

Jerzy Merkisz, Jacek Pielecha, Jarosław Krasowski  
*Politechnika Poznańska, Poznań*

## Badania związków szkodliwych w spalinach emitowanych z pojazdów wyposażonych w filtry cząstek stałych

W artykule przedstawiono rezultaty z badań emisji związków szkodliwych z samochodu osobowego z silnikiem ZS, wyposażonego w filtr cząstek stałych, w warunkach drogowych – w jakich można uzyskać informację o ich rzeczywistej emisji. Testy wykonywano na odcinku kilkunastu kilometrów podczas jazdy miejskiej – dają one informację o emisji z pojazdów w trakcie eksploatacji i dotyczą rzeczywistych warunków ruchu. Do pomiarów stężenia związków toksycznych wykorzystano mobilny analizator do badań toksyczności SEMTECH DS firmy SENSORS. Analizator umożliwił pomiar stężenia związków szkodliwych, mierząc jednocześnie masowe natężenie spalin. Pomiary emisji cząstek stałych (masy, liczby i rozkładu widmowego) wykonano z wykorzystaniem licznika cząstek stałych firmy AVL oraz spektrometru mas firmy TSI. Uzyskane dane posłużyły do opracowania zależności charakteryzujących wpływ dynamicznych właściwości silnika na emisję związków szkodliwych. Dynamiczne właściwości silnika uwzględniono w sposób pośredni, wykorzystując podział całego zakresu prędkości oraz zakresu obliczonego przyspieszenia w ruchu miejskim, do wykonania macierzy natężenia emisji. Wykorzystane dane uśredniono w ramach poszczególnych przedziałów prędkości i przyspieszeń, otrzymując charakterystykę udziału pracy silnika w poszczególnych przedziałach oraz charakterystyki macierzy emisji poszczególnych związków szkodliwych. Powyższe wyniki posłużyły do zdefiniowania wskaźnika emisyjności pojazdu, który można wykorzystać do klasyfikacji flot pojazdów pod względem emisji związków toksycznych, różniących się m.in. datą produkcji, a więc spełnianymi limitami toksyczności spalin, przebiegiem pojazdów lub warunkami eksploatacji.

### Tests of exhaust emissions from vehicles with diesel particulate filters

The article presents the results of exhaust emission tests of cars with CI engines equipped with diesel particulate filters in road conditions – such conditions guarantee that the data obtained reflect the actual emission. The tests were carried out in sections of about a dozen kilometers in length in city traffic conditions – they contain the information about emissions of the vehicle in use and refer to the actual traffic conditions. The SEMTECH mobile analyzer from SENSORS was used to measure the concentration of toxic compounds. The analyzer ensured the measurement of concentration of exhaust emissions. The measurements of emission of particulates (mass, surface area, number and spectral distribution) was made using the AVL particle counter and the TSI mass spectrometer. Also the vehicle diagnostic system data were used in the tests, along with the GPS location system data. The data obtained were used for the analysis of relationships characteristic of the influence of the dynamic engine properties on the exhaust emissions. The dynamic engine properties were considered indirectly, using the division of the complete scope of speed and the scope of calculated acceleration in the city traffic to create the emissions intensity matrix. The data used were averaged within the particular ranges of speed and acceleration, thus obtaining the characteristics of engine operation in the particular ranges and the characteristics of emission matrix for the particular harmful compounds. The above results were used for defining the vehicle emissions rate which can be used for the classification of car fleets in terms of exhaust emissions, differing among others in build date and hence the exhaust emissions limits met, vehicle mileage or usage conditions.

### Wprowadzenie

Obecnie zauważalna jest wyraźna tendencja do globalnego traktowania zagrożeń środowiska ze strony motoryzacji. Przepisy zezwalające na dopuszczenie pojazdów do użytkowania (badania homologacyjne i zgodności produkcji), okresowe badania kontroli stanu technicznego oraz pozostałe akty prawne, związane bezpośrednio i pośrednio z produkcją, użytkowaniem i zagospodarowaniem zużytych wytworów cywilizacji, traktują zagadnienia ochrony środowiska w sposób kompleksowy. Na przestrzeni minionych lat, w poszczególnych państwach istniały różne systemy

badań i kontroli emisji spalin z silników samochodowych, jednak od pewnego czasu następuje w tym zakresie daleko posunięta unifikacja [2, 3].

Na świecie prowadzone są również kontrole emisji substancji szkodliwych dla środowiska przez bilansowanie emisji globalnej z różnych źródeł działalności cywilizacyjnej, w tym z motoryzacji i z innych niż samochodowe zastosowań silników. W Europie koordynacja bilansowania emisji substancji szkodliwych dla środowiska jest prowadzona w ramach programu CORINAIR.

Rosnąca liczba pojazdów na świecie oraz zanieczyszczenie środowiska naturalnego powoduje wzrost wymagań w zakresie emisji szkodliwych składników spalin. Obecny stopień zaawansowania techniki i technologii we wszystkich dziedzinach przemysłu, w tym również we wszelkich rodzajach transportu, powoduje wzrost wymagań w zakresie produkcji urządzeń do pomiarów emisji spalin. Aby wymagania te mogły być spełniane w stopniu koniecznym do zmieniających się okresowo przepisów, niezbędne stało się większe zaangażowanie przemysłu w tej dziedzinie. Badania emisji toksycznych składników

spalin są procesem skomplikowanym. Obecne analizatory do pomiaru emisji wymagają szczególnych warunków laboratoryjnych, a procedury homologacyjne obejmują testy na hamowniach silnikowych i podwoziowych, które jednak nie odzwierciedlają emisji w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Najnowsze wyniki badań prowadzonych w warunkach rzeczywistych ukazują, że w przypadku niektórych składników toksycznych spalin emisja ta jest większa o kilkaset procent [1, 5, 8-10]. W związku z powyższym dostrzegalny jest trend usankcjonowania pomiaru emisji w warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów.

### Metodyka badań

Celem badań była weryfikacja zmian emisji substancji toksycznych z pojazdu z silnikiem o zapłonie samoczynnym, spełniającego normę Euro 4, wyposażonego w filtr cząstek stałych, podczas rzeczywistych warunków ruchu drogowego; wyniki badań były jednocześnie próbą stworzenia pokładowego systemu pomiarowego związków szkodliwych. Wyznaczenie emisyjności w warunkach drogowych i porównanie jej z wartościami uzyskanymi na hamowni podwoziowej w teście homologacyjnym pozwoliło na określenie wskaźnika emisyjności. Wyznaczony wskaźnik emisyjności posłużył do odpowiedzi na pytanie, czy emisja w warunkach drogowych jest porównywalna z emisją uzyskiwaną podczas testu homologacyjnego. Jednocześnie jest to weryfikacja warunków jazdy w teście homologacyjnym (opracowanym kilkadziesiąt lat temu) i warunków rzeczywistych ruchu pojazdów.

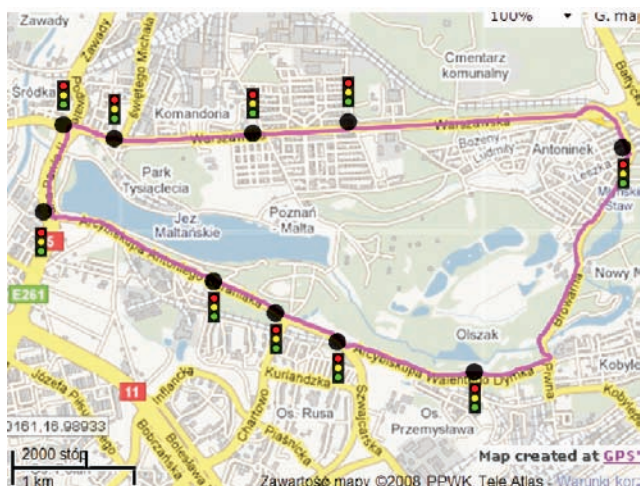
Pomiarów emisyjności w warunkach drogowych dokonano w warunkach ruchu miejskiego w Poznaniu (rysunek 1). Badania przeprowadzono na głównych uli-

cach miasta w godzinach południowych, w czasie umiarkowanego ruchu pojazdów. Warunki dobrano tak, aby istniała możliwość porównania wyników badań do testu homologacyjnego NEDC (rysunek 2) – względem którego wprowadzono wskaźniki emisyjności.

