

Jerzy MERKISZ
Jarosław MARKOWSKI
Marta GALANT
Dominik KARPIŃSKI
Kamil KUBIAK

PTNSS-2013-SC-137

The investigation of the influence of the oxygen additive ($\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$) to the JET A-1 fuel on the exhaust emissions from a GTM-120 turbine engine

One of the main trends in the research related to the influence of transport on the natural environment is the reduction of the exhaust emissions. The paper presents the results of investigations and analyses related to the potential for use of the JET A-1 with an oxygen additive ($\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$) in a GTM-120 turbine engine without a modification of the engine and the engine control unit. An evaluation has been performed of the influence of different contents of the additive on the exhaust emission of such components as: carbon monoxide (CO), hydrocarbons (HC), nitric oxides (NO_x), carbon dioxide (CO_2) and PM (PM).

Keywords: jet engine, oxygen additive, exhaust emissions

Badania wpływu dodatku tlenowego ($\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$) do paliwa JET A-1 na emisję związków szkodliwych spalin silnika turbinowego GTM-120

Jednym z kierunków badań związanych z wpływem transportu na środowisko jest ograniczenie emisji szkodliwych składników spalin. W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań i dokonano analizy możliwości wykorzystania paliwa JET A-1 z dodatkiem tlenowym ($\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$) w silniku turbinowym GTM-120, bez modyfikacji silnika oraz zestawu elektroniki sterującej pracą silnika. Przeprowadzono ocenę wpływu różnych zawartości dodatku na emisję związków szkodliwych spalin, takich jak: tlenek węgla (CO), węglowodory (HC), tlenki azotu (NO_x), dwutlenek węgla (CO_2) oraz cząstki stałe (PM).

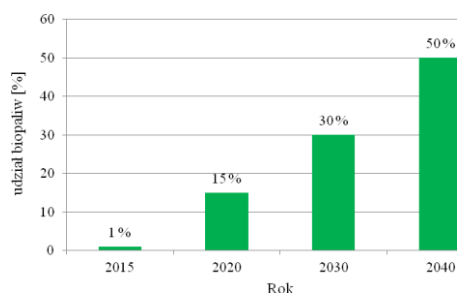
Słowa kluczowe: silnik odrzutowy, dodatek do paliw, emisja spalin

1. Wprowadzenie

W ciągu ostatnich lat obserwuje się znaczny wzrost liczby wykonywanych operacji lotniczych, co w konsekwencji powoduje przyrost liczby użytkowanych statków powietrznych. Niesie to za sobą nie tylko wiele korzyści ale także negatywne skutki takie jak rosnący poziom hałasu i emisji związków szkodliwych spalin. Wzrost negatywnego oddziaływania na środowisko zmusza producentów samolotów do opracowywania nowej generacji napędów i poszukiwania nowych kompozycji paliw, w skład których wchodzi różnego rodzaju dodatki modyfikujące proces spalania pod względem zmniejszenia emisji związków szkodliwych [4]. Dodatkowo dąży się do zastąpienia paliw węglowodorowych paliwami alternatywnymi [1, 5].

W przypadku paliw lotniczych najważniejszymi aspektami są: wartość opałowa, właściwości fizykochemiczne, koszty wytwarzania, dostępność, wpływ na środowisko naturalne, a przede wszystkim spełnienie wysokich wymagań mających wpływ na bezpieczeństwo [4]. Uwzględniając wszystkie wymienione aspekty tradycyjne paliwo lotnicze jest obecnie niezastąpione. Dlatego prowadzi się ocenę możliwości stosowania dodatków obniżających emisję szkodliwych składników spalin. Prowadzone są również badania nad nowymi technologiami produkcji biopaliw lotniczych, tzw. II generacji. Opierają się ona na wykorzystaniu roślin nieużywanych w gospodarce żywieniowej, tj. jatrofa, lnianka, mikroalgi [3]. Duże koncerny lotnicze takie jak Boeing i Airbus organizują próbn

loty samolotów zasilanych biopaliwami. Spośród linii lotniczych niemiecka Lufthansa jako pierwsza uruchomiła regularne połączenie pomiędzy Hamburgiem i Frankfurtem obsługiwane przez samolot zasilany biopaliwem. Paliwo to wyprodukowane zostało przez fiński koncern Neste Oil [7]. Trasa obsługiwana jest przez dwusilnikowy samolot Airbus A321. Jednak tylko jeden z silników maszyny zasilany jest paliwem zawierającym 50% biokomponentu. Planuje się, że już w 2015 r. biopaliwa stanowiąc będą 1% paliw stosowanych obecnie w lotnictwie, w 2020 r. już 15%, następnie 30% w roku 2030, do roku 2040 nawet 50% lotniczego ma być paliwami alternatywnymi co przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Planowany udział biopaliw stosowanych w lotnictwie [2]

