

Lukasz RYMANIAK
Maciej BAJERLEIN
Andrzej ZIÓŁKOWSKI
Michał DOBRZYŃSKI

PTNSS–2013–SC–125

Analysis of PM emission and fuel consumption in transient conditions in a two-stroke engine with a modified piston

Abstract: The paper presents the results of PM emission tests of two mopeds with two-stroke engines. One of the mopeds had a modified piston so as to the engine could run on petrol consisting less lubricant oil than the moped producer recommends. The aim of the tests presented in the paper was to assess the influence of lubricant oil on the PM contents in the exhaust as well as on their density distribution. The tests were carried out in transient conditions at the dynamometer. Furthermore, the paper presents fuel consumption during tests together with the characteristics of power performed by the mopeds. All tests were conducted with the use of MSS analyzer by AVL and EEPS analyzer by TSI.

Keywords: particulate matter, piston, two-stroke engine

Analiza emisji cząstek stałych i zużycia paliwa silnika dwusuwowego wyposażonego w zmodyfikowany tłok w warunkach nieustalonych

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań emisji cząstek stałych PM dwóch skuterów miejskich napędzanych silnikami dwusuwowymi. Jeden z pojazdów wyposażony był w tłok specjalnej konstrukcji, pozwalający na stosowanie mieszanek o mniejszej zawartości oleju smarującego do benzyny niż zaleca producent. Przedstawione badania zrealizowano w celu oceny wpływu oleju smarującego na zawartość PM w gazach wylotowych oraz ich rozkładu wymiarowego. Pomiarów wykonano podczas rozpędzania motorowerów na hamowni podwoziowej, co umożliwiło symulację nieustalonych stanów pracy spalinowej jednostki napędowej. Dodatkowo przedstawiono zarejestrowane wartości zużycia paliwa oraz charakterystyki uzyskanych mocy przez pojazdy w czasie badań. W pracach wykorzystano mobilny analizator MSS firmy AVL oraz analizator EEPS firmy TSI.

Słowa kluczowe: cząstka stała, tłok, silnik dwusuwowy

1. Wprowadzenie

Transport jest kluczowym czynnikiem wpływającym na rozwój gospodarczy większości państw świata. Pojazdy wchodzące w skład transportu lądowego dzieli się na różne kategorie, które klasyfikowane są pod względem ich przeznaczenia, sposobu eksploatacji, budowy itp. W związku z coraz większą troską o środowisko naturalne, producenci działający w przemyśle motoryzacyjnym wprowadzają na rynek rozwiązania charakteryzujące się coraz większą ekologicznością.

Istotną grupę pojazdów, która cały czas się rozwija, stanowią motocykle i motorowery. W miastach oraz w obszarach wiejskich odgrywają bardzo istotną rolę. Pojazdy jednośladowe umożliwiają szybkie przemieszczanie się, nawet w przypadku wystąpienia kongestii bądź złego stanu nawierzchni dróg. W ostatnich latach ilość motorowerów poruszających się po drogach naszego kraju systematycznie wzrastała. W roku 2005 liczba ta wynosiła 337 511, natomiast na dzień 31. grudnia 2011 osiągnęła wartość 1 032 980 pojazdów [10, 11]. Jednym z powodów tak dużego zainteresowania był brak konieczności posiadania specjalnych upraw-

nień do prowadzenia pojazdów kategorizowanych jako motorowery – wystarczyło ukończenie pełnoletności. Od dnia 19 stycznia 2013 roku na terenie naszego kraju weszła ustawa dotycząca potrzeby posiadania specjalnych uprawnień [13].

Motorowery, w tym skutery, stanowią coraz większą grupę pojazdów na drogach, konieczne jest więc podjęcie działań zmierzających do zwiększenia ich ekologiczność [4]. Celem przedstawionych w artykule badań była ocena wpływu zmiany konstrukcji tłoka na emisję cząstek stałych PM silnika dwusuwowego napędzającego skuter miejski.

