

Exhaust emissions during cold start gasoline and diesel engine from passenger cars

Abstract: The paper presents the results of the measurements of exhaust emissions from passenger vehicles fitted with different types of engines. The purpose of the investigations was to verify the emissions from vehicles of different powertrains and different wear and, at the same time, to classify the emissions against the Euro standards. As a result the paper classifies vehicles according to their exhaust emission level depending on the Euro standard complied with by a given vehicle, and, at the same time the exhaust emission characteristics are obtained in relation to the period of vehicle use. Differences were indicated in individual exhaust concentration values between gasoline and diesel engines and the obtained results were synthesized.

Key words: cold start, gasoline and diesel emissions

Badania emisji spalin podczas rozruchu silników ZI i ZS pojazdów osobowych

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wyniki pomiarów emisji cząstek stałych (masy – PM, liczby – PN, rozkładu wymiarów) z pojazdów samochodowych z różnymi typami silników spalinowych. Celem badań była weryfikacja emisji cząstek stałych dla pojazdów o różnych typach zasilania i o różnych okresach eksploatacji, a jednocześnie próba klasyfikacji względem norm Euro. W efekcie w artykule sklasyfikowano pojazdy według emisyjności w zależności od normy spełnianej przez pojazd, a jednocześnie uzyskano charakterystykę emisji, uzależniając ją od okresu eksploatacji pojazdów wyposażonych w różne typy silników. Wskazano na różnice w poszczególnych wartościach emisji pojazdów z silnikami ZI i ZS oraz dokonano syntezy uzyskanych wyników.

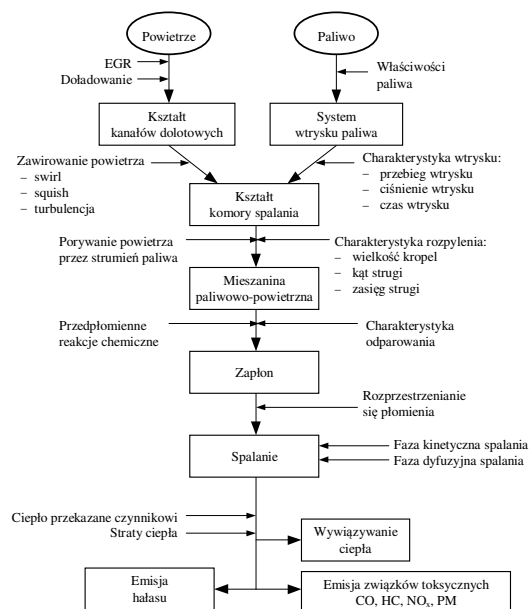
Słowa kluczowe: rozruch silników, emisja spalin

1. Wprowadzenie

Uwzględniając ciągle zaostrzenie przepisów ograniczających emisję związków szkodliwych w spalinach, jako zasadne uznać należy rozpoznanie każdej przyczyny takiej emisji oraz jej wyeliminowanie lub ograniczenie [1, 8, 9]. Za jedną z takich przyczyn uważa się zbyt mały stopień nagrzania silnika, który występuje przede wszystkim podczas zimnego rozruchu. Limity emisji związków szkodliwych w spalinach zmuszają producentów do skracania fazy zimnej i jednocześnie do procentowego zmniejszania udziału emisji podczas zimnego rozruchu w całkowitej emisji szkodliwych związków wydzielanych przez silnik. Okres rozruchu i nagrzewania silnika wchodzi w zakres obowiązujących aktualnie testów, określających wielkość emisji toksycznych związków w spalinach. Wartość emisji z tego okresu, ze względu na brak wydajnej pracy urządzeń oczyszczających spaliny (poniżej 300°C), ma znaczący udział w ostatecznych wynikach testów jezdnych.

Należy zauważyć, że znaczący wpływ na emisję poszczególnych substancji toksycznych w spalinach mają procesy fizyczne, a nie chemiczne, oraz że ich emisja jest ze sobą ściśle powiązana i możliwość obniżenia emisji jednego ze składników może spowodować wzrost emisji innego (rys. 1). Stąd wszelkie działania zmierzające do obniżenia zawartości toksyn w spalinach muszą polegać na znalezieniu

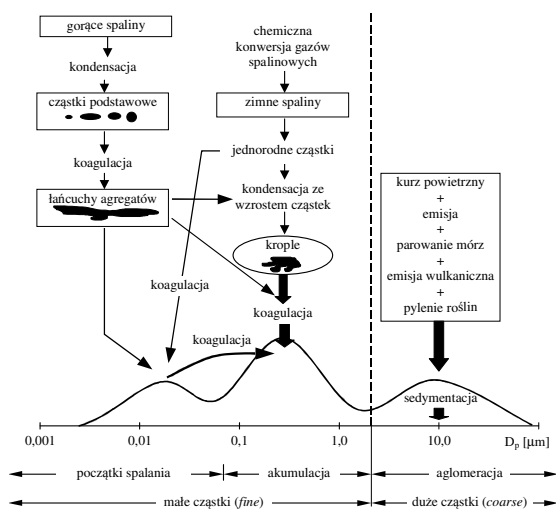
kompromisu, dzięki któremu negatywny wpływ składników na środowisko będzie relatywnie najmniejszy [2, 10].