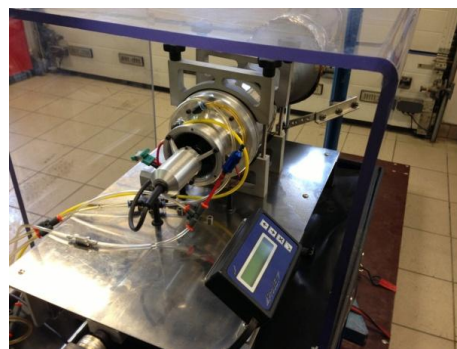
Badania rozwojowe w zakresie stosowania paliw alternatywnych są niezbędne do realizacji zamierzonych planów. Paliwa alternatywne są jednym z kroków pozwalających na ograniczenie globalnej emisji szkodliwych składników spalin ze środków transportu przez częściowe zastąpienie paliw kopalnych. Działania te sprzyjają skróceniu obiegu CO₂ w przyrodzie a tym samym mogą ograniczyć emisję tego związku do atmosfery.

2. Metodyka badań

Głównym celem prowadzonych badań jest określenie wpływu dodatku tlenowego na stężenie szkodliwych składników spalin: tlenku węgla, dwutlenku węgla, tlenków azotu, niespalonych węglowodorów oraz rozkład wymiarowy i liczbę cząstek stałych. Badania wykonano z wykorzystaniem turbinowego silnika GTM 120 (rys. 2). Parametry silnika zestawiono w tabeli 1.

Silnik zbudowany jest z jednostopniowej sprężarki promieniowej, napędzanej za pomocą jednostopniowej turbiny osiowej. W silniku GTM zastosowano pierścieniową komorę spalania a paliwo dostarczane jest do parownic. Do rozruchu silnika wykorzystywany jest rozrusznik elektryczny. Podczas rozruchu silnik zasilany jest gazem LPG. Po uzyskaniu odpowiednich parametrów termodynamicznych następuje przełączenie na zasilanie paliwem właściwym. Na stanowisku ba-

dawczym zainstalowano zestaw elektroniki sterującej, której zadaniem jest realizacja wszystkich funkcji sterujących pracą silnika łącznie z automatycznym rozruchem i studzeniem. Sterowanie silnikiem realizuje się przez regulację wydatku pompy paliwa. Na stanowisku dokonuje się pomiaru prędkości obrotowej wału silnika, temperatury spalin w dyszy wylotowej silnika oraz siły ciągu [6]. Silnik zasilany jest paliwem JET A-1 produkowanym przez PKN Orlen.



Rys. 2. Widok silnika GTM 120 na stanowisku Badawczym

Tabela 1. Parametry silnika turbinowego GTM 120 [6]

Ciąg statyczny [N]	120
Obroty minimalne [obr/min]	33 000
Obroty wirnika przy mocy max. [obr/min]	120 000
Waga silnika [g]	1500
Paliwo podstawowe	JET A-1 +3% oleju MOBILE JET OIL II
Zużycie paliwa [g/min]	340

Badania emisji szkodliwych składników spalin przeprowadzono przy zastosowaniu czterech różnych paliw. Początkowo przeprowadzono próbę dla tradycyjnego paliwa JET A-1. Uzyskane pomiary związków szkodliwych stanowiły materiał porównawczy do wyników badań przeprowadzonych dla paliw JET A-1 z 10% udziałem CH₃(OCH₂CH₂)₃OCH₃, JET A-1 z 20% udziałem CH₃(OCH₂CH₂)₃OCH₃ oraz JET A-1 z 30% udziałem CH₃(OCH₂CH₂)₃OCH₃.