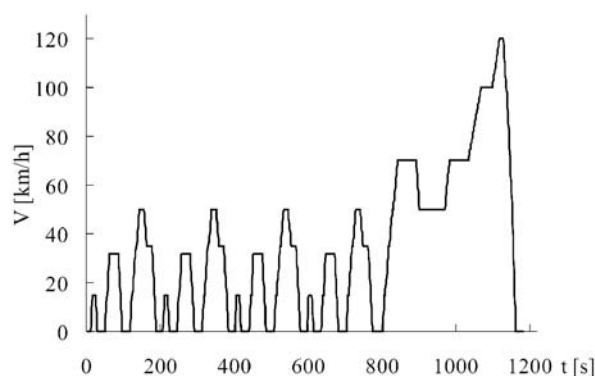
Obiektem badań był pojazd (rysunek 3), którego jednostka napędowa spełniała normę Euro 4. Charakterystyka pojazdu wykorzystanego do badań:

- Chevrolet Captiva,
- manualna skrzynia biegów,
- moc maksymalna: 110 kW/4000 obr./min,
- maksymalny moment obrotowy: 320 N·m/2000 obr./min,
- objętościowy wskaźnik mocy: 55 kW/dm<sup>3</sup>,
- liczba cylindrów: 4,
- objętość silnika: 1991 cm<sup>3</sup>,
- masa własna pojazdu: 1770 kg,
- reaktor katalityczny utleniający,
- filtr cząstek stałych,
- protokół diagnostyczny OBD II: ISO-9141-2/CAN 2.0/b.

Wyznaczona droga przejazdu charakteryzowała się zbliżonymi parametrami do testu NEDC pod względem



Rys. 1. Zaznaczona droga wykorzystana do badania emisyjności pojazdu (Poznań)



Rys. 2. Europejski test homologacyjny NEDC dla samochodów osobowych [4]

długości i czasu przejazdu, a także średniej wartości prędkości (tablica 1). Profil drogi był zróżnicowany pod względem wysokości n.p.m., a maksymalna różnica wynosiła 25,2 m. W związku z tym, że badania dotyczyły pojazdu zasilanego olejem napędowym, w tablicy 1 podano wartości średnie dla powtarzanych 3-krotnie przejazdów. Różnice wartości w kolejnych próbach nie przekraczały 5% od wartości średniej. Badania polegały na pomiarze stężenia związków szkodliwych (CO, HC, NO<sub>x</sub> dla każdego pojazdu), a następnie – z wykorzystaniem danych z systemu lokalizacji pojazdu GPS oraz systemu diagnostycznego – określeniu emisji drogowej związków szkodliwych.

Do pomiarów stężenia związków toksycznych wykorzystano mobilny analizator do badań toksyczności SEMTECH DS firmy SENSORS (tablica 2) [4, 6, 7]. Analizator umożliwił pomiar stężenia związków szkodliwych (CO, HC, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>) oraz masowe natężenie przepływu spalin. Gazy spalinowe wprowadzane do analizatora za pomocą sondy pomiarowej, utrzymującej temperaturę 191°C, są filtrowane z cząstek stałych (w przypadku silników ZS) i następuje pomiar stężenia węglowodorów w analizatorze płomieniowo-jonizacyjnym. Następnie spaliny są schładza-



**Rys. 3.** Widok analizatora SEMTECH DS (do pomiarów emisji związków gazowych) oraz licznika cząstek stałych, wraz ze spektrometrem mas (do pomiaru liczby cząstek stałych), zamontowanych w pojeździe podczas badań

**Tablica 1.** Charakterystyka testu badawczego oraz porównanie z testem NEDC

Parametry testu	Zasilanie olejem napędowym (ZS)	NEDC
Całkowity czas [s]	1110	<b>1180</b>
Prędkość maksymalna [km/h]	105	<b>120</b>
Prędkość średnia [km/h]	34,2	<b>33,6</b>
Długość [m]	11 780	<b>11 007</b>

ne do temperatury 4°C i następuje kolejno: pomiar stężenia tlenków azotu (metodą niedyspersyjną z wykorzystaniem

**Tablica 2.** Charakterystyka mobilnego analizatora spalin SEMTECH DS [11]

Parametr	Metoda pomiaru	Dokładność
Stężenie związków w spalinach:		
CO	analizator niedyspersyjny z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego, zakres pomiarowy 0-10%	±3% zakresu pomiaru
HC	analizator płomieniowo-jonizacyjny, zakres 0-10 000 ppm	±2,5% zakresu pomiaru
NO <sub>x</sub> = (NO + NO <sub>2</sub> )	analizator niedyspersyjny z wykorzystaniem promieniowania nadfioletowego, zakres 0-3000 ppm	±3% zakresu pomiaru
CO <sub>2</sub>	analizator niedyspersyjny z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego, zakres 0-20%	±3% zakresu pomiaru
O <sub>2</sub>	analizator elektrochemiczny, zakres 0-20%	±1% zakresu pomiaru
Przepływ spalin	masowe natężenie przepływu, temperatura spalin do 700°C	±2,5% zakresu pomiaru ±1% zakresu pomiaru
Czas nagrzewania	900 s	
Czas odpowiedzi	T <sub>90</sub> < 1 s	
Obsługiwane systemy diagnostyczne	SAE J1850/SAE J1979/SAE 15765 (LDV) SAE J1708/SAE J1587/SAE 1939 (HDV)	

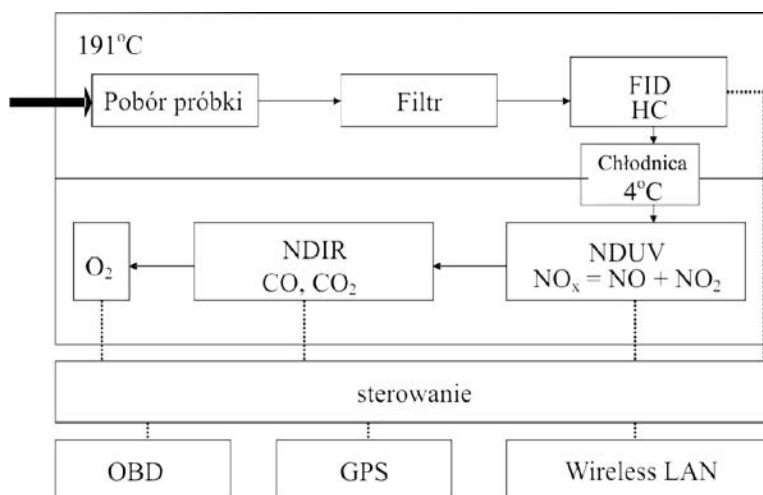


promieniowania ultrafioletowego, umożliwiającą jednoczesny pomiar tlenku azotu i dwutlenku azotu), tlenku węgla i dwutlenku węgla (metodą niedyspersyjną z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego) oraz tlenu (anizatorem elektrochemicznym). Do jednostki centralnej analizatora można doprowadzić dane przesyłane bezpośrednio z systemu diagnostycznego pojazdu oraz wykorzystać sygnał lokalizacji GPS (rysunek 4).

W badaniach wykorzystano pomiary emisji związków toksycznych, a także (w celach porównawczych) rejestrowano sygnały z pokładowego systemu diagnostycznego, m.in.: prędkość obrotową silnika, obciążenie i prędkość pojazdu. Niektóre z tych sygnałów posłużyły do określenia mapy gęstości czasowej udziału czasu pracy pojazdu w warunkach rzeczywistej eksploatacji.