Rys. 1. Schemat procesu mieszania i spalania w silniku ZS oraz jego skutki [7]

Fig. 1. Processes and interactions during mixture formation and combustion of a diesel engine [7]

Zwiększające się wymagania związane z ochroną powietrza atmosferycznego powodują konieczność zwrócenia uwagi na emitowanie przez silniki ZI i ZS dużych ilości cząstek o wymiarach poniżej 100 nanometrów (dla silników ZI są to rozmiary 40÷80 nm) [5, 6], które są bardzo niebezpieczne dla zdrowia (rys. 2). Należy więc się spodziewać, że po roku 2014 (wraz w wprowadzeniu limitów Euro 6) będą wprowadzone dodatkowo limity emisji cząstek o wymiarach nanometrycznych, w tym także dla silników ZI DI. Nanocząstki stanowią zdecydowaną większość całkowitej ilości cząstek emitowanych przez silnik, zaś udział ich masy jest bardzo mały w porównaniu z całkowitą masą emitowanych cząstek. Dotychczasowy grawimetryczny sposób określania wielkości emisji cząstek nie jest więc całkowicie przydatny do oceny emisji nanocząstek. Z wprowadzeniem ograniczeń emisji nanocząstek będą się wiązać inne metody pomiaru, które obecnie znajdują się w trakcie rozwoju (m.in. PMP *Particulate Measurement Programme*) [3, 11]. Do nowych metod należą metody pomiaru liczby cząstek stałych (CPC – *Condensation Particle Counter*), a także ich rozkładu wymiarów (np. spektrometrem masowym na podstawie prędkości i ruchliwości elektrostatycznej cząstek) [4].



Rys. 2. Schemat tworzenia różnych rozmiarów cząstek i masowy rozkład tej emisji [3]

Fig. 2. Processes during formation and PM mass distribution [3]

2. Cel badań

Celem badań było porównanie natężenia emisji samochodów osobowych użytkowanych w Polsce, które spełniają kolejne normy toksyczności spalin (różniące się m.in. datą produkcji).

Pomiarów emisyjności dokonano podczas zimnego rozruchu (temperatura otoczenia: 4÷7°C) pojazdów (w liczbie 20 szt.) wyposażonych w silniki ZI oraz ZS (rys. 3). Pojazdy wybrane do badań były wyposażone w silniki ZI z układem wtrysko-

wym jednopunktowym (norma emisji Euro 1) oraz wielopunktowym (Euro 2÷Euro 4). Wszystkie pojazdy były wyposażone w reaktor katalityczny; natomiast pojazdy z silnikami ZS były wyposażone w układ wtryskowy z pompą rzędową (Euro 1), układem Common Rail (Euro 3÷Euro 4) lub pompowtryskiwaczami (Euro 4) współpracujące jednocześnie z reaktorem utleniającym lub filtrem cząstek stałych. Przebieg pojazdów również był zróżnicowany (od 20 000 do 280 000 km).



Rys. 3. Widok pojazdu wykorzystanego w badaniach wraz z aparaturą pomiarową

Fig. 3. View of the vehicle used in the study with the measuring analyzers

3. Metodyka badań

Badania wykonano w godzinach porannych po 12-godzinnym okresie postoju pojazdu w temperaturze otoczenia 4÷7°C. Pomiaru dokonywano od chwili rozruchu zimnego silnika (włącznie) i występującego bezpośrednio po nim nagrzewania (przez okres 5 min). Do wykonania założonego zakresu badań wykorzystano (rys. 4):

1) aparaturę służącą do pomiaru emisji głównych związków gazowych (CO, HC, NO_x, CO₂) wykorzystującą grzaną drogę gazową oraz umożliwiającą pomiar natężenia przepływu spalin (Semtech DS firmy Sensors Inc.); wartości natężenia spalin wykorzystano podczas pomiarów masy cząstek stałych;

2) aparaturę do pomiaru stężenia cząstek stałych łącznie z układem kondycjonowania próbki – układem rozcieńczania spalin (Micro Soot Sensor firmy AVL);

3) układ rozcieńczania spalin umożliwiający również wykorzystanie spektrometru masowego (Engine Exhaust Particle Sizer 3090 firmy TSI); dane dotyczące rozkładu wymiarowego cząstek stałych posłużyły do oceny silników pod względem ilościowym emisji cząstek w określonych zakresach pomiarowych ich średnic.

Podczas pomiarów mierzono stężenie związków szkodliwych w okresie rozruchu i pierwszych pięciu minut bezpośrednio po nim. Aby móc porównywać pomiary natężenia emisji odniesiono je do

czasu pomiaru (5 min) oraz do objętości skokowej silnika. W ten sposób uzyskano miarodajny wskaźnik dający się porównywać niezależnie od rodzaju i objętości skokowej silnika.



