

Andrzej BIENIEK
Jarosław MAMALA
Mariusz GRABA
Krzysztof PRAŻNOWSKI

PTNSS–2015–3499

Possibilities to improve emission property of compression ignition engine by applying of catalytic fuel additives

The paper include short analysis of published research results as influence of catalytic fuel additives based on metals at emission of harmful substances. Main part of the paper based on analysis of research results realized on engine test bench by fueling of research engine with catalytic fuel additives ED+. In this study analysis of influence of catalytic fuel additives on emission of NO_x and PM at compression ignition engine was performed. Simultaneously an influence of combustion of fuel with fuel additives ED+ at in-cylinder pressure course and exhaust gases temperature was attempted.

Key words: catalytic fuel additives, emission NO_x PM, in-cylinder pressure course compression ignition engine

Możliwości poprawy własności emisyjnych silnika o zapłonie samoczynnym przy zastosowaniu katalitycznego dodatku do paliwa

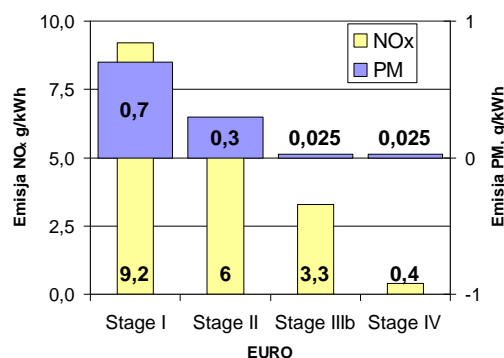
Opracowanie zawiera krótką analizę dostępnych w literaturze wyników badań dotyczących wpływu katalitycznych dodatków do paliwa bazujących na metalach na emisję substancji szkodliwych. Główna część opracowania bazuje na analizie przeprowadzonych badań stanowiskowych, przy zasilaniu silnika badawczego paliwem z katalitycznym dodatkiem o handlowej nazwie ED+. W publikacji dokonano analizy wpływu katalitycznego dodatku do paliwa na emisję PM oraz NO_x silnika o zapłonie samoczynnym. Równocześnie podjęto próbę określenia wpływu spalania paliwa z dodatkiem ED+ na przebieg ciśnienia w cylindrze oraz temperaturę spalin.

Słowa kluczowe: katalityczny dodatek do paliwa, emisja NO_x PM, przebieg ciśnienia w cylindrze, silnik o zapłonie samoczynnym

1. Wprowadzenie

Rosnąca globalna liczba pojazdów poruszających się zarówno po drogach jak i poza nimi powoduje m.in. wzrost emisji szkodliwych związków takich jak NO_x , CO, HC, SO_x oraz cząstek stałych PM. Wśród pojazdów drogowych służących do realizacji zadań transportowych oraz pojazdów przeznaczonych do wykorzystania głównie poza drogami utwardzonymi, udział silników o zapłonie samoczynnym jest bardzo duży i wynosi prawie 100%. Jednocześnie w ostatniej dekadzie zauważa się rosnący udział silników o zapłonie samoczynnym stosowanych w pojazdach osobowych. Silniki Diesla są zasilane głównie olejem napędowym a emisja tych silników jest związana ze spalaniem tego paliwa i dotyczy przede wszystkim takich składników jak tlenki azotu NO_x i cząstki stałe PM.

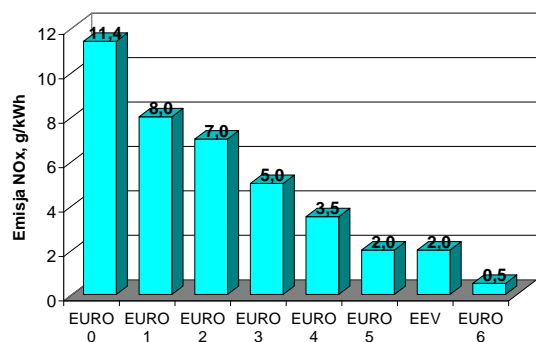
W każdej kolejnej wersji norm ograniczających emisję spalin coraz bardziej zaostrza się dopuszczalne limity emisji substancji szkodliwych dla wszystkich rodzajów pojazdów, w tym zarówno dla pojazdów pozadrogowych jak i samochodów ciężarowych. Największą uwagę koncentruje się na ograniczeniu emisji NO_x oraz PM (rys. 1, 2, 3).



Rys. 1. Limity emisji PM i NO_x dla pojazdów pozadrogowych

Fig. 1. The emission limits for PM and NO_x off-road vehicles

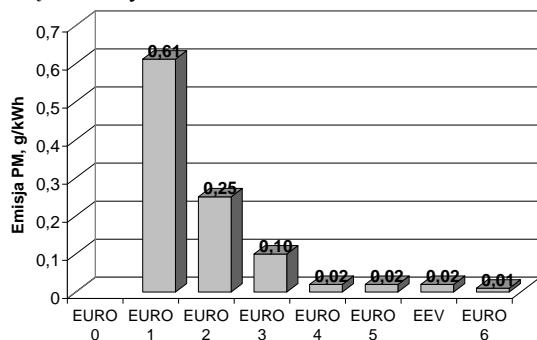
Pojazdy spełniające obecnie obowiązującą normę EURO 6 emitują o ok. 95,6% mniej NO_x niż pojazdy spełniające normę EURO 0 oraz ok. 98,4% mniej PM niż pojazdy spełniające normę EURO 1 (norma EURO 0 nie ograniczała emisji PM).



Rys. 2. Limity emisji NO_x dla samochodów ciężarowych

Fig. 2. NO_x emission limits for trucks

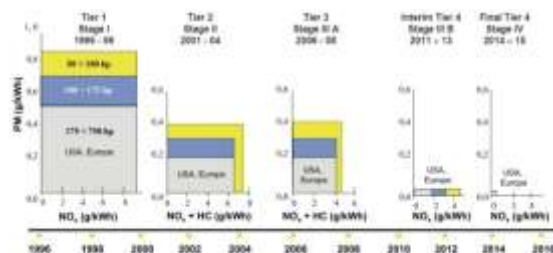
Ograniczenie emisji PM jest możliwe za pomocą różnych metod, których wykorzystanie często powoduje znaczne skomplikowanie osprzętu silnika i systemów ograniczenia spalin. Spełnienie kolejnych coraz bardziej rygorystycznych norm emisji spalin wymaga zastosowania sposobów zarówno wewnątrzsilnikowych takich jak np. recyrkulacja spalin [2, 3, 4, 10] jak i pozasilnikowych np. redukcji emisji opartych na katalizatorach oraz filtrach cząstek stałych DPF.