Do pomiaru liczby cząstek stałych wykorzystano mobilny analizator firmy AVL (rysunek 5), którego podstawowe dane techniczne zawarto w tabelicy 3.

Do pomiaru wielkości cząstek stałych wykorzystano mobilny analizator 3090 EEPS (*Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer*) firmy TSI Incorporated (rysunek 6), którego parametry techniczne zamieszczono w tabelicy 4. Analizator umożliwił ciągły pomiar rozkładu wielkości cząstek stałych emitowanych przez silnik badanego pojazdu. Pomiar wielkości cząstek stałych odbywał się w zakresie od 5,6 do 560 nm, z częstotliwością pomiaru 10 Hz. Rozcieńczone spaliny o odpowiedniej temperaturze były kierowane jednocześnie do licznika cząstek



Rys. 4. Schemat mobilnego analizatora SEMTECH DS, wraz z zaznaczonym przepływem spalin i kolejnością pomiaru związków szkodliwych

Tabela 3. Dane techniczne licznika cząstek stałych firmy AVL

Zakres działania	0÷10 000 cm <sup>-3</sup>
Limit pomiarowy	≤ 0,1 cm <sup>-3</sup>
Czas dostępu	≤ 5 s
Przepływ próbki pomiarowej	1÷5 dm <sup>3</sup> /min
Napięcie zasilające	230 V, 600 W
Zapotrzebowanie powietrza	30 dm <sup>3</sup> /min
Warunki pracy urządzenia	0÷40°C, 0÷90% wilgotności



Rys. 5. Widok jednostki centralnej i urządzenia rozcieńczającego licznika cząstek stałych

Tabela 4. Dane techniczne spektrometru mas firmy TSI

Rozmiar mierzonych cząstek	5,6-560 nm
Liczba kanałów pomiarowych	16 kanałów na dekadę
Liczba kanałów elektrod	22
Rozdzielczość	10 Hz
Przepływ próbki spalin	10 dm <sup>3</sup> /min
Przyptyw sprężonego powietrza	40 dm <sup>3</sup> /min
Temperatura próbki	10-52°C
Temperatura pracy urządzenia	0-40°C



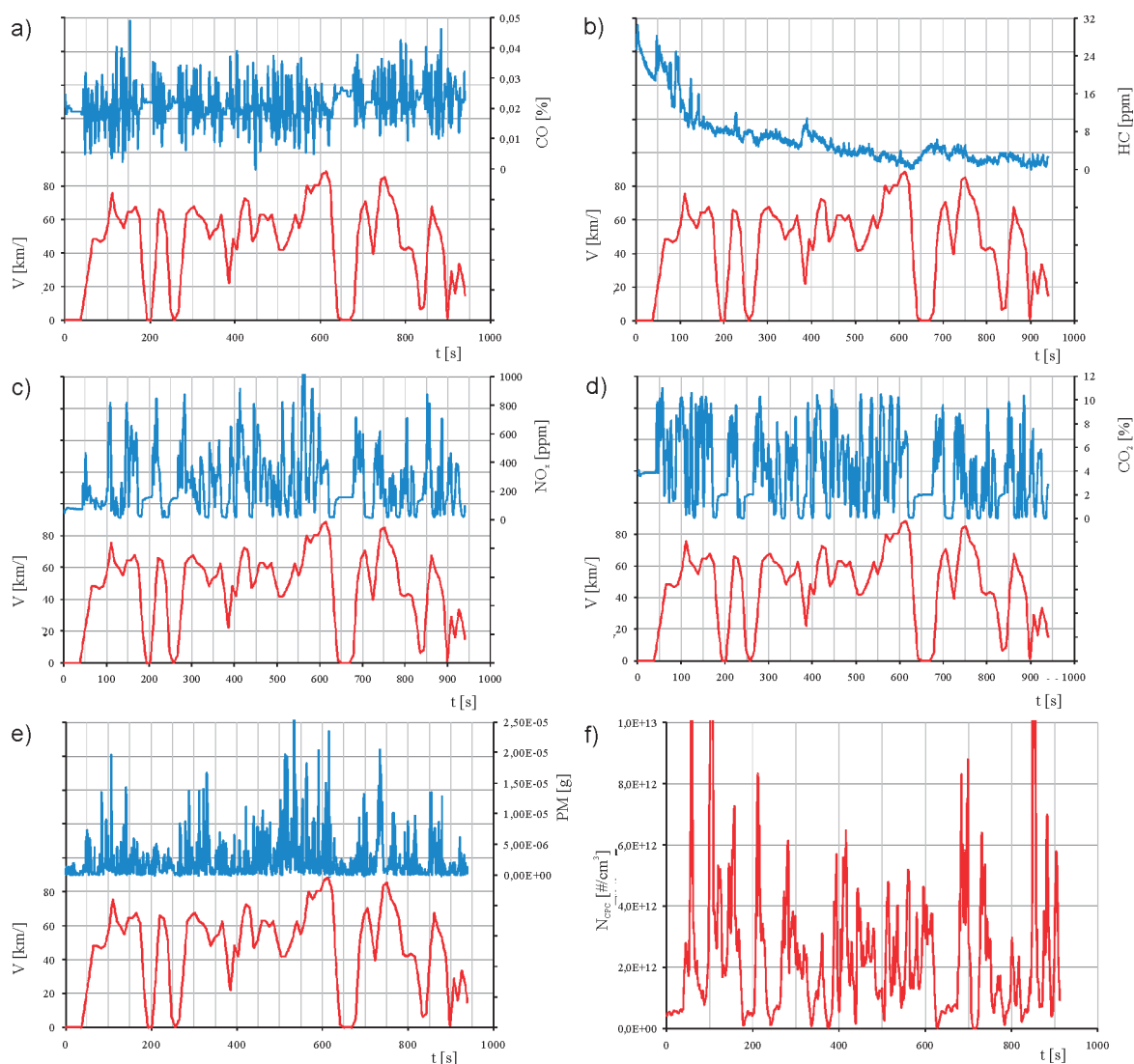
Rys. 6. Widok spektrometru mas TSI 3090

stałych i do spektrometru mas. W związku z tym otrzymywano jednocześnie ogólną liczbę cząstek stałych, a także rozkład ilościowy w każdym przedziale wymiarowym.

## Wyniki badań drogowych

Zarejestrowane wartości stężenia związków szkodliwych (CO, HC, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>) zaprezentowano dla pojazdu zasilanego olejem napędowym na tle prędkości pojazdu. Taka interpretacja lepiej odzwierciedla różnice w stężeniu odpowiednich związków, gdyż daje pogląd również na warunki ruchu, w których takie stężenia zanotowano. Jednocześnie uwidaczniają się warunki pracy silnika, które powinny podlegać bardziej rygorystycznej ocenie pod względem emisji i na których należy skoncentrować wysiłki badawcze w celu zmniejszenia szkodliwego oddziaływania jednostek napędowych na środowisko. Na rysunku 7 porównano stężenia różnych składników spalin – są one zależne głównie od charakterystyki przejazdu. Stężenie tlenu węgla zmienia się w bardzo nieznacznych granicach, natomiast stężenie węglowodorów maleje w miarę