Rys. 4. Analizatory wykorzystane do badań
Fig. 4. Analyzers used to research

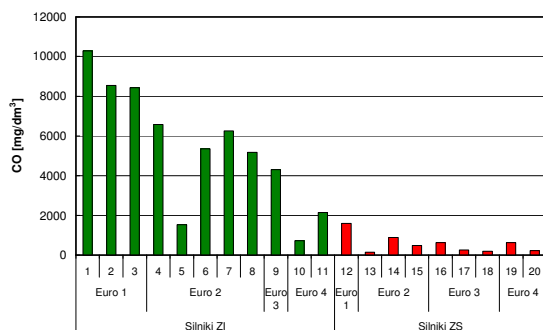
4. Uzyskane wyniki badań

W ramach realizacji celu badań uzyskano wyniki stężenia związków szkodliwych i cząstek stałych zawartych w spalinach. Dodatkowo dokonywano pomiaru liczby cząstek stałych i ich rozkładu wymiarów.

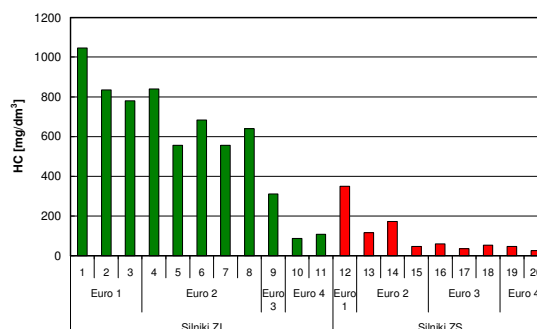
Na kolejnych rysunkach porównano emisję związków szkodliwych odniesionych do objętości skokowej silnika w okresie pomiarowych pięciu minut od rozruchu zimnego silnika.

Porównanie emisji tlenku węgla (rys. 5) dla silników ZI i ZS, spełniające różne normy Euro (a więc różniące się datą produkcji) uwidacznia znaczącą zależność w przypadku silników ZI (im starszy pojazd tym większa emisja rozruchowa tego związku). Dla silników ZS zależność ta nie jest tak znacząca, gdyż silniki te charakteryzowały się znacznie mniejszą emisją rozruchową.

Podobną zależność wykazywały silniki w odniesieniu do emisji węglowodorów (rys. 6). Podobieństwo do emisji tlenku węgla jest znaczne, jednakże poziom emisji jest około 10-krotnie mniejszy.



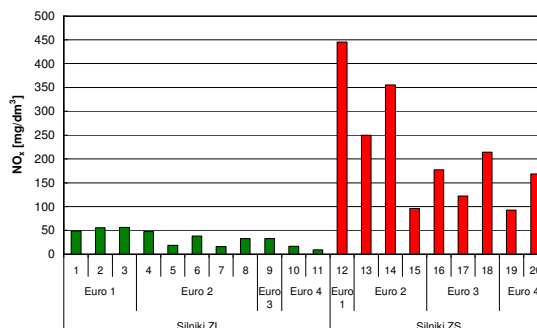
Rys. 5. Objętościowy współczynnik emisji CO podczas rozruchu i nagrzewania
Fig. 5. CO emission during cold start and idle



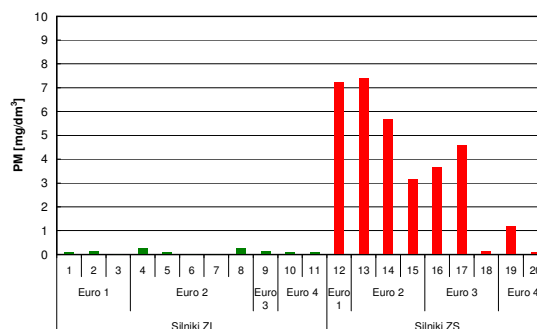
Rys. 6. Objętościowy współczynnik emisji HC podczas rozruchu i nagrzewania
Fig. 6. CO emission during cold start and idle

Porównanie emisji tlenków azotu dla silników ZI i ZS jest odmienne niż w poprzednich przypadkach (rys. 7). Emisja z silników ZS jest ok. pięciokrotnie większa niż w silnikach ZI (dla pojazdów spełniających normę Euro 1 i Euro 2), natomiast dla pojazdów najnowszych o nieznacznym przebiegu różnica jest 10-krotna.

Emisja masy cząstek stałych (rys. 8) określona dla silników ZS była około 50 razy większa (średni poziom emisji dla pojazdów spełniających normę Euro 1/2 to ok. 5 mg/dm³) niż dla silników ZI (średni poziom emisji PM to poniżej 0,1 mg/dm³). Wynika z tego mała emisja masy cząstek stałych z silników ZI nawet podczas rozruchu zimnego silnika.