Rys. 3. Limity emisji PM dla samochodów ciężarowych

Fig. 3. PM emission limits for trucks

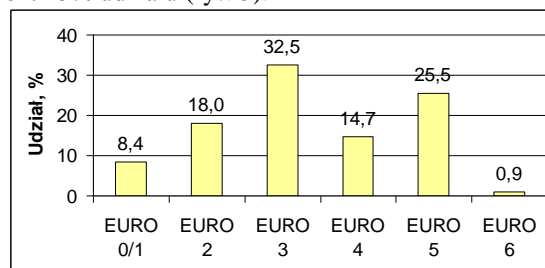
Wraz z wprowadzaniem w kolejnych latach poszczególnych norm ograniczających emisję, również dla pojazdów pozadrogowych (rys. 4), producenci stosowali coraz bardziej złożone systemy ograniczające emisję. Równocześnie zaleca się stosowanie do sterowania systemami ograniczenia emisji algorytmów monitorujących pracę silnika i adaptujących ich działanie do zmieniających się podczas pracy w stanach niestacjonarnych warunków pracy silnika [1, 5, 12]. Z tego względu konieczne jest zaawansowane sterowanie uwzględniające specyficzne własności systemów ograniczenia emisji (tj. zdolność zastosowanych pozasilnikowych systemów do redukcji poszczególnych szkodliwych składników spalin) [2, 6].



Rys. 4. Lata wprowadzenia poszczególnych norm emisji spalin dla pojazdów pozadrogowych

Fig. 4. Years of the introduction of specific emission limits for off-road vehicle

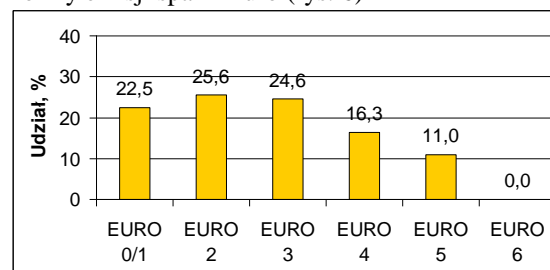
Należy również zwrócić uwagę, że opisywane działania mające ograniczyć emisję nowo produkowanych pojazdów, zostały zintensyfikowane w ostatnich latach, zaś wcześniej wyprodukowane pojazdy niewyposażone w zaawansowane pozasilnikowe systemy ograniczenia spalin (m. in. filtry DPF) stanowią ogromny udział w grupie użytkowanych obecnie pojazdów zarówno w Polsce, jak i w Europie. Według danych firmy ViaToll w 2012 r. prawie 60% udziału spośród ok. 800 tys. znajdujących się w rejestrach tej firmy samochodów ciężarowych, przypada na pojazdy spełniające najstarsze normy Euro 0, 1, 2 bądź 3 [23]. Pojazdy, które spełniają normę wyższą niż Euro 4 stanowiły zaś ok. 25% udziału (rys. 5).



Rys. 5. Udział pojazdów ciężarowych spełniających poszczególne normy Euro użytkowanych w Polsce

Fig. 5. The share of trucks that meet the specific Euro used in Poland

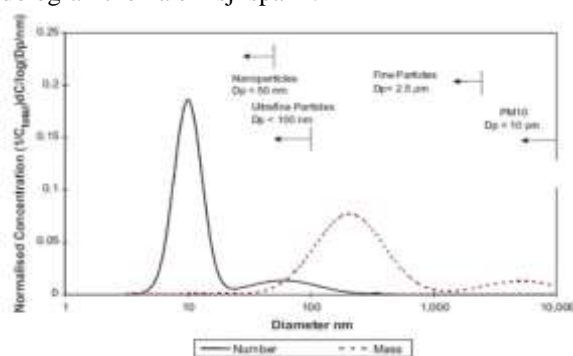
W przypadku autobusów użytkowanych w Polsce (wg ViaToll) dominują te, które spełniają starsze normy emisji spalin Euro (rys. 6)



Rys. 6. Udział autobusów wg. normach w Polsce

Fig. 6. The share of bus that meet the specific Euro used in Poland

Ograniczenie emisji w grupie pojazdów niewyposażonych fabrycznie w opisywane systemy ograniczenia emisji, głównie PM, wymagałoby wprowadzenia wielu zmian konstrukcyjnych w osprzęcie silnika, które w większości przypadków są bardzo trudne do przeprowadzenia z technicznego punktu widzenia, bądź też nieuzasadnione ekonomicznie. Poszukiwanie możliwości ograniczenia emisji w tej grupie pojazdów powinno się więc koncentrować na zastosowaniu innych metod ograniczających ingerencję w konstrukcję i osprzęt silnika do minimum. Jedną z możliwych metod jest zastosowanie katalitycznych dodatków do paliwa, umożliwiających poprawę przebiegu procesu spalania i zainicjowanie takich reakcji podczas spalania oleju napędowego, które w końcowym rezultacie prowadzą do ograniczenia emisji spalin.



Rys. 7. Klasyfikacja cząstek PM ze względu na ich rozmiar [18, 19]

Fig. 7. Classification of PM particles because of the their size

Jak już wspomniano istotnym problemem w przypadku silnika z zapłonem samoczynnym jest ograniczenie emisji cząstek stałych PM. Klasyfikacja cząstek stałych ze względu na ich rozmiar (rys. 7) pokazuje, że największa ich masa (linia przerywana) dotyczy cząstek o wielkości powyżej 100 nm, natomiast największa ich liczba przypada na cząstki o bardzo małej wielkości do ok. 10 nm.

Należy zwrócić uwagę, że cząstki o rozmiarze większym niż ok. 50 nm mogą zostać zatrzymane przez filtry cząstek stałych DPF, a następnie dopalone, natomiast te o mniejszych rozmiarach stanowią istotny problem, jako że są uważane za niebezpieczne dla zdrowia człowieka i mające właściwości nowotworowe.