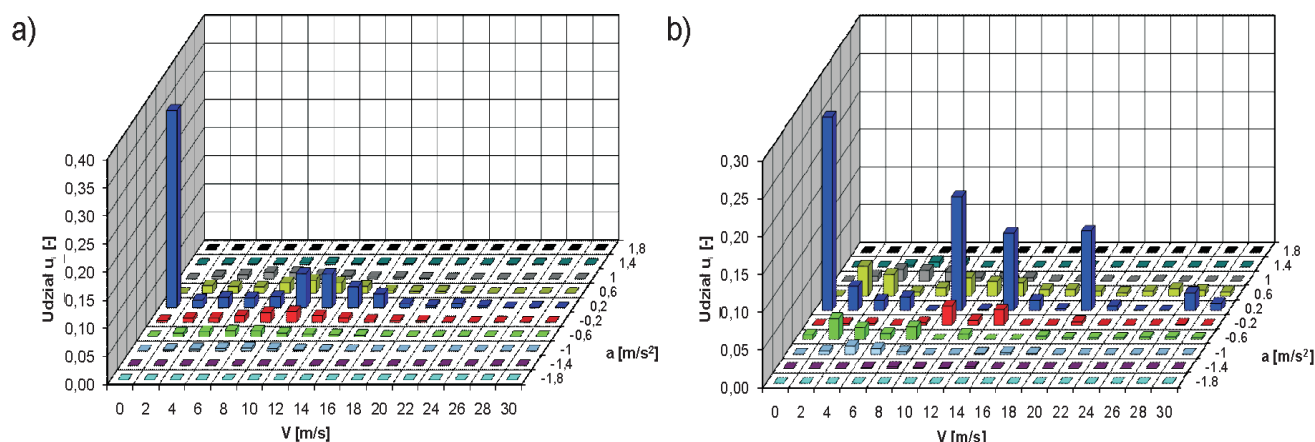
nagrzewania reaktora katalitycznego. Stężenie tlenków azotu jest skorelowane z prędkością pojazdu, a przebieg jest zgodny z tendencją zmian stężenia dwutlenku węgla. Również masa cząstek stałych emitowana w każdym badanym przedziale jest skorelowana z prędkością pojazdu; największe wartości rejestrowano w stanach dynamicznych silnika (przy gwałtownym przyspieszaniu). Dokonano również pomiarów liczby cząstek stałych – analiza uzyskanych danych wskazuje m.in. na zależność od prędkości pojazdu. Jednakże stwierdzenie jakościowe nie niesie informacji ilościowej – w celu uzyskania danych ilościowych posłużono się mapami gęstości czasowej – do określenia masy oraz skumulowanej emisji sekundowej, w wyniku czego określono średnią emisję drogową każdego z rozpatrywanych związków szkodliwych.



Rys. 7. Rejestracja związków szkodliwych podczas badań drogowych: a) tlenu węgla, b) węglowodorów, c) tlenków azotu, d) dwutlenku węgla, e) masy cząstek stałych, f) liczby cząstek stałych

Uzyskane dane posłużyły do opracowania zależności charakteryzujących wpływ dynamicznych właściwości silnika na emisję związków szkodliwych. Dynamiczne właściwości silnika uwzględniono w sposób pośredni, wykorzystując podział całego zakresu prędkości oraz zakresu obliczonego przyspieszenia w ruchu miejskim, do wykonania macierzy natężenia emisji. Dane uśredniono w ramach poszczególnych przedziałów prędkości i przyspieszeń, otrzymując charakterystykę udziału pracy silnika w poszczególnych przedziałach oraz charakterystyki macierzy emisji poszczególnych związków szkodliwych.

Największy udział pracy silnika w badanych warunkach ruchu przypada w obszarze biegu jałowego i średnich prędkości (10-20 m/s) oraz zerowego przyspieszenia pojazdu (rysunek 8a). Wyniki czasu jazdy w warunkach określonych jego prędkością i przyspieszeniem oraz natężenia emisji związków szkodliwych zweryfikowano w europejskim teście homologacyjnym NEDC (rysunek 8b). Porównanie takie posłużyło następnie do określenia wielkości zwiększenia emisji z pojazdu w warunkach rzeczywistych, w stosunku do warunków użytkowania pojazdu występujących w teście homologacyjnym.



Rys. 8. Charakterystyka udziału czasu pracy w przedziałach prędkości i przyspieszenia (a) podczas badań drogowych (b) wykres teoretyczny dla testu NEDC

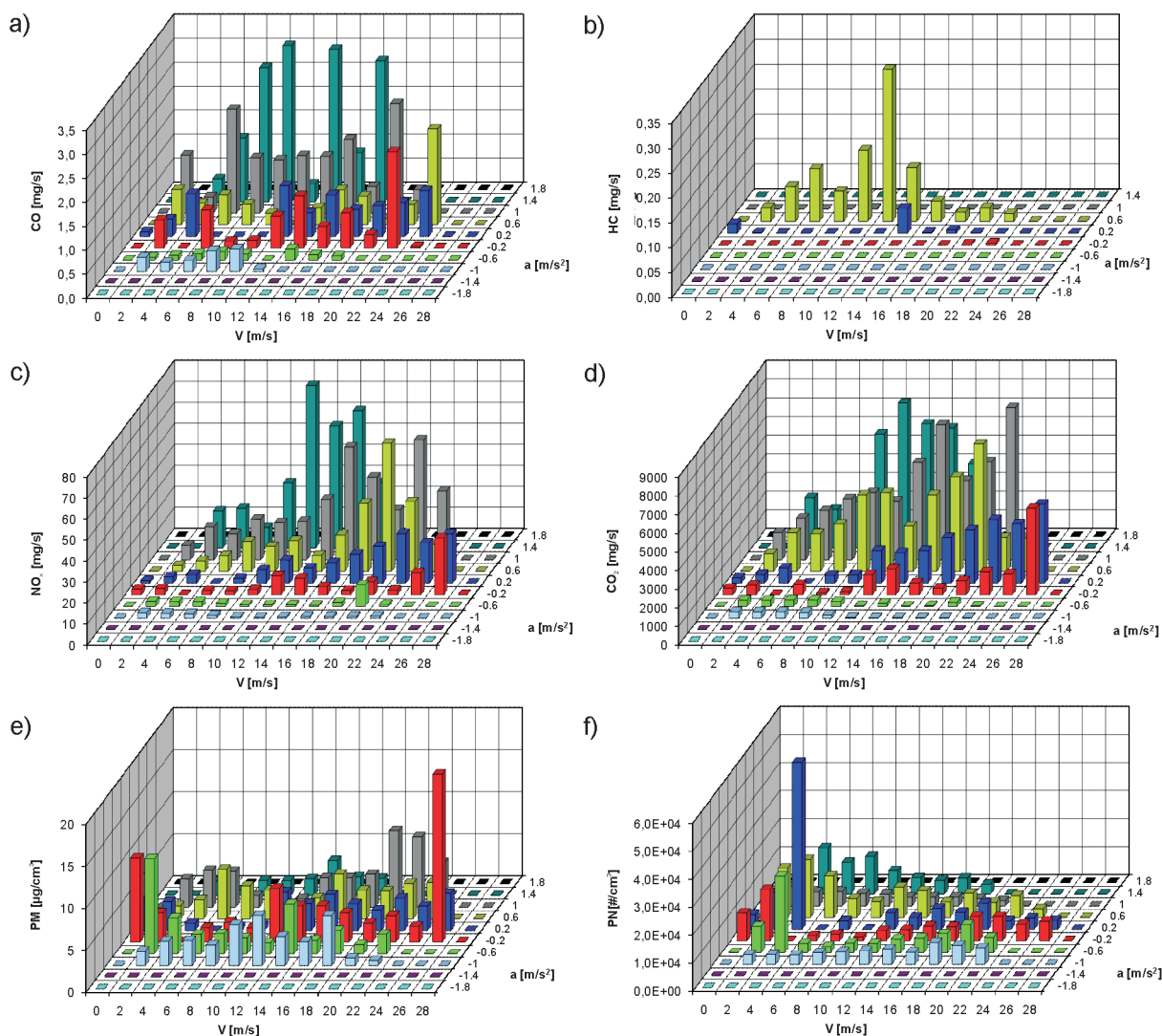
### Wyniki emisji we współrzędnych odniesionych do pojazdu

Maksymalne natężenia emisji tlenku węgla (rysunek 9a), określone w miligramach na sekundę, rozłożone są w obszarze wszystkich wykorzystywanych prędkości pojazdu oraz przyspieszeń z zakresu od  $-0,2$  do  $1 \text{ m/s}^2$ . Wartości te są skorelowane z przyspieszeniem pojazdu; w miarę wzrostu przyspieszenia wzrasta również emisja tlenku węgla.