Powstawanie PM jest złożonym procesem, w którego skład wchodzi wiele reakcji chemicznych i fizycznych. Najczęściej te reakcje występują równocześnie w różnych miejscach komory cylindra oraz układu wylotowego. Podstawowym mechanizmem tworzenia PM jest rozpad oleju napędowego na związki aromatyczne lub cząstki acetyleny. Z nich powstaje sadza, która jest podstawowym elementem cząstki stałej.

W dziedzinie silników spalinowych cząstki stałe definiuje się jako PM_{TOTAL} , produkty organiczne lub nieorganiczne, które zostały zebrane na filtrze, przez który przechodzi strumień rozcieńczonych

spalin w temperaturze $52 \pm 3^\circ\text{C}$ [9]. PM_{TOTAL} składa się z dwóch podstawowych frakcji PM_{SOF} oraz PM_{INSOL} . Pierwsza z nich jest frakcją rozpuszczalną, natomiast druga jest nierozpuszczalna, a głównym składnikiem jest węgiel o strukturze podobnej do grafitu. W składzie PM_{INSOL} występuje również woda związana z siarczanami, związki azotu, metale i inne cząstki zawierające węgiel. Ponadto w ich strukturze mogą się pojawiać metale pochodzące z produktów ścierania. Frakcja rozpuszczalna składa się z węglowodorów pochodzących z paliwa PM_{FUEL} , powstałych w wyniku spalania zbyt bogatej mieszanki, procesu gaszenia, złego przepłukania cylindra oraz zmniejszenia temperatury w wyniku rozprężania. W PM_{SOF} wyróżnia się również składniki pochodzące z oleju smarującego [9].

2. Metodyka badań

Objektami badawczymi były dwa skutery miejskie różniące się między sobą typem zastosowanego tłoka. W pierwszym przypadku badany był pojazd wyposażony w standardowy tłok dostarczony przez producenta. Drugiej serii pomiarów poddany został skuter, w którego silniku zamontowano tłok o specjalnej konstrukcji (rys. 1). Umożliwia on pracę jednostki na mieszankach charakteryzujących się mniejszym udziałem oleju w stosunku do benzyny niż to przewidział producent pojazdu. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe fabryczne dane techniczne pojazdów.

Tabela 1. Dane techniczne badanych skuterów

Typ	dwusuwowy, zapłon iskrowy
Pojemność	0,049 dm ³
Prędkość max. z blokadą	45 km/h
Prędkość max. bez blokady	75 km/h
Max. prędkość obr. wału korbowego	9000 obr/min
Moc (silnika) z blokadą	3,3 kW (4,5 KM)
Hamulec przód/tył	tarczowy hydrauliczny
Rozmiar opony przód/tył	130/60÷13
Wymiary: dł./szer./wys.	1880/740/200 mm
Masa własna	92 kg
Nośność	150 kg

Opis patentu nr 10 2005 030 556 „TŁOK WIELOCZEŚCIOWY I METODA WYTWARZANIA TŁOKA WIELOCZEŚCIOWEGO” (zgłoszenie PCT/EP2006/005986) stanowi, że w pojeździe wykorzystano tłok wieloczęściowy, z przynajmniej jedną częścią górną i jedną dolną z płaszczem tłoka, będącym częścią ślizgową. Część górna tworzy przynajmniej fragment denka tłoka. Następnym założeniem omawianej konstrukcji jest wykonanie poszczególnych części z różnych materiałów. Połączenie poszczególnych części tłoka może być reali-

zowane na różne sposoby. W budowie dolnej części tłoka zastosowane jest aluminium lub stopu aluminium i stanowi obudowę dla wkładki wykonanej z tytanu, żeliwa austenitycznego, stali lub innego materiału [7]. Patent mówi także o sposobie łączenia poszczególnych części tłoka.