2. Katalityczne dodatki do paliwa

Olej napędowy dostępny w dystrybucji, oprócz głównego składnika jakim są destylaty ropy naftowej zawiera również inne dodatki, których celem jest:

- redukcja emisji substancji szkodliwych,
- podniesienie stabilności paliwa w szerokim zakresie warunków użytkowania,
- poprawa wskaźnika lepkości,

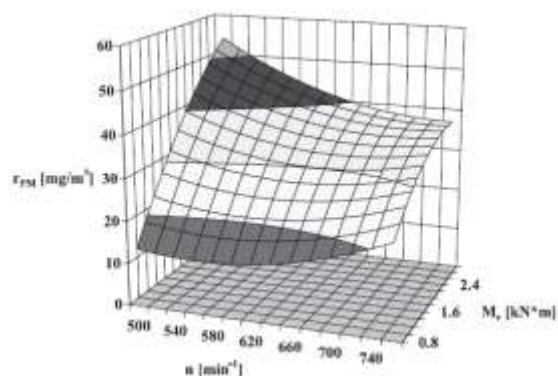
- poprawa zapłonności paliwa m. in. przez skrócenie czasu opóźnienia zapłonu paliwa,
- zapewnienie smarowania elementów współpracujących (elementy układu wtrysku),
- ograniczenie wytrącania się parafiny na elementach układu zasilania (niskie temperatury),
- podniesienie liczby cetanowej itp.

Spośród wielu różnych dodatków stosowanych do oleju napędowego (m.in. dodatki zawierające tlen, depresanty i dodatki dyspersyjne, itp.) duże znaczenie jeżeli chodzi o ograniczenie emisji, mają dodatki oparte na bazie metali.

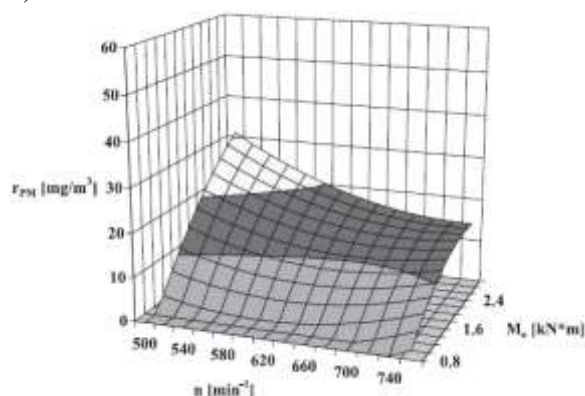
Dodatki do paliwa oparte na bazie metali są dobrym narzędziem do redukcji emisji PM [13]. Główna zasada działania tego typu dodatków oparta jest na katalitycznym efekcie spalania węglowodorów. Zawartość metali (m.in. Ce, Fe, Cu, Pt), dodanych do paliwa pozwala na zdecydowane obniżenie temperatury zapalenia cząstek sadzy. Ma to istotne znaczenie nie tylko w przypadku regeneracji cząstek sadzy nagromadzonych w filtrach cząstek stałych będących elementem systemów ograniczenia emisji nowoczesnych pojazdów, ale także znacznie przyspiesza dopalanie cząstek powstałych w samym procesie spalania. Regeneracja filtra cząstek stałych wymaga osiągnięcia minimalnej temperatury spalin wynoszącej ok. 550°C oraz przynajmniej 5% zawartości O₂ w spalinach. Zastosowanie dodatków do paliwa w postaci metali szlachetnych pozwala na obniżenie tej temperatury o ok. 100 - 150 °C, czego skutkiem jest dopalenie znacznej części cząstek sadzy i zauważalna redukcja ich koncentracji w spalinach [24]. Przeprowadzono wiele badań wpływu dodatków do paliwa na emisję. Zbadano wpływ na emisję m.in. eutektycznych kompozycji, V₂O₅ oraz MoO₃ [22], dodatków bazujących na Mg [17] lub Ce [13], opartych na Mg, Ca Mn i Cu [14, 16], zawierających ferrocen Fe(C₅H₅)₂ [15] oraz zawierających Ce, Cu [12], Fe [20, 21], uzyskując zadowalającą bądź znaczną redukcję substancji szkodliwych, a w szczególności redukcję PM. Dodatki bazujące na manganie Mn dodane do paliwa pozwalają na redukcję wielu substancji zawartych w spalinach (PM, CO, HC, NO_x) jednocześnie. Stosując tego typu dodatki najlepsze efekty uzyskuje się podczas ograniczenia emisji węglowodorów aromatycznych (PAH – Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) redukując je nawet o kilkadziesiąt procent. Równocześnie wykazano wzrost zarówno liczby cetanowej paliwa jak i sprawności ogólnej silnika przy spadku emisji CO i SO₂ [14]. Jak wynika z przeprowadzonych badań, dodatki zawierające ferrocen powodują powstanie lokalnych punktów kondensacji (tlenków metali) zanim powstaną cząstki sadzy w komorze spalania. W kolejnym etapie procesu spalania zachodzi skupianie się powstałych cząstek sadzy w pobliżu tlenków metali. Następnie bardzo efektywny proces dopalania cząstek przy zastosowaniu ferrocenu powoduje znaczny spadek emisji PM [9]. Dopala-

nie cząstek sadzy głównie w przypadku występowania ich w znacznej koncentracji w spalinach (występującej m.in. przy dużym obciążeniu silnika, niesprawności układu wtrysku paliwa, itp.) może zachodzić przy udziale komponentów zawierających takie pierwiastki jak Ba, Mg oraz Ca. Zastosowanie tego typu dodatków pozwala na zmniejszenie zadymienia spalin w zakresie nawet kilkadziesiąt procent [9]. Innym bardzo istotnym dodatkiem opartym na metalach są związki ceru Ce, pozwalającym na istotną redukcję emisji PM [13]. Według teorii prezentowanej w literaturze związki ceru powodują redukcję głównie organicznego węgla, jednakże znacznie mniej intensywnie wpływają na redukcję węgla elementarnego, który jest istotnym produktem spalania paliwa przy udziale węglowodorów i nieorganicznych związków. Równocześnie zauważono również, że zbyt duża zawartość w paliwie ceru, może powodować powstanie większej liczby cząstek stałych o mniejszej wielkości [9, 13, 17]. Zbadano również wpływ metaloorganicznych związków kobaltu i magnezu na emisję substancji szkodliwych. Zauważono zdecydowany wpływ rozważanych dodatków na masę emitowanych cząstek stałych (rysunek 8a, 8b) [6, 7, 8].

a)



b)

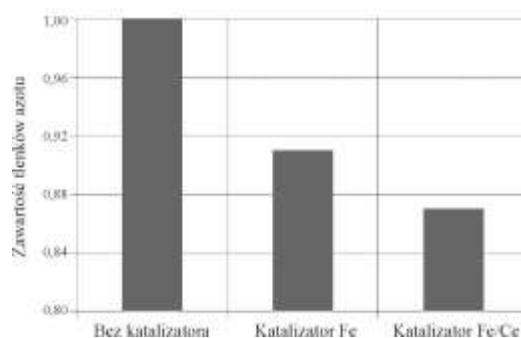


Rys. 8. Mapy emisji PM silnika Sulzer 6AL20/24: a) paliwo standardowe, b) paliwo z dodatkiem związków metaloorganicznych [6].