Inaczej jest z emisją węglowodorów (rysunek 9b); zwiększona emisja HC występuje dla małych prędkości pojazdu oraz wartości przyspieszenia około  $0,6 \text{ m/s}^2$ . Obszar zwiększonego natężenia emisji tlenków azotu (rysunek 9c) przypada dla zakresu zwiększonych prędkości pojazdu oraz dla znacznego przyspieszenia pojazdu, a więc znacznego obciążenia silnika. Związane jest to ze zwiększeniem dawki paliwa i wzrostem prędkości obrotowej silnika.

Emisja dwutlenku węgla (rysunek 9d) ma zbliżony charakter do emisji tlenków azotu; obserwowany jest liniowy wzrost emisji  $\text{CO}_2$  przy wzroście prędkości (dla tej samej wartości przyspieszenia pojazdu).

Maksymalne stężenie masy cząstek stałych (rysunek 9e) przypada na przedział wysokiej prędkości (26 m/s) oraz niewielkiego opóźnienia ( $-0,2 \text{ m/s}^2$ ). W pozostałych przedziałach stężenie to przyjmuje wartości średnie ( $5\text{-}15 \mu\text{g/cm}^3$ ), niezależnie od prędkości pojazdu i przyspieszenia. Maksymalne wartości spowodowane są nagłym zwiększeniem dawki paliwa, co powoduje zmniejszenie współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  i zwiększoną emisję cząstek stałych. Zaprezentowano również zmiany koncentracji liczby cząstek stałych (rysunek 9f) w zależności od prędkości pojazdu oraz jego przyspieszenia. Maksymalna koncentracja cząstek występuje przy niewielkiej prędkości i przyspieszeniu (prędkości odpowiednio około  $4 \text{ m/s}$  i  $0,2 \text{ m/s}^2$ ) – wiąże się to bezpośrednio ze zmianą stanu silnika; gwałtowne przyspieszanie powoduje zwłokę w działaniu filtra cząstek stałych i zwiększoną chwilową koncentrację cząstek. W pozostałych przedziałach koncentracja cząstek nie przekracza  $20\ 000 \text{ cm}^{-3}$ . Zauważalną tendencją jest zmniejszanie liczby cząstek wraz ze wzrostem prędkości pojazdu.



Rys. 9. Emisja związków szkodliwych podczas badań drogowych, odniesiona do warunków pracy pojazdu: a) tlenku węgla, b) węglowodorów, c) tlenków azotu, d) dwutlenku węgla, e) masy cząstek stałych, f) liczby cząstek stałych

### Wyniki emisji w odniesieniu do silnika

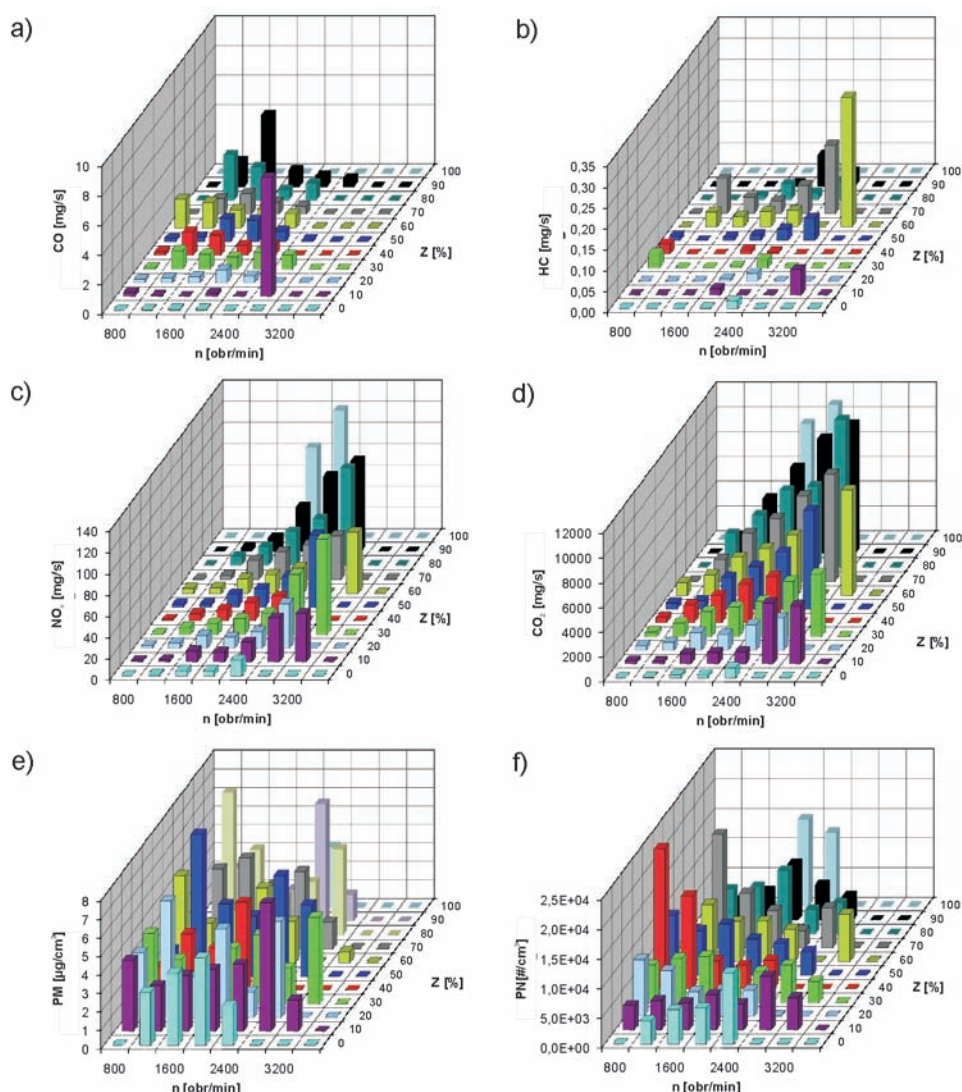
Prezentowane dane prędkości pojazdu oraz jego przyspieszenia można odnieść również do udziału pracy silnika. Dane te uśredniono w poszczególnych przedziałach prędkości obrotowej i obciążenia silnika, a następnie wykonano macierze natężenia (rysunek 10) poszczególnych szkodliwych składników spalin. Największa emisja dwutlenku węgla (rysunek 10a) zauważalna jest przy prędkościach 2400-2800 obr./min i największych obciążeniach silnika. Zbieżne maksymalne wartości przyjmuje emisja tlenków azotu (rysunek 10c). Spowodowane jest to wysoką temperaturą wewnątrz komory spalania i małym współczynnikiem nadmiaru powietrza  $\lambda$ . Odmienną sytuację zauważyć można przy emisji tlenku węgla, gdzie maksymalna wartość ma miejsce przy maksymalnych prędkościach obrotowych silnika (2800 obr./min) i jego minimalnych

obciążeniach (10%). Emisja węglowodorów (rysunek 10b) swoje maksymalne wartości przyjmuje przy maksymalnych prędkościach obrotowych (2800 obr./min) i dużych obciążeniach silnika (60-70%). Obszary maksymalnego stężenia cząstek stałych (rysunek 10e) w funkcji prędkości obrotowej i obciążenia silnika występują w kilku punktach pracy silnika. Największe stężenie ma miejsce przy niewielkiej prędkości obrotowej (1200 obr./min) i średnim – 50% obciążeniu silnika. Podobnie wysokie wartości emisji PM zauważyć można w zakresie: niewielkiego obciążenia silnika i wysokiej prędkości obrotowej (10%, 2800 obr./min); średniego obciążenia silnika i niskiej prędkości obrotowej (40-50%, 800-1200 obr./min) oraz dużego obciążenia silnika (80-90%) i odpowiednio: niskiej (800 obr./min) i średniej (2400 obr./min) prędkości



obrotowej silnika badanego pojazdu. Dodatkowo wykonano również charakterystykę koncentracji cząstek stałych w funkcji prędkości obrotowej silnika i jego obciążenia

(rysunek 10f): maksymalną wartość przyjmuje ona przy minimalnej prędkości obrotowej (800 obr./min) i średniej wartości obciążenia silnika (40%).