W silniku dwusuwowym jeden cykl pracy obejmujący realizację faz dolotu, sprężania, pracy oraz wylotu wykonywany jest w ciągu jednego pełnego obrotu wału korbowego. Wymaga to więc stosowania odpowiednich okien w płaszczyźnie tulei cylindrowych zapewniających przepływ spalin i świeżego ładunku. W przypadku silników o małej pojemności wyklucza to stosowanie oleju smarującego w skrzyni korbowej. Konieczne jest więc dostarczanie oleju smarującego razem z paliwem w celu zapewnienia prawidłowej współpracy zespołu tłokowo-cylindrowego. Z tych powodów w spalinach tego typu pojazdów mogą pojawić się duże ilości PM_{SOF} , w skład których wchodzi PM_{FUEL} .



Rys. 1. Widok pojazdu wyposażonego w tłok modyfikowany

W celu określenia wpływu oleju smarującego na emisje PM w zależności od konstrukcji tłoka, pomiary przeprowadzono w 3 seriach dla następujących stosunków benzyny do oleju smarującego:

- 1:30 dla pojazdu wyposażonego w tłok standardowy (tłok oznaczono w artykule jako st),
- 1:30 dla pojazdu wyposażonego w tłok modyfikowany (tłok oznaczono w artykule jako md),
- 1:100 dla pojazdu wyposażonego w tłok modyfikowany.

Mieszanka o stosunku 30 dm³ benzyny do 1 dm³ oleju smarującego jest zalecana przez producenta pojazdu.

Badane pojazdy zasilane były benzyną o oznaczeniu BP 95. Jest to paliwo bezołowiowe o badawczej liczbie oktanowej wynoszącej 95 jednostek (tab. 2). Jako środek smarny wykorzystano uniwersalny olej półsyntetyczny dedykowany silnikom dwusuwowym wykorzystujących chłodzenie powietrzem lub cieczą. Gęstość oleju w temperaturze 15°C wynosi 870 kg/m³, natomiast lepkość kinematyczna w temperaturze 40°C wynosi 60 mm²/s. Ze

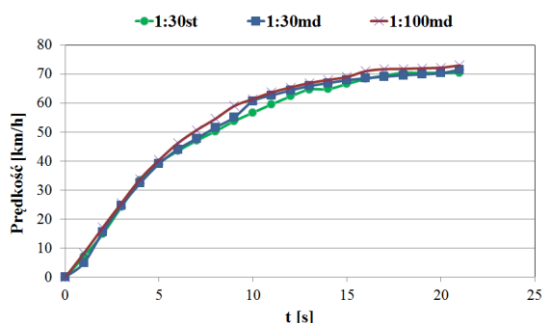
względem na dobrą mieszalność z paliwem może on być dozowany w układzie dolotowym bądź może być mieszany bezpośrednio z paliwem znajdującym się w zbiorniku.

Tabela 2. Podstawowe dane fizykochemiczne benzyny Pb95 użytej podczas badań [6]

Parametr	Metodyka badań	Wynik badania
Gęstość w temperaturze 15°C	PN-EN ISO 12185:2002	750,9 kg/m ³
Prężność par	PN-EN ISO 13016-1:2009	59,7 kPa
Liczba oktanowa badawcza, RON	PN-C-04112:1982	95,9
Liczba oktanowa motorowa, MON	PN-C-04033:1982	85,9
Zawartość ETBE	PN-EN 13132:2005	3,6% (V/V)
Zawartość MTBE	PN-EN 13132:2005	1,6% (V/V)
Zawartość siarki	PN-EN ISO 20846:2011	1,4 mg/kg

Badania emisji skuterów zrealizowano na motocyklowej hamowni podwoziowej INERTIAL 70 firmy SOFT-ENGINE s.r.l. Odbierana moc maksymalna stanowiska wynosi 59 kW (80 KM), a maksymalna prędkość 180 km/h [14]. Podczas realizacji pomiarów przekazuje ona informacje dotyczące generowanej mocy, momentu obrotowego, przebytego dystansu, przyspieszeń oraz prędkości. Przed rozpoczęciem pracy na stanowisku konieczne jest wprowadzenie szeregu parametrów obejmujących dane dotyczące temperatury i ciśnienia otoczenia, wilgotności, a także korektora – parametr związany z danym motocyklem lub skuterm.

