejazd bez ładunku, ● – przejazd z ładunkiem

## Samochód U1



## Samochód U2



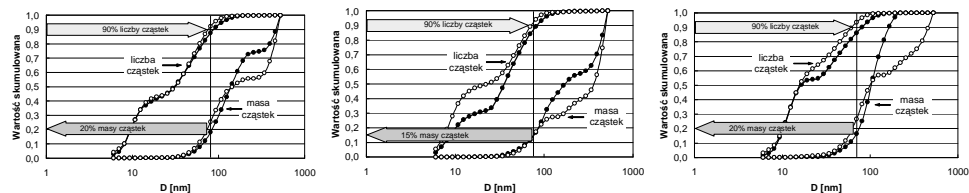
a)

b)

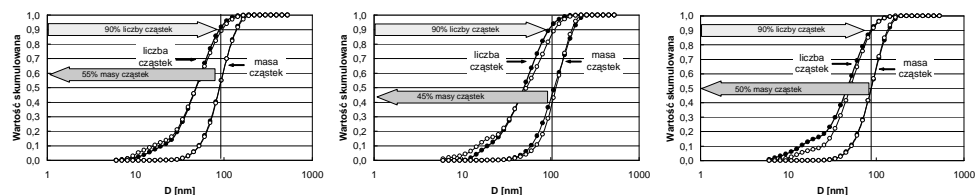
c)

Rys. 10. Stężenie cząstek stałych jako funkcja ich wymiarów zarejestrowana dla trzech różnych odcinków pomiarowych dla pojazdów U1 i U2: a) „Miasto”, b) „A2”, c) „Droga 92”; ○ – przejazd bez ładunku, ● – przejazd z ładunkiem

## Samochód U1



## Samochód U2



a)

b)

c)

Rys. 11. Wartość skumulowana liczby i masy jako funkcja ich wymiarów zarejestrowana dla trzech różnych odcinków pomiarowych dla pojazdów U1 i U2: a) „Miasto”, b) „A2”, c) „Droga 92”; ○ – przejazd bez ładunku, ● – przejazd z ładunkiem

Największą koncentrację cząstek stałych odnotowano dla jazdy miejskiej pojazdu (rys. 8a); w tym przypadku obciążenie powoduje wzrost koncentracji cząstek dla wszystkich średnic cząstek, co jest spowodowane większą dawką paliwa i mniejszym współczynnikiem nadmiaru powietrza. Ta sama prawidłowość występuje dla warunków jazdy autostradowej (rys. 8b) oraz poza obszarem zabudowanym (rys. 8c), jednakże odznacza się mniejszymi wartościami. Biorąc pod uwagę, że wzrost obciążenia pojazdu będzie wymagał większej prędkości obrotowej silnika do zrównoważenia oporów ruchu pojazdu, efekt zwiększonej liczby cząstek stałych będzie spotęgowany wzrostem wydatku spalin. Różnice między pojazdami U1 i U2 występują dla wszystkich warunków pracy: dla pojazdu U2 nie obserwuje się cząstek o średnicy około 10 nm. Jest to spowodowane innym systemem wtryskowym oraz większym przebiegiem eksploatacyjnym pojazdu.

Podobne prawidłowości odnotowano dla pomiarów powierzchni cząstek stałych odniesionej do objętości jednostkowej (rys. 9). Podstawą do obliczenia pola powierzchni cząstek jest liczba cząstek stałych o danej średnicy, jednakże wykresy te nie są przystające do siebie. Cząstki o bardzo małych średnicach do 20 nm (powstające w procesie nukleacji) praktycznie nie mają udziału w ogólnej powierzchni wszystkich cząstek. Cząstki większe o zakresie średnic 50÷150 nm charakteryzują się największym jednostkowym (odniesionym do jednostki objętości) polem powierzchni.