Dodatek stosowany w badaniach jest przezroczystą substancją wykorzystywaną jako rozpuszczalnik [9]. Podstawowe parametry dodatku tlenowego przedstawiono w tabeli 2. Zgodnie ze wzorem chemicznym CH₃(OCH₂CH₂)₃OCH₃ jedna cząsteczka związku zawiera 4 atomy tlenu, dzięki którym można spodziewać się obniżenia emisji cząstek stałych (PM). Atomy tlenu z dodatku przyczyniają się do obniżenia temperatury procesu spalania. Dodatek wprowadzony do paliwa JET A-1 tworzy mieszaninę jednorodną.

Tab. 2. Parametry dodatku tlenowego [9]

Wzór chemiczny	$\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$
Temperatura krzepnięcia	-45 [°C]
Temperatura zapłonu	113 [°C]
Masa molowa	178,23 [g/mol]

Próba polegała na stopniowym zwiększaniu ciągu silnika – od wartości 10 N, uznanej za minimalną, aż do wartości 120 N, określaną przez producenta jako najwyższa możliwa nastawa ciągu silnika. Dzięki temu uzyskano 12 punktów pracy silnika, dla których możliwa była analiza stężeń szkodliwych składników spalin. Wartości stężeń rejestrowano po przyłożeniu przepływomierza połączonego z analizatorem do dyszy wylotowej badanego silnika.

Do pomiarów stężeń HC, CO, CO_2 , NO_x wykorzystano analizator spalin SEMTECH DS (rys. 3). Pomiaru masowego natężenia przepływu dokonano za pomocą przepływomierza EFM o średnicy 5" (rys. 4).



Rys. 3. Widok analizatora SEMTECH



Rys. 4. Widok przepływomierza EFM

Do określenia rozkładu wymiarowego cząstek stałych wykorzystano analizator EEPS Engine Exhaust Particle Sizer firmy TSI (rys. 5). Urządzenie dokonuje pomiaru składu granulometrycznego cząstek stałych zawartych w spalinach. Zakres mierzonych wielkości cząstek wynosi od 5,6 do 560 nm. Analizator EEPS pracuje przy ciśnieniu atmosferycznym w celu zapobiegania odparowywaniu części lotnych lub półlotnych [10].

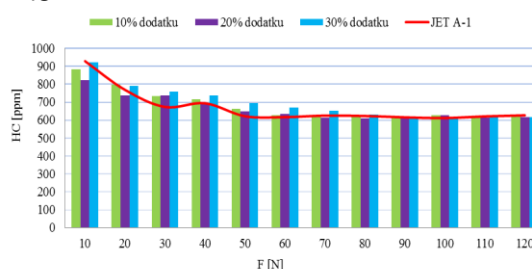


Rys. 5. Widok analizatora EEPS

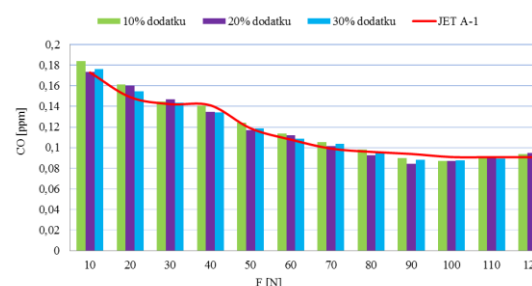
3. Analiza wyników

Dla każdego z kolejnych cykli dokonano pomiaru związków szkodliwych spalin. W celu wyciągnięcia wniosków dotyczących emisji sporządzono charakterystyki (rys. 6-10). Wyniki odnoszą się do wartości stężeń związków szkodliwych w kolejnych 12 cyklach pracy silnika.

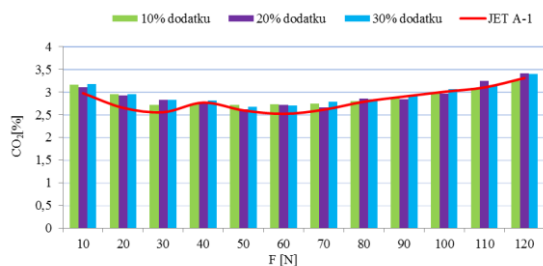
Emisja zarówno HC, CO jak i CO_2 jest ściśle związana z ilością tlenu w mieszance paliwowo-powietrznej. Wyższa emisja w początkowych fazach pracy silnika spowodowana jest tym, że ciśnienie na wlocie do komory spalania jest stosunkowo niskie. W takich warunkach może dochodzić do powstawania stref o nierównomiernej koncentracji paliwa co prowadzi do niedopalania całej mieszanki paliwowo-powietrznej. W miarę zwiększania siły ciągu rozgrzewa się komora spalania i uzyskiwany jest coraz korzystniejszy stan cieplny pozostałych elementów silnika. Spadek stężenia związków przy wyższych wartościach siły ciągu wynika z tego, że wraz ze wzrostem siły ciągu wzrasta prędkość obrotowa wirnika co powoduje zwiększenie ilości doprowadzonego powietrza, a w konsekwencji poprawia proces spalania paliwa przyczyniającego się do obniżenia emisji węglowych składników spalin. Przy sile ciągu powyżej 50 N paliwo z dodatkiem tlenowym $\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$ charakteryzuje się nieznacznym spadkiem wartości stężenia poszczególnych związków, różnice te wynoszą maksymalnie do 4% (rys. 6 i 7). Badania dowiodły, że dodatek tlenowy $\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$ wprowadzony do paliwa JET A-1 nie wpływa znacząco na emisję tlenków węgla, dwutlenku węgla i niespalonych węglowodorów.