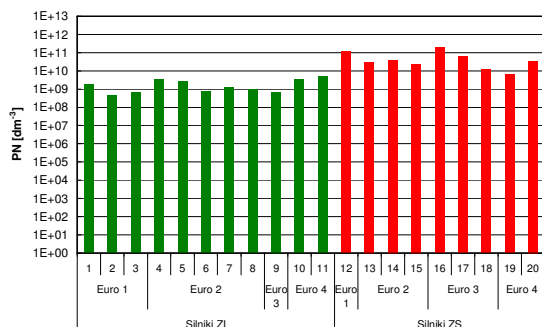


Rys. 7. Objętościowy współczynnik emisji NOx podczas rozruchu i nagrzewania
Fig. 7. NOx emission during cold start and idle



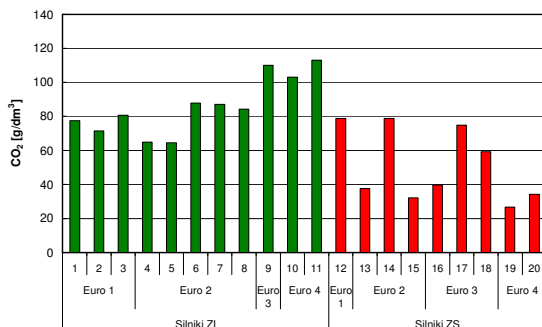
Rys. 8. Objętościowy współczynnik emisji PM podczas rozruchu i nagrzewania
Fig. 8. PM emission during cold start and idle

Rozpatrując liczbę cząstek stałych (rys. 9) można zauważyć, że jest ona dla różnych silników właściwie niezależna od przebiegu pojazdu. Dla silników ZI obserwowano liczbę cząstek $1 \times 10^9 \text{ dm}^{-3}$ w okresie 5 min, natomiast dla silników ZS była to wartość $1 \div 10 \times 10^{10} \text{ dm}^{-3}$ w tym samym okresie pomiarowym. Był to więc poziom około 10÷100 razy mniejszy dla silników ZI w porównaniu z silnikami ZS.



Rys. 9. Liczba cząstek podczas rozruchu i nagrzewania
Fig. 9. Particle number during cold start and idle

Emisja dwutlenku węgla dla badanych pojazdów (rys. 10) była większa dla silników ZI o około 20–50%. Jest to spowodowane przede wszystkim zależnością stałego współczynnika nadmiaru powietrza dla silnika ZI, natomiast dla silnika ZS nadmiar powietrza na biegu jałowym jest na tyle duży, że porównanie objętościowego współczynnika emisji CO₂ (a tym samym zużycia paliwa) wypada na korzyść silników ZS.



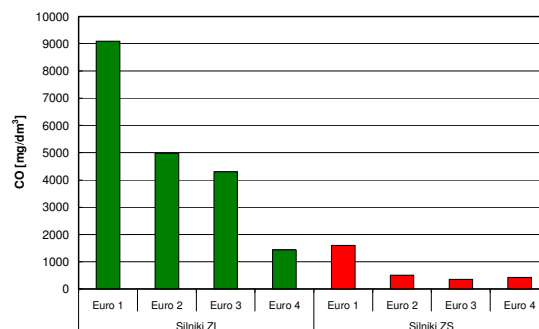
Rys. 10. Objętościowy współczynnik emisji CO₂ podczas rozruchu i nagrzewania
Fig. 10. CO₂ emission during cold start and idle

5. Klasyfikacja pojazdów pod względem emisyjnym

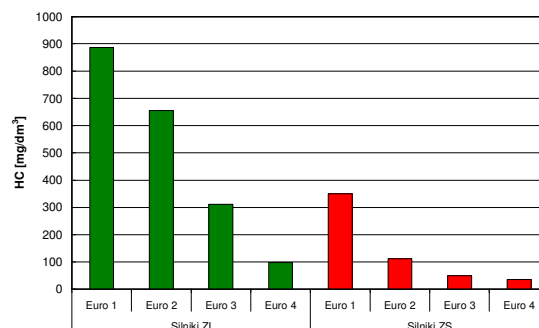
Określenie wartości średnich z poprzednich pomiarów pozwoliło na klasyfikację pojazdów pod względem emisyjnym. Wyznaczenie średnich wartości emisji wskazuje jakie zmiany w emisji podczas rozruchu i nagrzewania się silników uzyskano przy zmianie normatywów toksyczności spalin.

Dla emisji tlenku węgla wyraźna jest tendencja zmniejszania szkodliwej emisji podczas rozruchu i nagrzewania się silnika. Dla pojazdów z silnikami ZI spełniających normę Euro 4 obserwuje się około 10-krotne zmniejszenie emisji w stosunku do pojazdu spełniającego normę Euro 1 (rys. 11). Mniejsze różnice zanotowano dla pojazdów z silnikami ZS (zmniejszenie około 4 razy).

Bardzo zbliżone krotności zmniejszenia otrzymano porównując emisję węglowodorów (rys. 12). W tym przypadku porównując emisję pojazdów kategorii Euro 1 do pojazdów kategorii Euro 4 otrzymuje się 10-krotne zmniejszenie emisji (zarówno dla silników ZI, jak również ZS).