Stężenie cząstek stałych było uzależnione od warunków pracy w jakich był wykonywany przejazd pojazdem. Obciążenie pojazdu miało większy wpływ na wyniki pomiarów niż w poprzednich dwóch przypadkach (rys. 10). W jeździe miejskiej dla pojazdu obciążonego odnotowano wzrost stężenia cząstek o ponad 100% dla średnic cząstek z zakresu 60÷120 nm, jednocześnie największe stężenie cząstek przypadło na zakres większych średnic cząstek stałych. Powyższa prawidłowość (przesunięcia maksimum stężenia cząstek w stronę większych średnic cząstek) jest zachowana dla wszystkich warunków pracy pojazdu.



Porównując wartości skumulowane liczby i masy cząstek stałych (rys. 11) można zauważyć, że (dla pojazdu U1) 90% liczby wszystkich cząstek stałych odpowiada tylko za 15÷20% ich masy. Około 90% cząstek stałych zawartych w spalinach ma średnicę mniejszą od 100 nm, natomiast wzrost masy cząstek stałych odnotowuje się dopiero powyżej tej średnicy. Dla pojazdu U2 90% liczby wszystkich cząstek stałych odpowiada za 45÷55% ich masy. Około 90% cząstek stałych zawartych w spalinach ma średnicę mniejszą od 100 nm, natomiast wzrost masy cząstek stałych odnotowuje się dopiero powyżej 30 nm. Porównując pojazdy między sobą odnotowano większe cząstki dla pojazdu U1 i z powodu braku cząstek o bardzo małych średnicach przebiegi skumulowane są inaczej rozłożone.

## 5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania pojazdów użytkowych (w postaci samochodów dostawczych) w rzeczywistych warunkach eksploatacji uwidoczniły znaczący wpływ obciążenia pojazdu ładunkiem na emisję cząstek stałych. Z wykonanych pomiarów wynika, że:

- charakterystyka koncentracji cząstek stałych (jako funkcja ich średnicy) jest uzależniona od charakterystyki wtrysku układu paliwowego, co w konsekwencji wpływa na udział procesu nukleacyjnego w tworzeniu cząstek stałych w cylindrze silnika spalinowego,
- wzrost obciążenia pojazdu powoduje wzrost koncentracji, pola powierzchni oraz stężenia cząstek stałych niezależnie od warunków ruchu, w których pojazd jest eksploatowany,
- bardziej wartościowym pomiarem odnoszącym się do cząstek stałych jest ich liczba (lub koncentracja), natomiast masa (łatwiej mierzalna) „niesie” tylko 15÷20 informacji o liczbie cząstek stałych.

Mając powyższe na uwadze warto zaznaczyć, iż obserwowane zbędne przewożenie w pojeździe użytkowym niepotrzebnego ładunku może wpływać negatywnie nie tylko na ekonomię jego eksploatacji (wielkość zużycia paliwa) i tym samym zyskowość prowadzenia działalności przewozowej, ale również w znacznym stopniu na środowisko naturalne i człowieka. Analogiczna sytuacja występować będzie dla pojazdów lekkich – np. samochodów osobowych, w których (podobnie jak w samochodach użytkowych) można zaobserwować „dodatkowe” wykorzystanie bagażnika. Stąd racjonalnie należy podchodzić do kwestii niezbędnych ładunków, które przewozi się w pojeździe.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Merkisz J., Pielecha J.: *The on-road exhaust emissions characteristics of SUV vehicles fitted with diesel engines*, Combustion Engines/Silniki Spalinowe, No. 2/2011.
- [2] Vouitsis E., Ntziachristos N., Pistikopoulos P., Samaras Z., Chrysikou L., Samara K.: *An investigation on the physical, chemical and ecotoxicological characteristics of particulate matter emitted from light-duty vehicles*, Environ. Pollut. 2009; Vol. 157.
- [3] Materiały informacyjne firm AVL oraz TSI.

Badania zrealizowano dzięki środkom przeznaczonym na Dofinansowanie dla Młodych Naukowców i Doktorantów (DdMNI) pochodzącym od Dziekana Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej: 52-126/11 DS-MK.