**Rys. 10.** Emisja związków szkodliwych podczas badań drogowych, odniesiona do warunków pracy silnika: a) tlenku węgla, b) węglowodorów, c) tlenków azotu, d) dwutlenku węgla, e) masy cząstek stałych, f) liczby cząstek stałych

### Analiza emisji cząstek stałych

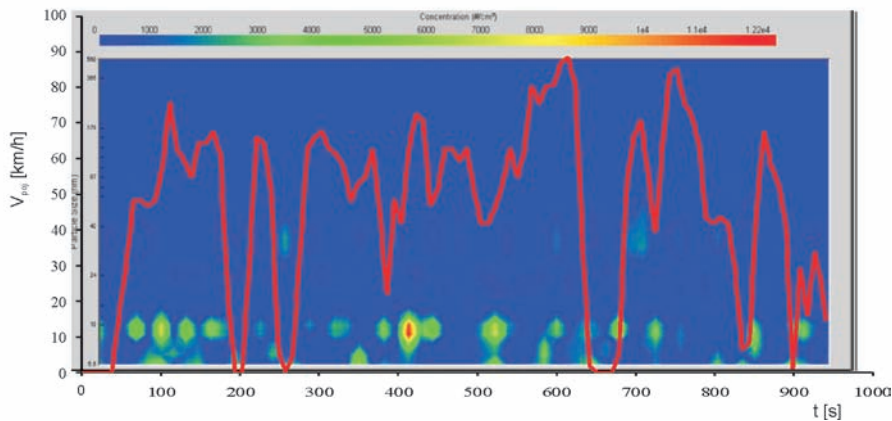
Dane rejestrowane ze spektrometru EEPST<sup>TM</sup> firmy TSI pozwoliły podczas testu miejskiego na wykreślenie charakterystyk koncentracji cząstek stałych w zależności od ich średnic; na wykres naniesiono profil prędkości pojazdu w danej chwili (rysunek 11). Największa koncentracja cząstek stałych uwidacznia się przy gwałtownych wzrostach prędkości pojazdu.

W celu dokładnej analizy emisji cząstek, dane te uśredniono w okresach 10-sekundowych. Największa koncentracja cząstek występuje dla średnic poniżej 20 nm (rysunek 12). Pewna niewielka koncentracja cząstek występuje

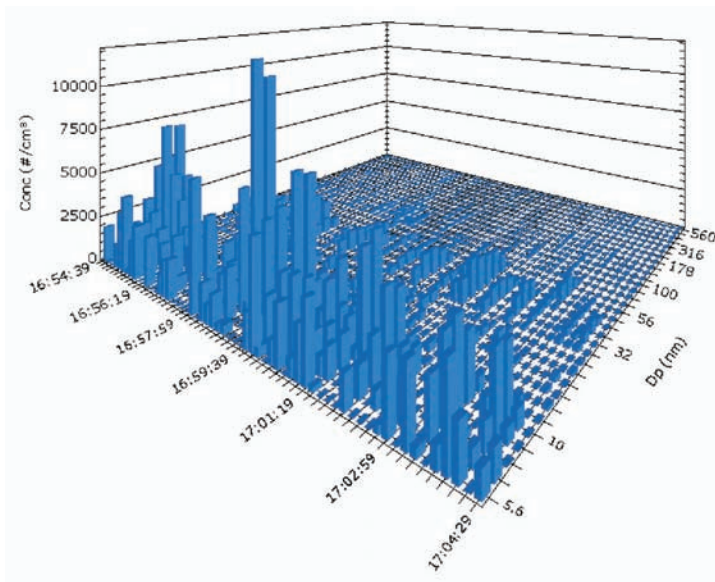
również w zakresie średnic 32-56 nm. W pozostałych zakresach nie zaobserwowano znacznej koncentracji cząstek stałych w spalinach pojazdu.

Analizowano również zależność koncentracji cząstek w odniesieniu do charakterystycznych punktów pracy silnika i pojazdu. W tym celu wykreślono zależność obciążenia silnika od jego prędkości obrotowej (rysunek 3a) oraz od prędkości pojazdu (rysunek 13b). Wykresy podzielono na dziewięć obszarów. Z wartości w obszarach obliczono średnią i na tej podstawie wykreślono charakterystyki koncentracji cząstek oraz ich rozkładu średnicowego

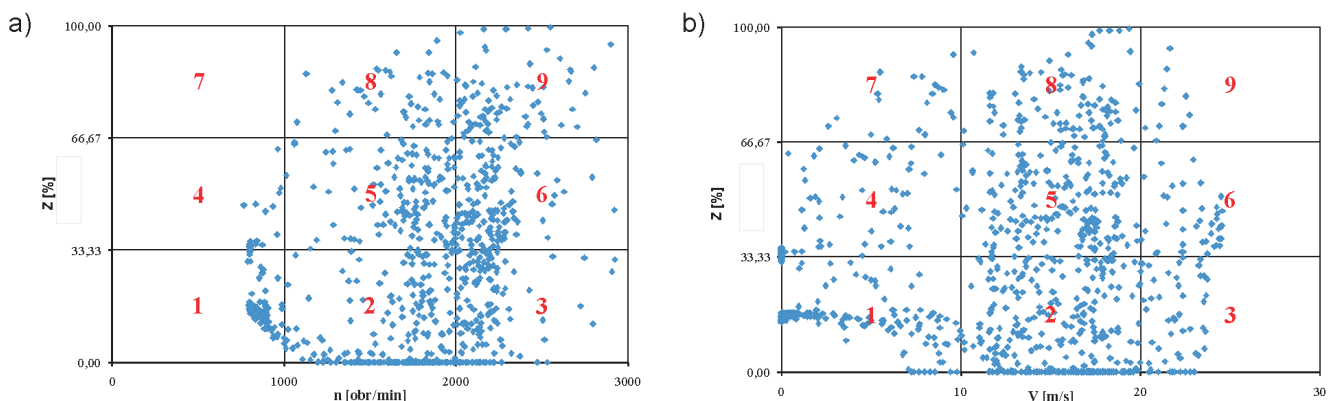




**Rys. 11.** Charakterystyka liczby cząstek stałych w zależności od ich średnicy, jako funkcja czasu trwania testu miejskiego na tle prędkości pojazdu



**Rys. 12.** Charakterystyka liczby cząstek stałych w zależności od ich średnicy, podczas testu drogowego (fragment całości)

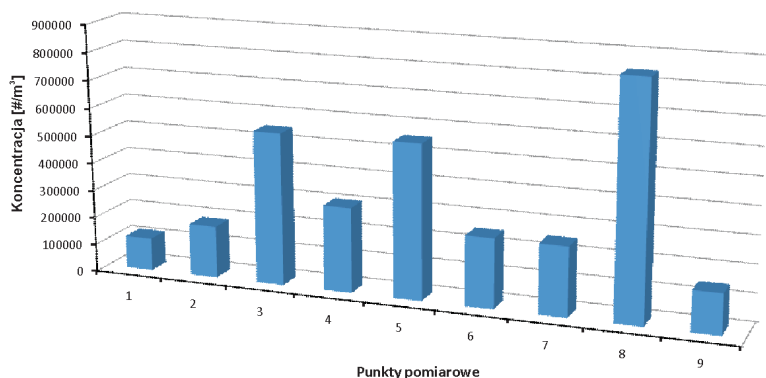


**Rys. 13.** Charakterystyka zależności procentowego obciążenia silnika od jego prędkości obrotowej (a) oraz od prędkości pojazdu (b)