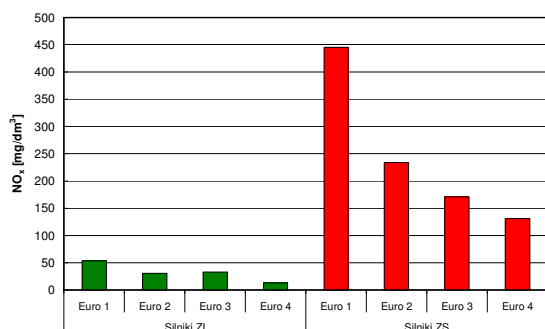


Rys. 11. Objętościowy współczynnik emisji CO dla pojazdów spełniających normy Euro 1÷Euro 4
Fig. 11. CO emissions from Euro 1÷Euro 4 passenger cars



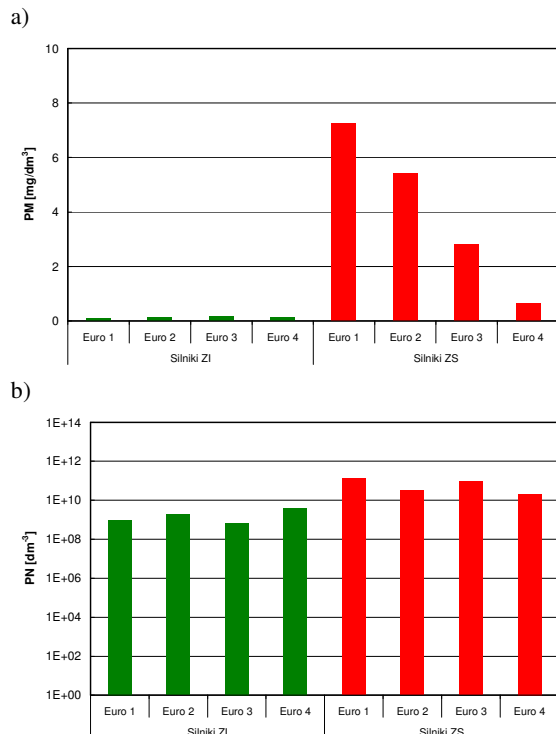
Rys. 12. Objętościowy współczynnik emisji HC dla pojazdów spełniających normy Euro 1÷Euro 4
Fig. 12. HC emissions from Euro 1÷Euro 4 passenger cars

Klasyfikacja pojazdów pod względem emisji tlenków azotu (rys. 13), uwidacznia 10-krotnie większą emisję tego związku z silników ZS w stosunku do silników ZI. Objętościowy współczynnik emisji dla silników ZI nie przekroczyła 50 mg/dm³, natomiast dla silników ZS była to wartość ok. 450 mg/dm³. Porównując pojazdy według kategorii emisji można stwierdzić 5-krotną redukcję tego związku dla pojazdów spełniających normę Euro 4, w stosunku do pojazdów spełniających normę Euro 1 (niezależnie czy porównanie dotyczy pojazdów z silnikami ZI czy ZS).



Rys. 13. Objętościowy współczynnik emisji NOx dla pojazdów spełniających normy Euro 1÷Euro 4
Fig. 13. NOx emissions from Euro 1÷Euro 4 passenger cars

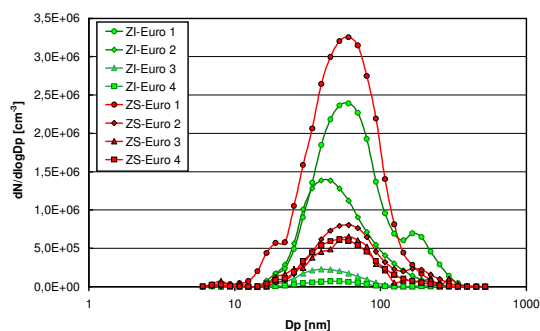
Wykonane pomiary pozwoliły na uzyskanie informacji jakościowej i ilościowej o emisji cząstek stałych (masy, liczby, rozkładu wymiarów) podczas rozruchu pojazdów z różnymi konfiguracjami napędów. Uzyskane dane dotyczące emisji PM (rys. 14a) odniesione do jednostkowej pojemności silników wskazują na 70-krotnie większą emisję silników ZS w stosunku do Zi dla normy Euro 1 oraz 10-krotnie większą emisję dla normy Euro 4 (dla silnika bez filtra cząstek stałych). Natomiast liczba cząstek stałych z silników ZS jest około 200 razy większa niż silników Zi podczas ich rozruchu (rys. 14b).



Rys. 14. Objętościowy współczynnik emisji PM (a) i liczba (b) cząstek stałych dla pojazdów spełniających normy Euro 1÷Euro 4
Fig. 14. Particle mass (a) and particle number (b) emissions from Euro 1÷Euro 4 passenger cars

Wykorzystując spektrometr masowy wykonano analizę rozkładu wymiarów cząstek stałych dla badanych pojazdów (rys. 15). Wynika z niej że charakterystyczną średnicą cząstek dla silników Zi jest wartość ok. 40÷60 nm, natomiast dla silników ZS najwięcej cząstek podczas rozruchu i nagrzewania jest emitowanych o rozmiarze 80÷100 nm. Brak jest natomiast jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, który z silników wyraźnie emituje więcej cząstek o danej średnicy. Należy to rozpatrywać w kategoriach emisyjności pojazdów: dla pojazdów kategorii Euro 1 poziom emisji cząstek przewyższa znacznie emisyjność cząstek dla najnowszych pojazdów. Pojazdy z silnikami Zi kategorii Euro 4 emitują 4÷5-krotnie mniej cząstek podczas rozruchu niż silniki ZS tej samej kategorii emisyjnej.