W celu przeprowadzenia oceny emisji PM oraz zużycia paliwa w warunkach niestabilnych zrealizowano badania polegające na rozpędzaniu skuterów w zakresie prędkości 0÷72 km/h. Pomiar realizowano w pełnym zakresie prędkości maksymalnych. Na rys. 2 przedstawiono przebiegi prędkości uzyskanych w kolejnych seriach pomiarowych. Całkowity dystans pojedynczej próby wyniósł w przybliżeniu 475 m.



Rys. 2. Przebiegi prędkości skuterów podczas rozpędzania: st – tłok standardowy, md – tłok modyfikowany

Przed rozpoczęciem każdej serii pomiarowej pojazdy pracowały na charakterystyce zewnętrznej przez 300 s. Dzięki temu możliwe było wypalenie paliwa z układu zasilania, które pozostało z poprzedniej serii pomiarowej. Ponadto pozwoliło to rozgrzać silniki w celu uzyskania prawidłowych kształtów zespołu tłok-cylinder.

Do określenia rozkładu wymiarowego PM wykorzystano mobilny analizator 3090 EEPS (Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer) firmy TSI Incorporated (tab. 3). Analizator pozwala realizować pomiar w sposób ciągły w zakresie średnic cząstek od 5,6 do 560 nm. Częstotliwość próbkowania urządzenia wynosi 10 Hz. Zasada działania urządzenia polega na wykorzystaniu elektrycznej ruchliwości cząstek, która jest zmieniana wykładniczo. Cząstki ładowane są w urządzeniu za pomocą specjalnej elektrody ładującej, a następnie kierowane są pomiędzy współosiowe cylindry wyposażone w czułe elektrody. Badane PM uderzają w elektrody powodując w ten sposób generowanie prądu, który w czasie rzeczywistym odczytywany jest przez sterownik [12].

Tabela 3. Dane techniczne spektrometru TSI EEPS [12]

Rozmiar mierzonych cząstek	5,6÷560 nm
Liczba kanałów pomiarowych	16 kanałów na dekadę (32 łącznie)
Liczba kanałów elektrod	22
Rozdzielczość	10 rozmiarów kanałów/sekundę
Przepływ próbki spalin	10 dm ³ /min
Przyływ sprężonego powietrza	40 dm ³ /min
Temperatura próbki	10÷52°C
Temperatura pracy	0÷40°C

Stężenie PM określono wykorzystując mobilny analizator AVL 438 MSS (Micro Soot Sensor) realizujący ciągły pomiar koncentracji badanego składnika w rozcieńczonych spalinach (tab. 4). Urządzenie działa na zasadzie fotoakustycznej, umożliwiając wykonanie pomiarów już od wartości 5 µg/m³. Analizator mierzy część węglową PM w wyniku absorpcji przez nią modulowanego światła laserowego. W związku z tym próbka gazów jest okresowo ogrzewana i chłodzona, co wpływa na zmianę ciśnienia gazu w komorze pomiarowej. Powstająca fala dźwiękowa jest rejestrowana przez czułe mikrofony [1, 2].

Tabela 4. Dane techniczne analizatora cząstek stałych AVL MSS 438 [1, 2]

Zakres pomiaru	0÷50 mg/m ³
Rozdzielczość	0,001 mg/m ³
Stopień rozcieńczenia	5000
Pobór próbki spalin	2 dm ³ /min
Warunki pracy urządzenia	5÷45°C, 0÷95% wilgotności