Fig. 8. Maps of PM emissions engine Sulzer 6AL20 / 24: a) fuel standard, b) fuel with the addition of organometallic compounds [6].

Również wpływ dodatków bazujących na platynie oraz cerze na emisję spalin został poddany badaniom. Wyniki badań potwierdzają, że kompozycja stężenia 5 ppm Ce oraz 0,25 ppm Pt w paliwie pozwala na znaczną redukcję cząstek, bez spadku sprawności silnika [11].

Badano również wpływ organicznych katalizatorów metalicznych, otrzymanych z rozpuszczalnych w wodzie soli Fe^{3+} oraz Ce^{3+} , na emisję oraz uzysk ciepła podczas spalania oleju napędowego.



Rys. 9. Efekty spalania oleju opałowego z dodatkiem katalizatora metalicznego Fe, Fe/Ce na zawartość NO_x [20, 21].

Fig. 9. The effects of of combustion oil with the addition of metal catalyst Fe, Fe / Ce: on the NO_x content [20, 21].

W przeprowadzonych badaniach uzyskano ograniczenie emisji NO_x w przypadku zastosowania katalizatora dimetalicznego Fe/Ce o 13 %, zaś uzysk ciepła wynosił 14% [20, 21].

3. Metodyka badań stanowiskowych

Badania wpływu katalitycznego dodatku do paliwa o handlowej nazwie ED+ na emisję PM przeprowadzono na hamowni silnikowej Politechniki Opolskiej. Stosowany dodatek katalityczny ED+ bazuje m. in. na komponentach związków metali, a szczegółowy skład dodatku jest efektem wielu prac badawczych firmy Petrol Energy (rysunek 10).



Rys. 10. Katalityczny dodatek do oleju napędowego ED+ [25]

Fig. 10. The catalytic additive to diesel fuel ED +

Bazowy układ zasilania paliwem, wyposażony był w rzędową pompę wtryskową sterowaną z ECU i pochodził z silnika o zapłonie samoczynnym typu Z 1505 firmy Zetor. Jest to silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym, spełniający obowiązującą normę emisji spalin Tier III A, według dyrektywy Unii Europejskiej EU -97/68/EC. Czterocyldrowy silnik typu Z 1505 zasilany jest olejem napędowym, wyposażony seryjnie w: system turbodoładowania, chłodnicę powietrza typu powietrze-powietrze, zawór recyrkulacji spalin EGR, chłodnicę spalin typu powietrze-ciecz oraz rzędową pompę wtryskową umożliwiającą podział dawki paliwa na fazy. Szczegółowe dane techniczne dotyczące silnika typu Z 1505 zawarto w tabeli 1.

Tabela 1. Dane techniczne silnika typu 1505
Table 1. Technical specifications type 1505

CECHA	WARTOŚĆ
Moc znamionowa silnika (kW/KM)	90/122
Rodzaj silnika	rzędowy, turbodoładowany z intercoolerem
Liczba cylindrów	4
Pojemność skokowa (cm ³)	4156
Średnica cylindra/skok (mm)	105/120
Prędkość znamionowa (obr/min)	2200
Maksymalna prędkość wyjściowa (obr/min)	2460
Stopień sprężania	17,8
Sekwencja wtrysku paliwa	1 - 3 - 4 - 2
Zużycie paliwa przy mocy znamionowej (g/kWh)	260
Maksymalny moment obrotowy (N·m)	525
Układ chłodzenia	ciecz
Spełnienie norm emisji spalin	Tier III A

Silnik badawczy nie jest wyposażony w filtr DPF ani układ katalizatora SCR.

W celu zbadania wpływu dodatku do paliwa o handlowej nazwie ED+ firmy Petrol Energy na wskaźniki pracy silnika badawczego, przeprowadzono cykl badań porównawczych z zastosowaniem paliwa wzorcowego (niezawierającego dodatku) oraz tego samego paliwa z dodatkiem ED+ na silniku zabudowanym na hamowni silnikowej. Widok stanowiska dynamometrycznego z zainstalowanym silnikiem badawczym przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Silnik testowy o zapłonie samoczynnym typu Z1505

Fig. 11. The test diesel engine ignition type Z1505

Do pomiaru emisji cząstek stałych PM zawartych w spalinach silnika wykorzystano dymomierz firm MAHA typu MPM4 służący do ciągłego pomiaru koncentracji cząstek. Podstawowe parametry analizatora MPM4 przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry techniczne analizatora MPM4
Table 2. Technical specifications MPM4

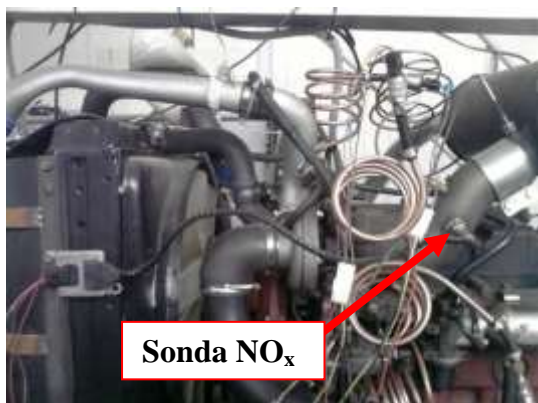
Waga	3 kg
zasilanie	12 V (DC) / 110-240 V (AC)
zakres pomiarowy	0,01-700,00 mg/m ³
sposób pomiaru	metoda promienia odbitego (LLSP)
dokładność pomiarowa	0,01 mg/m ³
wielkość cząstek stałych	100 nm – 10 000 nm
2 złącza analogowe	0 – 5 V
1 RS 232	
1 USB	
maksymalna rozdzielczość na złączu analogowym	0,00 – 8,00 mg/m ³ 0,00 – 700,00 mg/m ³

Do pomiaru emisji tlenków azotu (NO_x) oraz tlenu O₂, wykorzystano specjalistyczny zintegrowany czujnik DRIVVEN w postaci sondy pomiarowej. Czujnik zamontowano tuż za tłumikiem w pozycji zgodnej z zaleceniami producenta (rys. 13).