Niezależnie od rodzaju silnika można zauważyć bardzo duże zmniejszenie cząstek w tych samych przedziałach średnic dla najmowych pojazdów w stosunku do pojazdów spełniających normę Euro 1. Ma na to wpływ wyższe ciśnienie wtrysku i większe rozdrobnienie paliwa, co niestety jest również efektem znacznej emisji tlenków azotu.



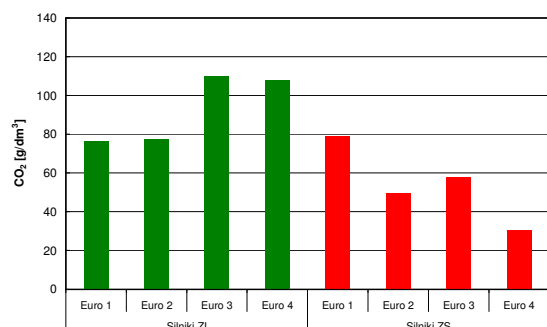
Rys. 15. Rozkład wymiarów cząstek stałych dla pojazdów spełniających normy Euro 1÷Euro 4
Fig. 15. Size distribution particle from Euro 1÷Euro 4 passenger cars

Klasyfikując pojazdy pod względem objętościowego współczynnika emisji CO₂ (rys. 16) nie obserwuje się jednoznacznego trendu: dla silników Zi obserwowany jest nieznaczny wzrost (o 20%) emisji tego składnika (a co się a z tym wiąże zużycia paliwa), natomiast dla silników ZS (obserwowany jest znaczący (o 50%) spadek emisji).

Może być to związane, w przypadku silników Zi, utrzymaniem wyższej prędkości obrotowej silnika (ze względu na większe opory tarcia układu rozrządu – z reguły o 4 zaworach na cylinder) w stosunku do starszych konstrukcji. Kolejnym powodem może być konieczność szybszego nagrzania układów oczyszczających spaliny (reaktorów katalitycznych w pojazdach spełniających normę Euro 3 i Euro 4), tak aby emisja tlenku węgla i węglowodorów była jak najszybciej obniżana.

Silniki ZS ze względu na mniejszy objętościowy współczynnik emisji CO i HC podczas rozruchu w stosunku do silników Zi nie muszą utrzymywać

większej prędkości obrotowej, w wyniku czego nie obserwuje się jego wzrostu, a wręcz przeciwnie – uzyskuje się spadek jego wartości. Duży współczynnik nadmiaru powietrza utrzymywany po rozruchu silnika zapewnia zmniejszone stężenie dwutlenku węgla w spalinach, w przeciwieństwie do silników ZI, gdzie stężenie tego składnika utrzymywane jest w granicach 13÷14%.

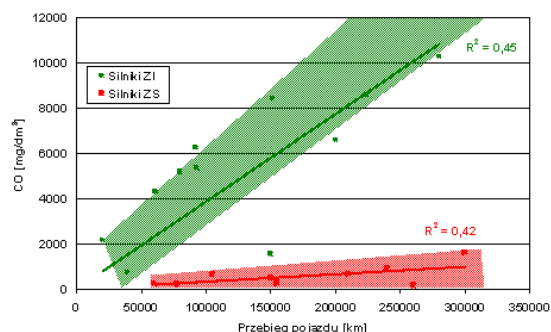


Rys. 16. Objętościowy współczynnik emisji CO₂ dla pojazdów spełniających normy Euro 1÷Euro 4
 Fig. 16. CO₂ emissions from Euro 1÷Euro 4 passenger cars

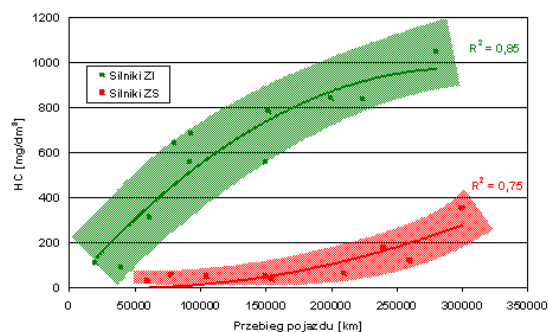
6. Klasyfikacja emisji rozruchowej od przebiegu pojazdu

Klasyfikując emisję rozruchową (rozruch oraz pięciominutowa faza nagrzewania silnika) zaprezentowano obszary, w których możliwe jest uzyskiwanie wyników emisji dla pojazdów o określonym przebiegu, z podziałem na silniki ZI i ZS. Oprócz obszarów zmienności (występowania) emisji zapisano również wskaźnik korelacji (R^2).