Rys. 6. Stężenie węglowodorów w funkcji ciągu silnika



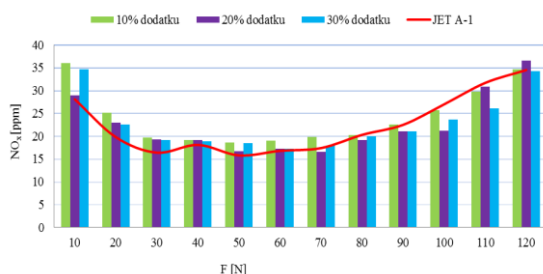
Rys. 7. Stężenie tlenku węgla w funkcji ciągu silnika



Rys. 8. Stężenie dwutlenku węgla w funkcji ciągu silnika

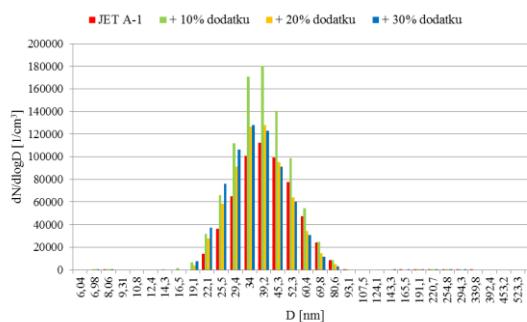
Przebieg zmian emisji dwutlenku węgla ściśle połączony jest ze zużyciem paliwa. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że dodatek tlenowy nie ma wpływu na emisję CO₂. Przebieg zmian emisji dwutlenku węgla przedstawiono na rysunku 8.

Zależność NO_x jest zgodna ze zmianami temperatury gazów wylotowych. Rozgrzewanie się komory spalania powoduje wzrost stężenia tlenków azotu w spalinach. Dodatek, dzięki swojej budowie zwiększa ilość tlenu w mieszance paliwowo-powietrznej. W zakresie ciągu powyżej 80 N zaobserwowano korzystne obniżenie emisji dla paliw z dodatkiem tlenowym. Zmiany te wymagają szczegółowej analizy procesu spalania przewidzianej w kolejnych pracach. Analiza wyników wykazała, że podczas wzrostu siły ciągu dla zakresu powyżej 80 N zachodzi zmniejszenie wartości stężenia tlenków azotu (rys. 9).