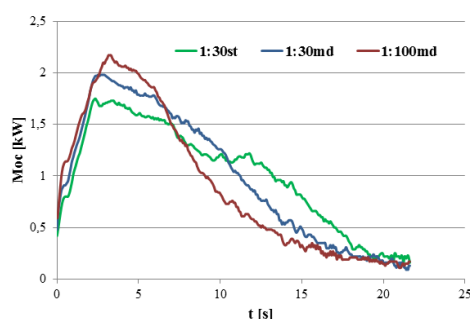
Oprócz wymienionej aparatury w badaniach wykorzystano także sondę masowego natężenia przepływu spalin. Uzbrojone stanowisko badawcze wraz z aparaturą przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Widok stanowiska badawczego w trakcie realizacji pomiarów

3. Analiza wyników badań

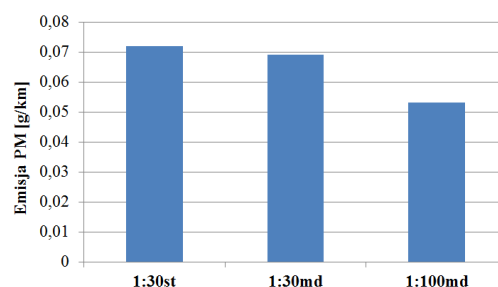
Podczas badań emisyjnych realizowano pomiar generowanej mocy. Największą moc maksymalną (rys. 4) uzyskał skuter wyposażony w tłok zmodyfikowany, zasilany paliwem o stosunku zawartości oleju do benzyny 1:100. Świadczy to o osiągnięciu wysokiej sprawności przebiegu procesu spalania. Najmniejszą moc uzyskał pojazd, w którego jednostce znajdował się tłok standardowy. Duża zawartość oleju w paliwie wykorzystanym do tej próby niekorzystnie wpłynęła na sprawność cieplną.



Rys. 4. Przebiegi generowanej mocy przez skutery podczas rozpędzania: st – tłok standardowy, md – tłok modyfikowany

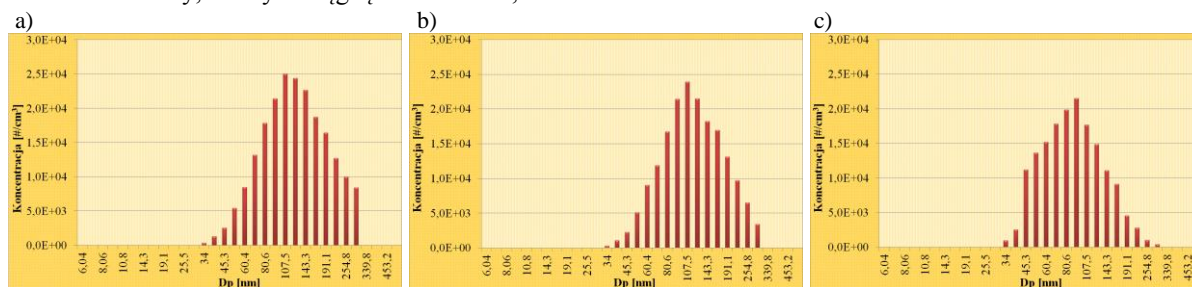
Emisja drogowa PM w trakcie badań rozpędzania została przedstawiona na rysunku 5. Największą emisją charakteryzował się pojazd wyposażony w tłok standardowy, który osiągnął wartość 0,072

g/km. Zastosowanie tłoka o zmodyfikowanej budowie spowodowało zmniejszenie emisji o 4,2 %. Oznacza to, że osiągnięto poprawę procesu spalania, na który wpływa wiele czynników. Między innymi kształt samej komory, a także rozkład temperatur poszczególnych elementów. Najmniejszą emisję uzyskano w przypadku zasilania pojazdu z zaimplementowanym tłokiem modyfikowanym mieszanką o stosunku 1:100. W odniesieniu do konstrukcji standardowej emisja zmniejszyła się o 26,4 %. Wynika to przede wszystkim z faktu, iż w uboższej mieszance jest mniej węglowodorów ciężkich, które trudniej ulegają spalaniu.