Objętościowy współczynnik emisji tlenku węgla (rys. 17) i węglowodorów (rys. 18) silniej zależy od przebiegu pojazdu w przypadku silników ZI niż ZS (zależność ta jest 5-krotnie większa). Mniejszy rozrzut wyników również występuje dla silników ZS, co świadczy o mniejszym zróżnicowaniu emisji CO i HC dla tych silników.



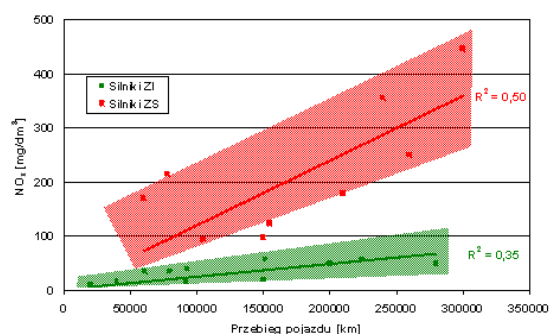
Rys. 17. Objętościowy współczynnik emisji CO dla pojazdów z silnikami ZI i ZS w zależności od ich przebiegu
 Fig. 17. CO emissions for vehicles with gasoline and diesel engines as a function of the vehicle mileage



Rys. 18. Objętościowy współczynnik emisji HC dla pojazdów z silnikami ZI i ZS w zależności od ich przebiegu

Fig. 18. HC emissions for vehicles with gasoline and diesel engines as a function of the vehicle mileage

Wzrost objętościowego współczynnika emisji tlenków azotu w odniesieniu do przebiegu pojazdu odnotowano w większym stopniu dla silników ZS. Wynika to z faktu większego stężenia tlenków azotu opuszczających układ wylotowy silnika (rys. 19), a jednocześnie jest podstawą do stwierdzenia liniowej zależności między badanymi parametrami.

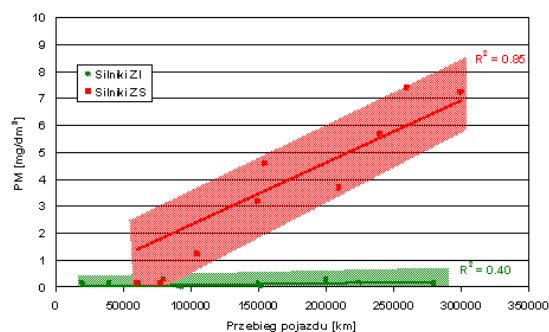


Rys. 19. Objętościowy współczynnik emisji NO_x dla pojazdów z silnikami ZI i ZS w zależności od ich przebiegu

Fig. 19. NO_x emissions for vehicles with gasoline and diesel engines as a function of the vehicle mileage

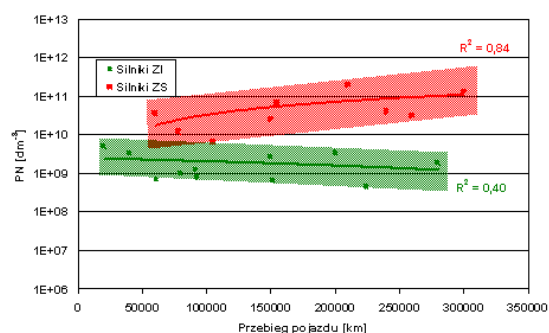
Wartości emisji cząstek stałych bardzo silnie zależą od przebiegu pojazdów: wraz ze zwiększeniem przebiegu pojazdu wzrasta emisja masowa cząstek stałych; jednakże dla pojazdów z silnikami ZS jest to kilkakrotnie więcej niż dla pojazdów z silnikami ZI (rys. 20).

Liczba cząstek PN (rys. 21) podczas rozruchu przyjmuje odmienne tendencje: dla silników ZS wraz ze wzrostem przebiegu obserwuje się większą liczbę cząstek stałych (pojazdy spełniające normę Euro 1 emitują około 10 razy więcej cząstek niż pojazdy Euro 4), natomiast nowoczesne silniki ZI (Euro 4), z powodu wprowadzania coraz wyższej wartości ciśnienia wtrysku benzyny, emitują około 5 razy więcej cząstek niż silniki spełniające normę Euro 1.



Rys. 20. Objętościowy współczynnik emisji PM dla pojazdów z silnikami ZI i ZS w zależności od ich przebiegu

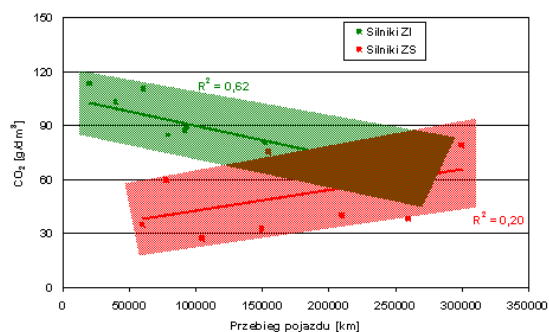
Fig. 20. PM emissions for vehicles with gasoline and diesel engines as a function of the vehicle mileage



Rys. 21. Objętościowy współczynnik liczby cząstek stałych dla pojazdów z silnikami ZI i ZS w zależności od ich przebiegu

Fig. 21. PN emissions for vehicles with gasoline and diesel engines as a function of the vehicle mileage

Emisja dwutlenku węgla (rys. 22) uzależniona od przebiegu badanego pojazdu jest odmienna dla silników ZI i ZS, lecz jest zgodna z klasyfikacją emisyjną pojazdu. Wraz z przebiegiem pojazdu zmniejsza się objętościowy współczynnik emisji CO₂ określany w fazie rozruchu i nagrzewania się silnika (zależność z $R^2 = 0,6$).