System pomiarowy pozwala jednocześnie na pomiar ilości tlenków azotu NO_x oraz stężenia tlenu O₂ w spalinach. Najważniejsze parametry systemu pomiarowego zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Najważniejsze parametry sondy pomiarowej NO_x i O₂
Table 3. Technical specifications probe NO_x i O₂

Output Type	Measurement Range	Accuracy	Response Time (S3-66%)
NO _x	0 – 3000 ppm	@ 0 ppm: ±10 ppm @ 100 – 1500 ppm: ±10% @ 1500 – 3000 ppm: undefined	1300 ms (fresh) 1650 ms (aged)
O ₂	-12 – 21 [%]	@ λ=0.90: ±1.4% (fresh) @ 0% (λ=1.00): ±0.13% (fresh) @ 0% (λ=1.00): ±0.25% (aged) @ 13% (λ=2.65): ±0.32% (fresh)	1000 ms (fresh) 1300 ms (aged)



Rys. 13. Sonda NO_x zamontowana w kolektorze wylotowym silnika badawczego
 Fig. 13. NO_x probe mounted in the research engine exhaust manifold

Równocześnie rejestrowano również przebieg ciśnienia w cylindrze dzięki zestawowi firmy AVL składającego się z czujnika ciśnienia GM12D zamontowanego w jednym z cylindrów silnika badawczego. Przebieg ciśnienia w cylindrze rejestrowano z częstotliwością 5 kHz.

System pomiarowy oparty jest na sterowniku Compact Rio współpracującym z aplikacją pomiarową wykonaną w systemie LabView.

Kolejne serie badań odpowiednio dla różnych wersji dodatku do paliwa ED+ poprzedzono badaniami wskaźników pracy silnika zasilanego paliwem bazowym niezawierającym dodatku ED+, firmy Petrol Energy (próbka A), przy czym badania odbywały się zgodnie z założonym programem (tab. 4). Zgodnie z przedstawionym w tabeli 4 programie badań wykonano badanie 2 wersji dodatku ED+ (oznaczonych jako B oraz C)

Procedura zapisu wyników wymagała uzyskania powtarzalnych warunków pomiarowych każdej z serii, toteż przed każdym testem doprowadzono silnik do stanu względnej stabilizacji cieplnej, w taki sposób, że wahania temperatury cieczy chłodzącej podczas każdej serii wynosiły maksymalnie 2 °C, a różnica średniej temperatury cieczy chłodzącej pomiędzy wszystkimi seriami badań wynosiła również max. 2°C.

W celu uzyskania powtarzalnych stacjonarnych punktów pomiarowych wykorzystano regulatory prędkości obrotowej i obciążenia momentem obrotowym, będące wyposażeniem stanowiska dynamometrycznego (hamowni). Po zadaniu prędkości obrotowej, obciążenia momentem obrotowym rozpoczynano zapis wyników pomiarów z zadaniem zwłoki czasowej, niezbędnej do względnego ustabilizowania się warunków pracy silnika i wskazań urządzeń pomiarowych. Zapis parametrów pracy każdego poszczególnego punktu pracy silnika badawczego obejmował okres 180 s.

Tabela 4. Punkty pomiarowe testowane dla serii badań (*- punkty pomiarowe dodatkowe)

Table 4. The measurement points for a series of tests (* - additional measuring points)

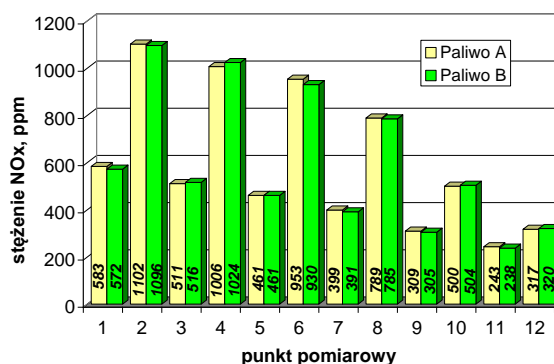
Lp.	Prędkość obrotowa silnika, obr/min	Obciążenie silnika momentem obrotowym, Nm
1	1000	80
2	1000	190
3	1100	80
4	1100	190
5	1200	80
6	1200	190
7	1300	80
8	1300	190
9	1400	80
10	1400	190
11*	(1500)	(80)
12*	(1500)	(190)

Dalsza procedura wymagała obróbki uzyskanych wyników polegającej na obliczeniu wartości średniej parametrów pracy silnika zarejestrowanych podczas okresu pomiarowego, każdego z punktów pracy silnika. Dzięki temu uzyskano wyniki pomiarowe eliminujące wpływ chwilowej niestabilności bądź krótkookresowej niepowtarzalności cykli pracy silnika, a także nieprawidłowości odczytu chwilowych wartości pomiarowych itp.

4. Analiza wyników badań

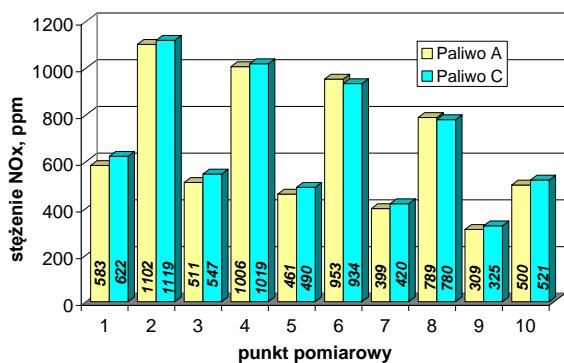
4.1. Emisja spalin

Badania przeprowadzono w zakresie prędkości obrotowych z jakimi pracują silniki pojazdów realizujących transport dalekobieżny. Zarejestrowano stężenie NO_x oraz emisję PM dla silnika pracującego na paliwie A oraz paliwie z katalitycznym dodatkiem ED+ w wersji B oraz wersji C. (rys. 14 - 17).



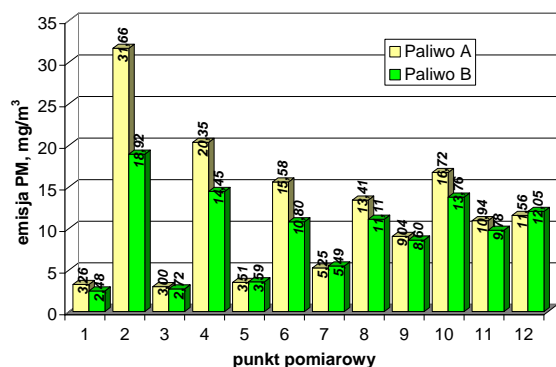
Rys. 14. Stężenie NO_x w spalinach dla testowanych paliw A, B

Fig. 14. The concentration of NO_x for fuels A, B



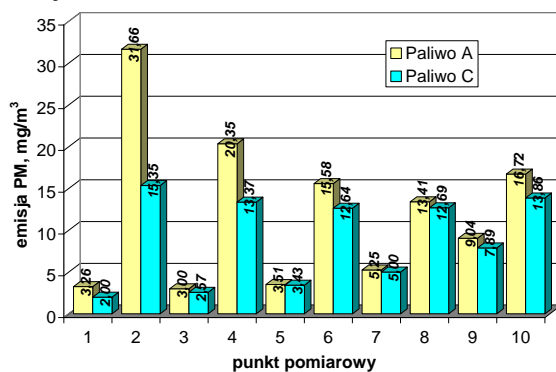
Rys. 15. Stężenie NO_x w spalinach dla paliw A, C
Fig. 15. The concentration of NO_x for fuels A, C

Następnie dokonano analizy porównawczej badanych substancji (NO_x, PM), a jej wyniki przedstawiono w sposób względny na rys. 18 i 19.