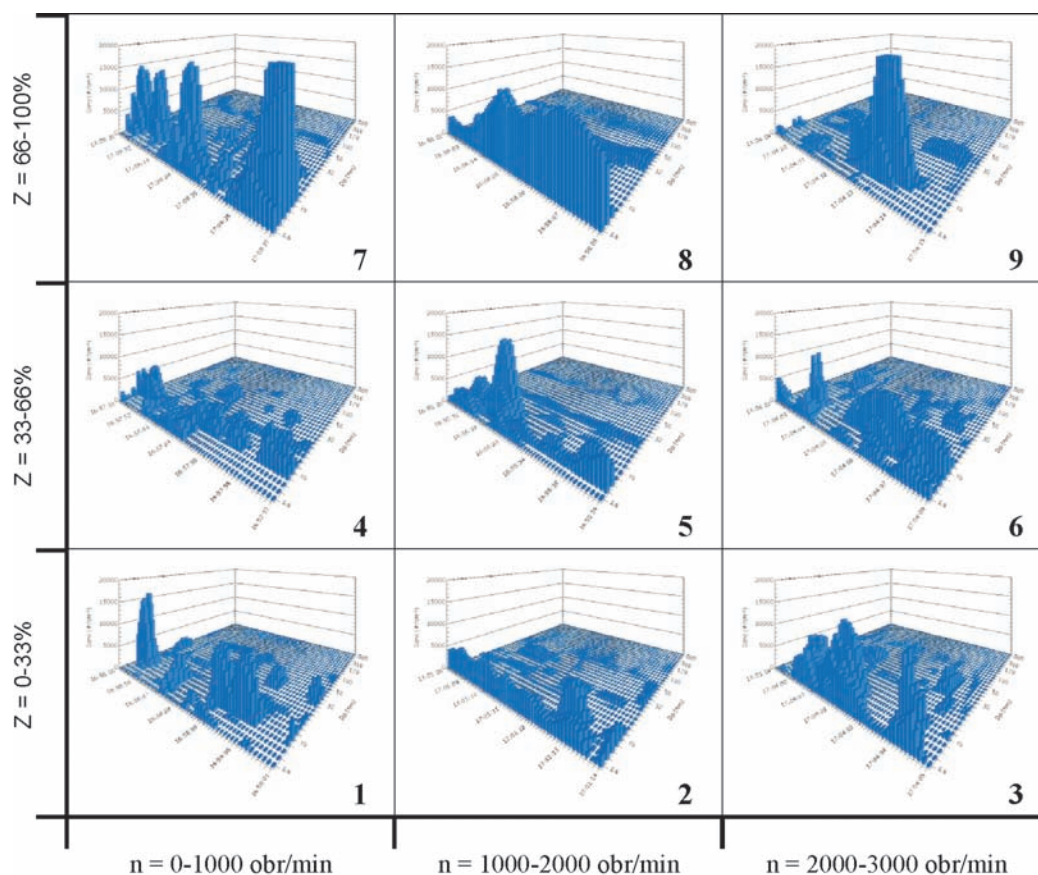
w poszczególnych punktach pracy silnika. Największa koncentracja cząstek stałych występuje w zakresie najbardziej obciążonego silnika i największej prędkości pojazdu. Dodatkowo wykonano wykres przedstawiający całkowitą liczbę cząstek stałych wyemitowanych w danych przedziałach pomiarowych (rysunek 14). Zauważalna maksymalna emisja cząstek znajduje się w przedziale 8, czyli w warunkach dużego obciążenia i średniej prędkości obrotowej.

Najmniejsza obserwowana jest w warunkach małego obciążenia i małej prędkości obrotowej.

Na podstawie powyższych danych wykreślono koncentrację cząstek stałych w zależności od obciążenia i prędkości obrotowej silnika (rysunek 15). Przedstawiono charakterystyczny rozkład wielkości cząstek stałych, rejestrowany w badanych stanach pracy silnika. W celu porównania wykresów przyjęto jednakową skalę na osi koncentracji cząstek. Poszczególne obszary, określone prędkością obrotową silnika i obciążeniem, charakteryzują się różnym rozkładem widmowym cząstek stałych. Największa liczba najmniejszych cząstek stałych jest emitowana podczas pracy silnika w zakresie dużego obciążenia i średniej prędkości obrotowej (rysunek 15, obszar 8). Cząstki o większych średnicach są sukcesywnie wychwytywane przez filtr cząstek stałych.



Rys. 14. Całkowita liczba cząstek stałych w poszczególnych punktach pomiarowych (wykres odnosi się do danych z rysunku 13b)



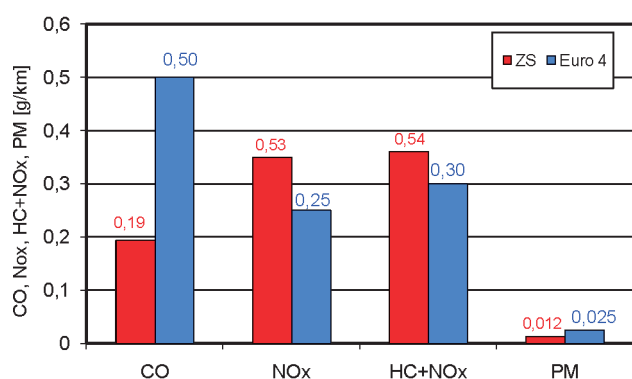
Rys. 15. Charakterystyka koncentracji cząstek w poszczególnych punktach pomiarowych (skala osi pionowej – liczby cząstek stałych – na wykresach jest stała)

### Ilościowe wskaźniki emisji

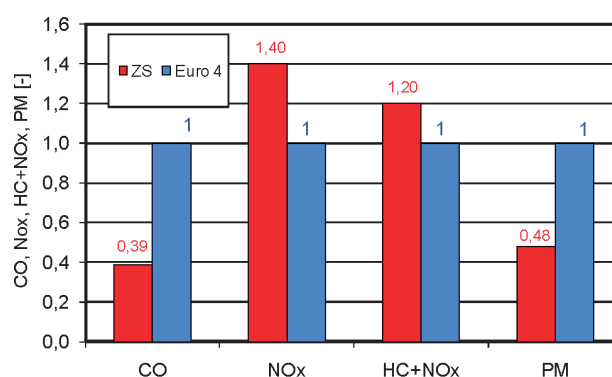
Ilościowe wskaźniki emisji z pojazdu przedstawiono w postaci łącznej skumulowanej masy danego związku szkodliwego. Wykorzystując wartości skumulowanej emisji związków szkodliwych oraz wartości rejestrowanych danych z systemu lokalizacji GPS, określono długość drogi podczas wykonywania testu, a następnie określono średnią emisję drogową dla każdego związku szkodliwego (rysunek 16). Dla badanego pojazdu przekroczona jest emisja NO<sub>x</sub> oraz suma HC i NO<sub>x</sub> (główny wpływ na to ma emisja tlenków azotu), w stosunku do normy Euro 4.

Z przedstawionych wyników, m.in. z charakterystyk udziału czasu pracy pojazdu w danych przedziałach prędkości i przyspieszenia oraz charakterystyk natężenia emisji, można obliczyć krotność zwiększenia/zmniejszenia emisji w rzeczywistych warunkach ruchu, w stosunku do testu homologacyjnego. Wskaźnik emisyjności pojazdu (dla danego związku szkodliwego) zdefiniowano następująco:

$$k_j = \frac{E_{recz,j}}{E_{NEDC,j}} \quad (1)$$



**Rys. 16.** Porównanie wartości emisji drogowej w teście drogowym dla pojazdu zasilanego olejem napędowym oraz wartości emisji określonej normą Euro 4



**Rys. 17.** Porównanie wskaźnika emisyjności pojazdu z wykorzystaniem danych o rzeczywistej emisji w teście drogowym

gdzie:

$j$  – związek szkodliwy, dla którego określono wskaźnik emisyjności,

$E_{rzecz,j}$  – natężenie emisji uzyskane w warunkach rzeczywistych [g/s],

$E_{NEDC,j}$  – natężenie emisji uzyskane w teście NEDC [g/s].