Rys. 22. Objętościowy współczynnik emisji CO₂ dla pojazdów z silnikami ZI i ZS w zależności od ich przebiegu

Fig. 22. CO₂ emissions for vehicles with gasoline and diesel engines as a function of the vehicle mileage

Podsumowanie

W artykule sklasyfikowano pojazdy według emisyjności składników gazowych i cząstek stałych w zależności od normy spełnianej przez pojazd (Euro 1÷Euro 4). Dowiedziono znacznych różnic w emisji podczas rozruchu (dotyczy okresu rozruchu i 5-minutowego okresu nagrzewania się silnika) pojazdów wyposażonych w różne silniki. Uzyskano charakterystykę emisji składników gazowych w fazie rozruchowej uzależniając ją od spełnianej normy toksyczności spalin przez badane pojazdy. Otrzymano charakterystykę emisji masy i liczby cząstek stałych (a także rozkładu ich wymiarów), uzależniając ją od okresu eksploatacji pojazdów wyposażonych w różne typy silników.

Stworzono podstawy do klasyfikacji pojazdów pod względem emisyjnym, proponując metodykę takich badań i wskaźniki, które mogą być wykorzystane w dalszych pracach. Badania można rozszerzyć o pojazdy z tej samej kategorii emisyjnej, lecz znacznie różniące się przebiegiem. Będzie to podstawą do wyciągnięcia wniosków na temat trwałości silnika i urządzeń oczyszczających spaliny.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

CPC Condensation Particle Counter/kondensacyjny licznik cząstek stałych
 PM Particle Mass/masa cząstek stałych
 PM Particle Matter/cząstki stałe
 PN Particle Number/liczba cząstek stałych
 ZI spark ignition/zapłon iskrowy

ZS compression ignition/zapłon samoczynny
 Euro euro pean standard emission/europejskie normy toksyczności spalin
 PMP Particulate Measurement Programme/program pomiaru cząstek stałych

Bibliography/Literatura

- [1] Becker U., Winter M., Tschöke H., Efficient Reduction of Environmental Impacts from Transport. 6th International Exhaust Gas and Particulate Emissions Forum, "Forum am Schlosspark", Ludwigsburg 2010.
- [2] Dohle U., Schneemann A., Teetz C., Wintruff I., Compliance with Future Emissions Regulations – Solutions Developed by MTU Friedrichshafen. 31st International Vienna Motor Symposium, Vienna 2010.

-
- [3] Giechaskiel B., Dilara P., Sandbach E., Andersson J., Particle Measurement Programme (PMP) Light-Duty Inter-laboratory Exercise: Comparison of Different Particle Number Measurement Systems. Measurement Science and Technology, Vol. 19, 2008.
- [4] Kirchner U., Vogt R., Maricq M., Investigation of EURO-5/6 Level Particle Number Emissions of European Diesel Light Duty Vehicles. SAE Technical Paper Series 2010-01-0789.
- [5] Lehtoranta K., Matilainen P., Kinnunen T.-J.J., Heikkilä J., Rönkkö T., Keskinen J., Murtonen T., Diesel Particle Emission Reduction by a Particle Oxidation Catalyst, SAE Technical Paper Series 2009-01-2705.
- [6] Leidenberger U., Germany Influence of engine operating parameters on physical and chemical properties of emitted soot particles. 12 ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, Zurich 2008.
- [7] Merkisz J., Pielecha J., Radzimirski S.: Pragmatyczne podstawy ochrony środowiska naturalnego w transporcie drogowym. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009.
- [8] Mori Kazutoshi, Contribution of The Diesel Engine to Sustainable Mobility. World Automotive Congress Fisita 2010, F2010-A-019, Budapest 2010.
- [9] Mueller W., Spurk P., Franschek S., After-treatment System Design for Euro VI Passenger Diesel. World Automotive Congress Fisita 2010, F2010-A-008, Budapest 2010.
- [10] Neumann D., Schrade F., Basse N., Schäffner J., Tschiggfrei W., Krämer L., CO – an Increasing Challenge for Lowest Emission Concepts. 6th International Exhaust Gas and Particulate Emissions Forum, "Forum am Schlosspark", Ludwigsburg 2010.
- [11] Pi-qiang Tan, Zhi-yuan Hu, Di-ming Lou, Bo Li, Particle Number and Size Distribution from a Diesel Engine with Jatropa Biodiesel Fuel. SAE Technical Paper Series 2009-01-2726.

Mr Jerzy Merkisz, DEng. – Professor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznań University of Technology.

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Mr Jacek Pielecha, DSc., DEng. – Doctor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznań University of Technology.

Dr inż. Jacek Pielecha – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