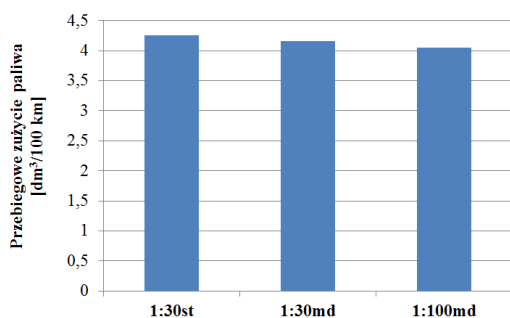
Rys. 5. Emisja PM podczas rozpędzania skuterów: st – tłok standardowy, md – tłok modyfikowany

W celu dokładniejszej oceny emisji PM podczas badań dokonano analizy rozkład wymiarowego ich średnic. Dla wszystkich serii pomiarowych średnice zawierały się w przedziale 34÷294,3 nm (rys. 6). Dla rozwiązania standardowego uzyskano największą koncentrację PM o średnicy 107,5 nm, która wyniosła $2,5 \times 10^4/\text{cm}^3$ (rys. 6a). W przypadku pojazdu wyposażonego w tłok modyfikowany, zasilanego mieszanką zalecaną przez producenta, największa wartość koncentracji przypadła dla tej samej średnicy i wyniosła $2,39 \times 10^4/\text{cm}^3$ (rys. 6b). W ostatniej serii pomiarowej maksymalna wartość koncentracji $2,15 \times 10^4/\text{cm}^3$ przypadła dla średnicy wynoszącej 93,1 nm (rys. 6c). Fakt wystąpienia najniższej koncentracji dla stosunku mieszanki 1:100 wynikał z małej ilości węglowodorów ciężkich zawartych w paliwie, które trudno ulegają utlenianiu ze względu na długie łańcuchy z których są zbudowane. W pozostałych przypadkach większa ilość omawianych węglowodorów poddana została procesom sprzyjającym powstawaniu cząstek stałych, m.in. krakingowi.



Rys. 6. Rozkład wymiarowy PM emitowanych przez skutery w seriach: a) 1:30st, b) 1:30md, c) 1:100 md

Zużycie paliwa podczas badań emisyjności skuterów mierzono przy użyciu miernicy firmy Automex, która wykorzystywała metodę wagową. Zużycie paliwa mierzono w fazie rozpędzania skuterów – począwszy od startu cyklu, aż do osiągnięcia prędkości maksymalnej dla wszystkich cykli badawczych. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki badań przebiegowego zużycia paliwa. Uzyskane wartości wskazują, iż modyfikacja tłoka pozwoliła zmniejszyć zużycie paliwa o 2,5 %. W przypadku serii pomiarowej, gdzie mierzono mieszankę paliwową o stosunku 1:100 różnica wyniosła 4,8%.



Rys. 7. Przebiegowe zużycie paliwa zarejestrowane podczas rozpędzania skuterów: st – tłok standardowy, md – tłok modyfikowany

4. Podsumowanie

Silniki dwusuwowe małej pojemności ze względu na charakter swojej konstrukcji cechują się znaczną emisją HC i PM, co wynika np. ze sposobu przepłukania - trudno osiągnąć wysoki współczynnik przepłukania dla wszystkich punktów pracy

jednostki. Analizując budowę PM stwierdzono, że węglowodory zawarte w paliwie należą do jej głównych składników (PM_{FUEL}).

Wykorzystanie tłoka o dzielonej konstrukcji, który może pracować przy mniejszej ilości oleju smarującego w paliwie, korzystnie wpływa na ekologiczność pojazdu, co potwierdziły przedstawione badania. Ponadto skuter wyposażony w tłok modyfikowany charakteryzował się mniejszym zużyciem paliwa. Porównanie badań realizowanych na takim samym składzie mieszanki wskazuje, że tłok składany wpływa na poprawę procesu spalania. Może to być związane z poprawą kształtu komory spalania, korzystniejszym przebiegiem przepłukania, a także lepszym rozkładem temperatur wewnątrz cylindra. Podczas zasilania pojazdu mieszanką w stosunku 1:100 uzyskano najlepsze wartości badanych parametrów. Na fakt ten miała wpływ mniejsza ilość oleju, który zbudowany jest z długich łańcuchów węglowodorowych.