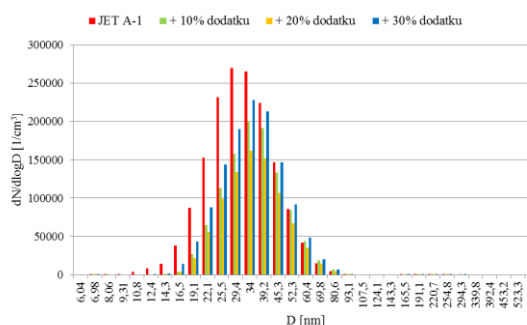


Rys. 9. Stężenie tlenków azotu w funkcji ciągu silnika

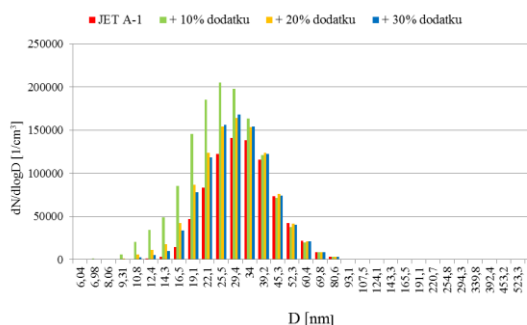
Charakterystykę emisji cząstek stałych przeprowadzono na podstawie zarejestrowanych wyników z wykorzystaniem analizatora EEPs. W analizie określono rozkłady wymiarowe cząstek stałych dla poszczególnych paliw. Są to zależności funkcyjne między względną liczbą cząstek z danego przedziału średnic a wielkością średnią cząstki. Rozkłady zostały opracowane dla każdej badanej wartości siły ciągu – od 10 N do 120 N. Wybrane przebiegi rozkładów przedstawiono na rysunkach 10 – 14.



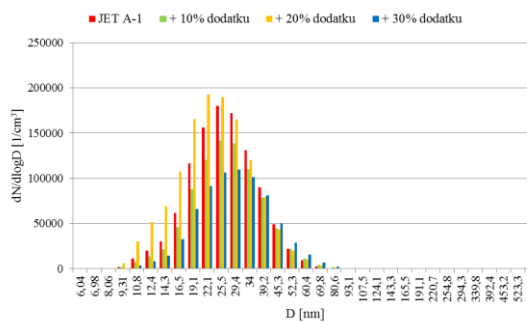
Rys. 10. Rozkład wymiarowy cząstek stałych dla badanych paliw przy sile ciągu 10 N



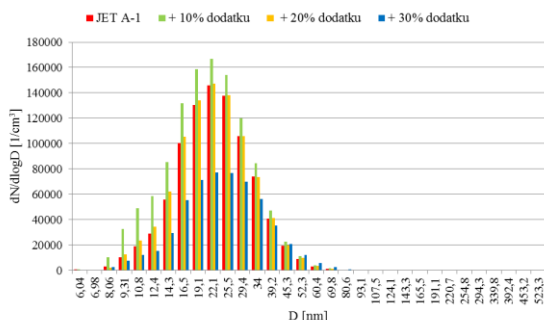
Rys. 11. Rozkład wymiarowy cząstek stałych dla badanych paliw przy sile ciągu 30 N



Rys. 12. Rozkład wymiarowy cząstek stałych dla badanych paliw przy sile ciągu 60 N



Rys. 13. Rozkład wymiarowy cząstek stałych dla badanych paliw przy sile ciągu 90 N

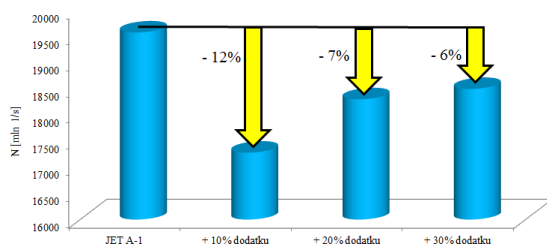


Rys. 14. Rozkład wymiarowy cząstek stałych dla badanych paliw przy sile ciągu 120 N

Przedstawione charakterystyki pokazują dużą zmienność wyników w zależności od analizowanej siły ciągu. Dla wartości ciągu 10 N paliwo JET A-1 wykazuje najniższą emisję cząstek stałych. Przeciwna sytuacja możliwa jest do zauważenia dla 30 N ciągu, w tym przypadku zastosowanie dodatku $\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$ obniżyło emisję PM. Przy maksymalnej sile ciągu – wynoszącej 120 N – zaobserwowano spadek emisji cząstek stałych o 24% dla paliwa z 30% zawartością $\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$.

Zastosowanie dodatku $\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$ nie powoduje zmian w strukturze cząstek stałych, zmienia się ich ilość, lecz rozkład wymiarowy pozostaje praktycznie identyczny.

Liczbę cząstek stałych określono na podstawie iloczynu liczby cząstek w jednostce objętości i przepływu spalin. Sumaryczna liczba cząstek dla całego testu przedstawiono na rysunku 15.