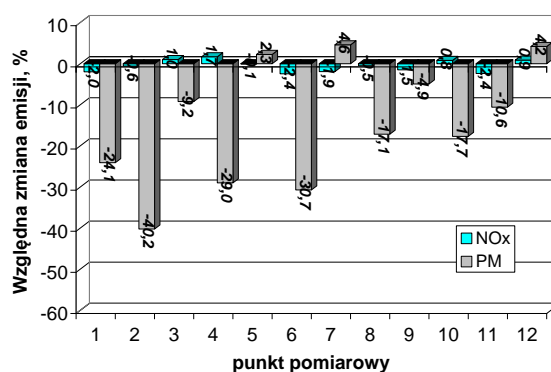


Rys. 16. Emisja PM w spalinach dla paliw A, B,
Fig. 16. The concentration of PM for fuels A, B

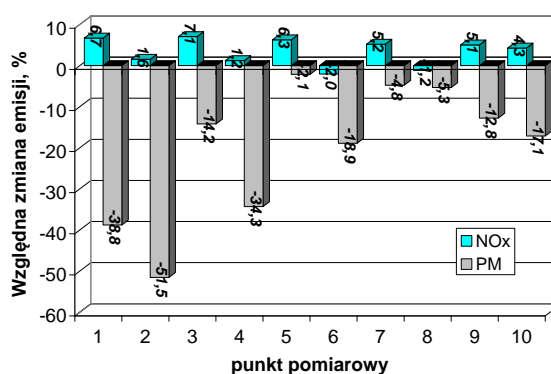
Na podstawie analizy prezentowanych wyników badań (rys. 14 – 19) można stwierdzić, że zastosowanie dodatku ED+ powoduje znaczący spadek głównie emisji PM. Średnia wartość spadku emisji PM wynosi odpowiednio dla wersji dodatku ED+: B: -14,4%, C: -20,0%. Największą redukcję emisji zarejestrowano dla prędkości obrotowej 1000 obr/min i wynosi ona dla wersji B: 40,2% oraz dla wersji C: 51,5%.



Rys. 17. Emisja PM w spalinach dla paliw A, C
Fig. 17. The concentration of PM for fuels A, B

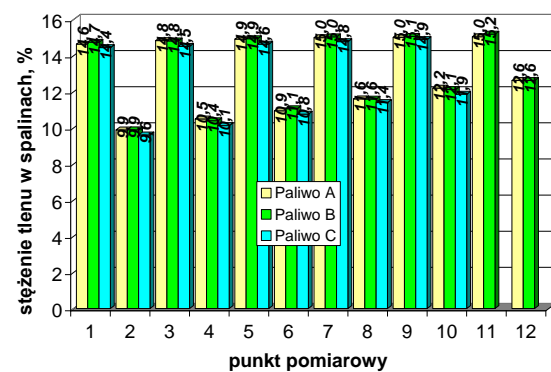


Rys. 18. Względne różnice emisji NO_x i PM przy zastosowaniu paliwa B
Fig. 18. Relative differences in NO_x and PM for fuel B



Rys. 19. Względne różnice emisji NO_x i PM przy zastosowaniu paliwa C
Fig. 19. Relative differences in NO_x and PM for fuel C

Równocześnie należy zauważyć, że stężenie NO_x, nieznacznie różniło się pomiędzy przypadkiem zasilania silnika paliwem wzorcowym, a paliwem z różnymi wersjami dodatku ED+, zaś zarejestrowana średnia wartość stężenia NO_x odbiegała od wartości na paliwie bazowym odpowiednio dla B: -0,6%, C: +3,4%.

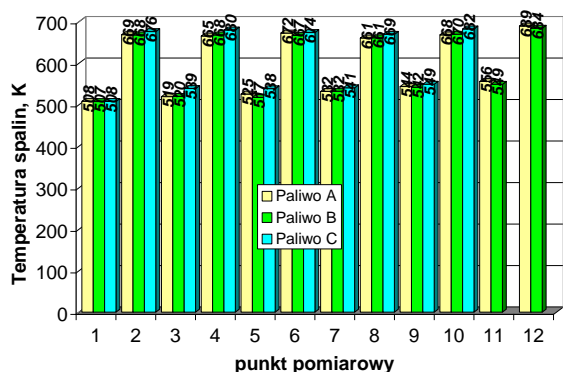


Rys. 20. Stężenie O₂ w spalinach przy zastosowaniu paliwa A, B i C.
Fig. 20. The O₂ concentration in the exhaust gas for fuels A, B and C.

Równocześnie zbadano również stężenie tlenu w spalinach (rys. 20). Istotna różnica stężenia tlenu pomiędzy pracą silnika z paliwem A i paliwem z dodatkiem ED+ jest zauważalna w wersji C i wynosi w wartościach bezwzględnych średnio kilka dziesiątych procenta.

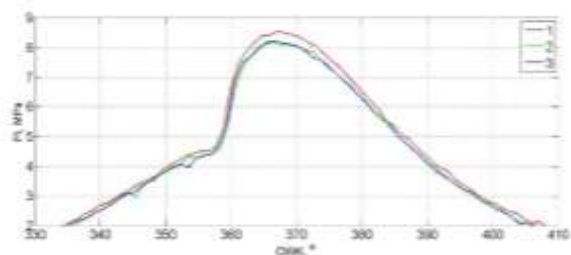
4.2. Warunki panujące w cylindrze silnika

Analizie poddano temperaturę spalin silnika mierzoną w kolektorze wylotowym przed turbosprężarką (rys. 21). Zauważalne różnice temperatury spalin w stosunku do silnika pracującego z paliwem A dotyczą również paliwa oznaczonego jako C. Zmierzona temperatura spalin jest wyższa o kilka do kilkunastu K, maksymalnie do 20 K. Zarejestrowany wzrost temperatury spalin szczególnie dla silnika pracującego z wykorzystaniem paliwa oznaczonego jako C może być, z jednej strony czynnikiem wspomagającym proces dopalania cząstek stałych, z drugiej zaś powodującym powstanie korzystniejszych warunków do tworzenia się związków NO_x .