Motorowery napędzane jednostkami dwusuwowymi z reguły nie są wyposażane w skomplikowane układy oczyszczania spalin jest to związane z niskimi kosztami produkcji. Jednak Unia Europejska definiuje pewne limity homologacyjne dla motocykli i motorowerów [3, 5, 8]. Biorąc to pod uwagę oraz coraz większą świadomość związaną z ochroną środowiska, należy podjąć działania mające na celu osiągnięcie jak największej ekologiczności silników dwusuwowych. Jednym ze sposobów osiągnięcia tego założenia jest opracowywanie nowych rozwiązań pozwalających stosować uboższe mieszanki paliwowe.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

Dp Diameter particulate/średnica cząstki

PM Particulate Matter/cząstka stała

Bibliography/Literatura

- [1] AVL, AVL Micro Soot Sensor. Transient high sensitive soot measurement, Graz 2010.
- [2] AVL, Emissions Test Instruments. Micro Soot Sensor. Continuous measurement of soot concentration, Graz 2008.
- [3] Commission Regulation (EC) No. 692/2008 of 18 July 2008 implementing and amending Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. OJ L 199/1, 29.7.2008.
- [4] Czerwiński J., Comte P., Reutimann A., Mayer A.: Influence of (hydrous) ethanol blends on (particle) emissions of small 2- & 4-stroke scooters – Part 1; a 2012 update. Combustion Engines / Silniki Spalinowe nr 1/2011 (144), p. 29-36, (2011).
- [5] Directive 2002/24/EC OF the European Parliament and of the Council of 18 March 2002 relating to the type-approval of two or three-wheel motor vehicles and repealing Council Directive 92/61/EEC. OJ 124/1, 9.5.2002.
- [6] Orzeczenie laboratoryjne dla benzyny bezołowiowej 95 wykonane przez Laboratorium Paliw Płynnych w Rejowcu Poznańskim.
- [7] Patent nr 10 2005 030 556 „TŁOK WIELOCZEŚCIOWY I METODA WYTWARZANIA TŁOKA WIELOCZEŚCIOWEGO” (zgłoszenie PCT/EP2006/005986).
- [8] Regulacje Ministra Infrastruktury z dnia 28 lipca 2005 r. w sprawie homologacji typu pojazdów samochodowych mających dwa lub trzy koła, niektórych pojazdów samochodowych mających cztery koła oraz motorowe-

-
- rów (DzU nr 162, poz. 1360, z późniejszymi zmianami).
- [9] Serdecki W. red.: Badania silników spalinyowych: laboratorium. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.
- [10] Transport - wyniki działalności w 2011 r. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2012.
- [11] Transport drogowy w Polsce w latach 2005-2009. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2011.

Mr Lukasz Rymaniak, MSc, Eng. – PhD student in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Mgr inż. Łukasz Rymaniak – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Mr Andrzej Ziolkowski, MSc, Eng. – PhD student in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Mgr inż. Andrzej Ziolkowski – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



- [12] TSI Inc.: Particle Instruments. Model 3090 Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer, USA 2005.
- [13] Ustawa o kierujących pojazdami – Dz.U. z 2011 nr 30 poz. 151; brzmienie od 18 stycznia 2013
- [14] Materiały zamieszczone na stronie: <http://www.soft-engine.org/pagine.web/inglese/lowcost01.html>

Mr Maciej Bajerlein, DEng. – doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Dr inż. Maciej Bajerlein – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Mr Michal Dobrzynski, MSc, Eng. – PhD student in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Mgr inż. Michał Dobrzyński – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