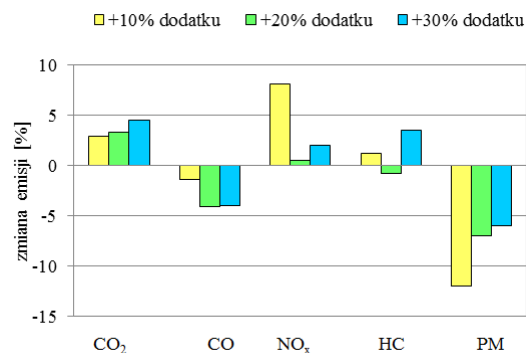
Rys. 15. Zmiana liczby cząstek stałych dla badanych paliw

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania miały na celu ocenę możliwości ograniczenia emisji szkodliwych składników spalin przez zastosowanie dodatku $\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$. Badano wpływ dodatku na

stężenie szkodliwych składników spalin, do których zalicza się tlenek węgla, dwutlenek węgla, tlenki azotu, niespalone węglowodory oraz rozkład wymiarowy i stężenie liczbowe cząstek stałych.

Badania wykazały, że zmiany stężeń składników są niewielkie i wynoszą do 12% (rys. 16).



Rys. 16. Zmiana procentowa emisji CO, CO₂, NO_x, HC oraz PM

Analizując wszystkie wyniki dla poszczególnych paliw można stwierdzić, że najkorzystniejszy wpływ na zmniejszenie emisji związków szkodliwych ma paliwo z 20% zawartością dodatku $\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$. Jedynie przy tym paliwie emisja NO_x pozostaje praktycznie niezmienną. To samo paliwo, jako jedyne z badanych, obniżyło emisję HC (o niecałe 2%), a w przypadku liczby cząstek stałych wykazało spadek o 7%.

W przypadku paliwa z 10-procentową zawartością $\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$ zaobserwowano 8% wzrost stężenia tlenków azotu. Jest to najwyższy wynik spośród badanych paliw.

Paliwo JET A-1 z 30-procentowym udziałem $\text{CH}_3(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_3\text{OCH}_3$ wykazuje zwiększenie stężeń CO₂, HC oraz NO_x kolejno o 4,5%, 3,5% i 2%. Stężenie CO zostało obniżone o 4%, liczba cząstek stałych zmalała o 6%.

Stosowanie dodatków modyfikujących proces spalania pod względem emisji związków szkodliwych spalin jest etapem pomiędzy obecnym zasileniem silników tradycyjnym paliwem JET A-1 a stosowaniem wyłącznie paliw alternatywnych. Określenie odpowiedniej kompozycji paliwa może przyczynić się do zmniejszenia negatywnego wpływu transportu lotniczego na środowisko.

Bibliography/Literatura

- [1] Larisch J., Stelmasiak Z.: Dual fuelling SI engine with alcohol and gasoline. *Combustion Engines No. 2/2011 (145)*, ISSN 0138-0346.
- [2] Malinowski A.: Biopaliwa dla lotnictwa. *Czysta energia*, nr 9/2011 (121).
- [3] Pałowski Z.: Zielone paliwa w lotnictwie. *Eurogospodarka*, nr 4/2011.

- [4] Peitsch D.: Propelling the future – the meaning of ACARE VISION 2050 for the future development of propulsion systems for aircraft. *Combustion Engines* No. 4/2011 (147), ISSN 0138-0346.
- [5] Stelmasiak Z., Semikow J.: The possibilities of improvement of spark ignition engine efficiency through dual fueling methanol and

gasoline. *Combustion Engines* No. 3/2010 (142), ISSN 0138-0346.

- [6] <http://www.jetpol.home.pl/>
 [7] <http://logistyka.wnp.pl>
 [8] <http://www.sensors-inc.com/>
 [9] <http://www.sigmaaldrich.com/>
 [10] <http://www.tsi.com/>

Prof. Jerzy Merkisz, Dsc., DEng. – Professor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznan University of Technology.

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

e-mail: jerzy.merkisz@put.poznan.pl



Marta Galant, MSc, Eng – PhD student in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznan University of Technology.

Mgr inż. Marta Galant – doktorantka na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

e-mail: marta.m.galant@doctorate.put.poznan.pl



Jarosław Markowski, DEng – doctor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznan University of Technology.

Dr inż. Jarosław Markowski – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej

e-mail: jaroslaw.markowski@put.poznan.pl



Dominik Karpiński, MSc, Eng – PhD student in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznan University of Technology.

Mgr inż. Dominik Karpiński – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

e-mail: dominik.p.karpinski@doctorate.put.poznan.pl



Kamil Kubiak, MSc, Eng – PhD student in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznan University of Technology.

Mgr inż. Kamil Kubiak – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

e-mail: kamil.da.kubiak@doctorate.put.poznan.pl