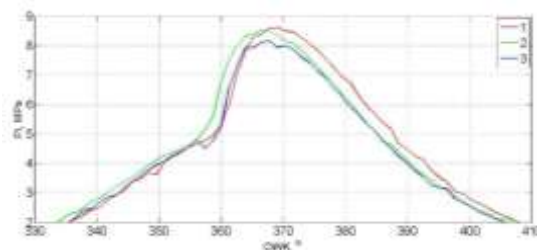
Rys. 21. Temperatura spalin dla paliw A, B i C
Fig. 21. The exhaust gas temperature for fuels A, B and C

Jednak równoczesny spadek udziału O_2 (rys. 20) ogranicza tworzenie tych związków. W rezultacie zarejestrowano jednak nieistotny wzrost stężenia NO_x przy znacznym spadku emisji PM.

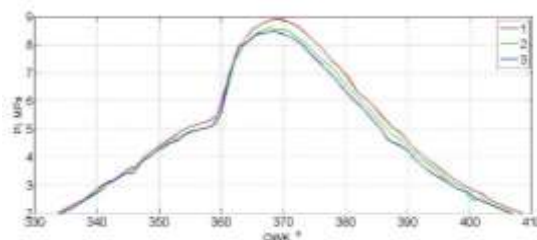


Rys. 22. Przebieg ciśnienia w cylindrze dla punktu pomiarowego nr 2 przy zastosowaniu paliwa oznaczonego jako 1 - A, 2 - B i 3 - C.
Fig. 22. The course of pressure in the cylinder.

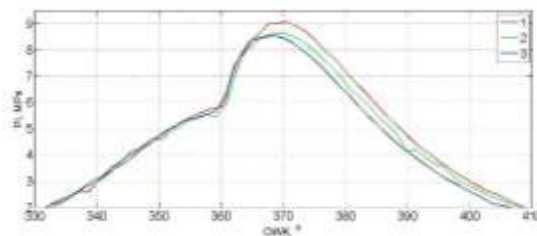
Interesującym aspektem pracy silnika jest również wpływ zastosowanego katalitycznego dodatku do paliwa na przebieg ciśnienia w cylindrze. Dokonano więc porównania uśrednionych przebiegów ciśnienia w cylindrze dla przykładowych punktów pracy silnika przy zasilaniu paliwem A, B i C (rys. 22-26).



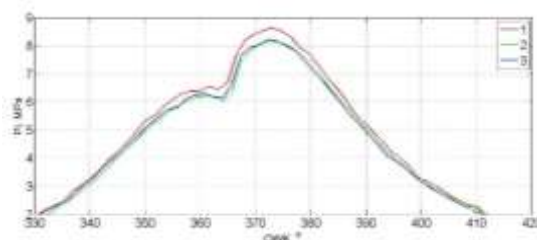
Rys. 23. Przebieg ciśnienia w cylindrze dla punktu pomiarowego nr 4 przy zastosowaniu paliwa oznaczonego jako 1 - A, 2 - B i 3 - C.
Fig. 23. The course of pressure in the cylinder



Rys. 24. Przebieg ciśnienia w cylindrze dla punktu pomiarowego nr 6 przy zastosowaniu paliwa oznaczonego jako 1 - A, 2 - B i 3 - C.
Fig. 24. The course of pressure in the cylinder



Rys. 25. Przebieg ciśnienia w cylindrze dla punktu pomiarowego nr 8 przy zastosowaniu paliwa oznaczonego jako 1 - A, 2 - B i 3 - C.
Fig. 25. The course of pressure in the cylinder



Rys. 26. Przebieg ciśnienia w cylindrze dla punktu pomiarowego nr 10 przy zastosowaniu paliwa oznaczonego jako 1 - A, 2 - B i 3 - C.
Fig. 26. The course of pressure in the cylinder

Analiza przedstawionych przebiegów ciśnienia w cylindrze pokazuje, że zastosowanie katalitycznego dodatku do paliwa powoduje obniżenie maksymalnego ciśnienia w cylindrze. Największe obniżenie tego wskaźnika można zarejestrować dla paliwa C. Zastosowanie paliwa B powoduje również zauważalne obniżenie przebiegu ciśnienia w cylindrze, choć jest ono mniejsze niż w przypadku zasilania paliwem C.

Tabela 5. Maksymalne wartości ciśnienia w cylindrze P_{incyl} wyrażonych w MPa dla silnika badawczego przy zasilaniu różnymi paliwami

Table 5. The maximum pressure in the cylinder

Paliwo/ punkt pomiarowy nr	2	4	6	8	10
A	8,533	8,606	8,925	9,076	8,637
B	8,201	8,502	8,594	8,661	8,237
C	8,193	8,166	8,475	8,540	8,141

Bezwzględne wartości maksymalnych ciśnień w cylindrze przy zasilaniu paliwem A, B i C podano w tabeli 5. Porównanie tych wartości pokazuje, że zasilanie paliwem B powoduje spadek wartości maksymalnego ciśnienia w cylindrze średnio o 4,6 %, zaś zasilanie paliwem C skutkuje obniżeniem maksymalnego ciśnienia w cylindrze średnio o 5,3%.

5. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań przy zastosowaniu katalitycznego dodatku do paliwa ED+ firmy Petrol Energy pokazują znaczący wpływ na uzyskiwane wskaźniki ekologiczne pracy testowanych silników spalinowych. Największy wpływ zanotowano w przypadku własności emisyjnych silnika, objawiających się znaczącym ograniczeniem, szczególnie emisji cząstek stałych PM (zmniejszenie emisji cząstek sadzy). Zarejestrowane wyniki badań zrealizowanych na silniku badawczym typu 1505 potwierdzają możliwość ograniczenia pierwotnej (przed filtrem PDF) koncentracji cząstek stałych w niektórych punktach pracy nawet o ponad 50%. Należy również zauważyć, że zastosowanie wersji dodatku oznaczonego jako B pozwala na znaczne ograniczenie emisji zarówno cząstek stałych PM (do ok. 40%) przy praktycznie niezmienionej emisji NO_x . Analiza temperatury spalin oraz udziału tlenu w spalinach pokazuje również jednoznacznie na istotne oddziaływanie katalitycznego dodatku do paliwa na proces spalania. Teza ta znajduje również potwierdzenie podczas porównania przebiegów ciśnienia w cylindrze. Stosowanie katalitycznych dodatków do paliwa pozwala znacznie poprawić własności emisyjne szczególnie silników, które nie są wyposażone w zaawansowane systemy ograniczenia emisji (Euro 1, 2, 3). Równocześnie w silnikach spełniających najnowsze normy emisji (Euro 4, 5, 6) można poprawić trwałość niektórych elementów takich jak np. filtry DPF, dzięki możliwości ograniczenia pierwotnej emisji cząstek PM.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