Natężenie emisji w warunkach rzeczywistych można obliczyć wykorzystując charakterystykę rozkładu czasu jazdy pojazdu ( $u_{a,V}$ ) oraz charakterystykę natężenia emisji dla  $j$ -tego związku szkodliwego  $e_j(a,V)$ , wyrażonego w gramach na sekundę:

$$E_{rzecz,j} = \sum_a \sum_V u_{a,V} \cdot e_j(a,V) \quad (2)$$

Wartość emisji związków szkodliwych w teście homologacyjnym wyznaczono w badaniach na hamowni podwozowej. Jeżeli brak jest informacji na temat emisji związków szkodliwych z pojazdu w teście NEDC, można przyjąć wartości dopuszczalne według normy toksyczności spalin Euro, która obowiązuje dla danego pojazdu. War-

tości emisji dopuszczalnej dla danego związku podawane w g/km można przeliczyć na wartości natężenia emisji (w g/s), znając czas trwania (1180 s) i pokonywany dystans (11 007 m) w teście homologacyjnym. Zależności takie posłużyły do wyznaczenia wskaźników emisyjności dla związków szkodliwych badanego pojazdu (rysunek 17).

Uzyskany wskaźnik emisyjności dla pojazdu zasilanego olejem napędowym charakteryzuje jego emisyjność w warunkach drogowych, w odniesieniu do normy emisji spalin, którą pojazd powinien spełniać. Wartość wskaźnika emisji tlenku węgla ( $k_{CO} = 0,39$ ) i cząstek stałych ( $k_{PM} = 0,48$ ) świadczy o nieprzekraczaniu średniej emisji tych składników w warunkach drogowych, w stosunku do normy Euro 4. Odmienne jest dla emisji tlenków azotu; wskaźnik ten wynosi  $k_{NOx} = 1,4$ , a więc średnia emisja jest o 40% większa w stosunku do normy toksyczności spalin Euro 4. Dla sumy emisji HC + NO<sub>x</sub> (norma Euro 4 limituje sumę tych związków dla silników ZS) wskaźnik emisyjności wynosi powyżej jedności ( $k_{HC+NOx} = 1,2$ ), a więc norma (według której był homologowany pojazd) jest przekroczona o 20%.

## Podsumowanie

Z analizy danych wynika, że dla badanego pojazdu wartości emisji uzyskane w teście homologacyjnym NEDC (spełniającego normę Euro 4) i wartości w rzeczywistej eksploatacji różnią się między sobą. Różnice te w przypadku niektórych związków są znaczne, co oznacza, że emisja CO jest mniejsza o ok. 60%, emisja NO<sub>x</sub> jest większa o ok. 40%, emisja HC + NO<sub>x</sub> jest większa o ok. 20%, natomiast emisja PM jest mniejsza o ok. 50% w sto-

sunku do normy emisji spalin, którą pojazd powinien spełniać. Wyniki badań prowadzonych w warunkach rzeczywistych wskazują, że w przypadku niektórych składników toksycznych gazów wydechowych emisja ta jest większa o kilkadziesiąt procent. W związku z powyższym dostrzegalny jest trend usankcjonowania pomiaru emisji związków szkodliwych w warunkach rzeczywistej eksploatacji pojazdów w Europie.

Recenzent: doc. dr Michał Krasodomski



## Literatura

- [1] Gao Y., Checkel M.D.: *Emission Factors Analysis for Multiple Vehicles Using an On-Board, In-Use Emissions Measurement System*. SAE Paper 2007-01-1327, 2007.
- [2] Greening P.: *European Light-Duty & Heavy Duty OBD – Legislative Update*. On-Board Diagnostic Symposium: Light and Heavy Duty, 2007.
- [3] Jehlik H.: *Challenge X 2008 – Hybrid Powered Vehicle On-Road Emissions Findings and Optimization Techniques: A 4 Year Summary*. Sensors 5th Annual SUN (SEMTECH User Network) Conference, 25-26.09.2008.
- [4] Johnson K., Durbin T., Cocker D., Miller J., Agama R., Moynahan N., Nayak G.: *On-Road Evaluation of a PEMS for Measuring Gaseous In-Use Emissions from a Heavy-Duty Diesel Vehicle*. SAE Technical Paper Series 2008-01-1300.
- [5] Khair M., Khalek I., Guy J.: *Portable Emissions Measurement for Retrofit Applications – The Beijing Bus Retrofit Experience*. SAE Technical Paper Series 2008-01-1825.
- [6] Khalek I.: *Status Update on the PM-PEMS Measurement Allowance Project*. Sensors 5th Annual SUN (SEMTECH User Network) Conference, 25-26.09.2008.
- [7] Korniski T., Gierczak C., Wallington T.: *Laboratory Evaluation of the 2.5 Inch Diameter SEMTECH® Exhaust Flow Meter with Gasoline Fueled Vehicles*. Sensors 4th Annual SUN (SEMTECH User Network) Conference, 2007.
- [8] Merkisz J., Pielecha J., Gis. W.: *Gasoline and LPG Vehicle Emission Factors in a Road Test*. SAE Technical Paper Series 2009-01-0937. SAE World Congress, Detroit 2009.
- [9] Palocz-Andresen M.: *Completion of the OBD- with the OBM-(On-Board-Measurement)-Technology*. [In:] Predelli O.: *Onboard-Diagnose II*, Expert Verlag, 2007.
- [10] Processing CITA Conference *Global Perspective on Roadworthiness Enforcement*, organized by International Motor Vehicle Inspection Committee. Chicago 24-28.05.2005.
- [11] Quan H.: *ARB's Stockton Heavy-Duty Vehicle Laboratory and Portable Emission Monitoring System (PEMS) Activities*. Sensors 5th Annual SUN (SEMTECH User Network) Conference, 25-26.09.2008.
- [12] Tsinoglou D., Koltsakis G., Samaras Z.: *Performance of OBD Systems for Euro 4 Level Vehicles and Implications for the Future OBD Legislation*. [In:] Predelli O.: *Onboard-Diagnose II*, Expert Verlag, 2007.

## ZAKŁAD OCENY WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNYCH

Zakres działania:

- badania właściwości użytkowych paliw silnikowych w testach stanowiskowych (LO, LC, Mercedes M102 i M111, Peugeot XUD9);
- oznaczanie stabilności oksydacyjnej biopaliw (test Rancimat);
- ocena właściwości użytkowych paliw i olejów smarowych w badaniach eksploatacyjnych;
- ocena wybranych, fizykochemicznych właściwości użytkowych paliw i środków smarowych (oddziaływanie na metale i elastomery, odporność na działanie wody, odporność na utlenianie, skłonność do pienienia, stabilność podczas przechowywania);
- ocena właściwości smarnych olejów napędowych (test HFRR) oraz środków smarowych i cieczy hydraulicznych;
- oznaczanie zanieczyszczeń paliw i środków smarowych;
- oznaczenia właściwości reologicznych olejów w szerokim zakresie temperatur (testy CCS, HTHS, MRV, Brookfield);
- ocena kompatybilności dodatków do paliw i olejów smarowych;
- ocena stopnia degradacji olejów smarowych w badaniach stanowiskowych i podczas eksploatacji u użytkownika;
- badania pasywnej regeneracji filtrów cząstek stałych na stanowisku z silnikiem o zapłonie samoczynnym.

**Kierownik:** dr inż. Stanisław Oleksiak

**Adres:** ul. Łukasiewicza 1, 31-429 Kraków

**Telefon:** 12 617-74-29

**Faks:** 12 617-74-40, 12 617-75-22

**E-mail:** stanislaw.oleksiak@inig.pl