PM Particulate Matter/*cząstki stałe*

DPF Diesel Particulate Filter/*filtr cząstek stałych*

PAH Polycyclic Aromatic Hydrocarbons/*policykliczne węglowodory aromatyczne*

Bibliography/Literatura

- [1] Bieniek A., Graba M., Lechowicz A.: Adaptive control of exhaust gas recirculation at nonroad vehicle diesel engine, *Journal of KONES*, Vol. 18, No. 4, 2011, s. 11- 18.
- [2] Bieniek A., Mamala J., Graba M.: Możliwości wstępnego ograniczenia emisji NO_x i PM silnika wysokoprężnego w aspekcie przyszłościowych norm emisji pojazdów pozadrogowych, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 1(87)/2012 r s. 75-86.
- [3] Bieniek A., Graba M.: Sterowanie układem recyrkulacji spalin, *Zasilanie silników wysokoprężnych pojazdów pozadrogowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej 2012, ISBN 978-83-62736 60-7, 2012 r, s. 93-112.
- [4] Bieniek A.: Wewnętrzny ograniczenie emisji substancji szkodliwych w silniku wyposażonym w układ EGR pojazdu pozadrogowego, *Inżynieria Rolnicza* nr 2(143) 2013 s. 31-41
- [5] Bieniek A.: Sterowanie układem recyrkulacji spalin silnika pojazdu pozadrogowego a emisja NO_x i PM, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 5(96)/2013 s. 39-47
- [6] Chłopek Z., Darkowski A., Piaseczny L.: The Influence of Metalloorganic Fuel Additives on CI Engine Emission, *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 14, No 5 (2005), pp. 559-567
- [7] Chłopek Z., Michalski B., Piaseczny L.: Badanie metaloorganicznych dodatków do oleju

- napędowego w celu zmniejszenia emisji zanieczyszczeń, *Silniki Spalinowe* 2007 r., nr 46, SC3, s. 72-78
- [8] Chłopek Z., Piaseczny L.: Wpływ dodatku metaloorganicznego do paliwa na emisję zanieczyszczeń z silnika o zapłonie samoczynnym, *Inżynieria Maszyn* 2003 r
- [9] Danilov A.: Fuel additives: evolution and use in 1996-2000, *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, Vol. 37, No. 6, 2001
- [10] Graba M., Bieniek A., Mamala J., Lechowicz A.: Sterowanie adaptacyjne zaworu recyrkulacji spalin w silniku o zapłonie samoczynnym w aspekcie obniżenia emisji substancji szkodliwych, *Inżynieria Rolnicza* Nr 5 (130) 2011, s. 73-80
- [11] Jelles S. J., Makkee M., Moulijn J. A., Acres G. J. K., Peter-Hoblyn J. D.: Diesel Particulate Control Application of an Activated Particulate Trap in Combination with Fuel Additives at an Ultra Low Dose Rate. SAE 1999-01-0113, 1999, p. 1-6
- [12] Jelles S. J., Krul R. R., Makkee M., Moulijn J. A.: The influence of NO_x on the oxidation of metal activated diesel soot, *Catalyst Today* 53 (1999) pp. 623-630
- [13] Jung H., Kittelson D. B., Zachariah m. R.: The influence of cerium additive on ultrafine diesel particle emissions and kinetics of oxidation, *Combustion and Flame* 142, (2005) 276 - 288
- [14] Gürü M., Karakaya U., Altiparmak D., Alicilar A.: Improvement of Diesel fuel properties by using additives, *Energy Conversion and Management* vol. 43 (2002) 1021 - 1025
- [15] Kasper M., Sattler K., Siegmann K., Matter U., Siegmann H. C.: The influence of fuel additives on the formation of carbon during combustion, *Journal of Aerosol Sciences* Vol. 30, No. 2 pp. 217- 225, 1999
- [16] Keskin A., Gürü M., Altiparmak D.: Influence of tall oil biodiesel with Mg and Mo based fuel additives on diesel engine performance and emission, *Bioresource Technology* 99 (2008) 6434 -6438
- [17] Lyrränen J., Jokiniemi J., Kauppinen E.: The effect of Mg-Based Additive on Aerosol Characteristic in Medium-Speed Diesel Engines Operating with Residual Fuel Oils; *Aerosol Sci.* 2002, 33, 967-981
- [18] Martyn V. Twigg: Catalytic control of emissions from cars, *Catalytic Today*, 163 (2011) pp. 33-41
- [19] Martyn V. Twigg: Progress and future challenges in controlling automotive exhaust gas emissions, *Applied Catalysis B: Environmental* 70 (2007) 2–15
- [20] Tic W.: Metal salts as homogeneous catalysts for effective combustion of liquid fuels, *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 17, No 3 (2008), pp. 439-441
- [21] Tic J. Guziałowska-Tic J.: Badania nad technologią wytwarzania katalizatorów ekologicznego spalania ciężkich olejów opałowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska* Z. 58, nr 4, (2011), s. 301-307
- [22] van Setten B.A.A.L., van Dijk R., Jelles S. J., Makkee M., Moulijn J. A.: The potential of supported molten salts in the removal of soot from diesel exhaust gas, *Applied Catalysis B: Environmental* 21 (1999) pp. 51-61
- [23] www.ekorynek.com/eko-moto/, 2014 r
- [24] Petrol Energy, Materiały informacyjne firmy Petrol Energy Sp z o.o., 2015 r
- [25] Smieja M., Wierzbicki S.: Visualization of the Parameters and Changes of Signals Controlling the Operation of Common Rail Injectors, *MECHATRONIC SYSTEMS, MECHANICS AND MATERIALS II*, Book Series: Solid State Phenomena, Volume: 210 Pages: 136-141, Published: 2014

Jarosław Mamala, DSc., DEng - Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Opole University of Technology

Dr hab. inż. Jarosław Mamala - profesor na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej



Mariusz Graba, PhD, MEng - doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at Opole University of Technology

Dr inż. Mariusz Graba – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej



Andrzej Bieniek, PhD, MEng - doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at Opole University of Technology

Dr. inż. Andrzej Bieniek, adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej



Krzysztof Prażnowski, MEng - PhD student in the Faculty of Mechanical Engineering at Opole University of Technology.

Mgr inż. Krzysztof Prażnowski – doktorant na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej

