

Jerzy MERKISZ  
Jarosław MARKOWSKI  
Marta GALANT  
Dominik KARPIŃSKI  
Kamil KUBIAK

PTNSS–2013–SC–138

## The investigations into the influence of ethanol additive to Jet A-1 fuel on the exhaust emissions from a GTM-120 turbine engine

*The paper presents the research on the GTM-120 engine fueled with Jet A-1 fuel and Jet A-1 fuel with the addition of ethanol ( $C_2H_5OH$ ). During the tests the content of the main exhaust components in the exhaust gas was measured – CO, HC,  $NO_x$ ,  $CO_2$  and PM. In the tests the authors used a SEMTECH DS analyzer and an EEPS spectrometer. The results were subject to an analysis based on which the influence of ethanol as a fuel additive on the exhaust emissions was determined.*

*Keywords: jet engine, exhaust emissions, alternative fuels, ethanol*

## Badania wpływu dodatku etanolu do paliwa Jet A-1 na emisję związków szkodliwych spalin silnika turbinowego GTM-120

*W artykule przedstawiono badania silnika GTM-120 zasilanego Jet A-1 oraz paliwem Jet A-1 z dodatkiem etanolu ( $C_2H_5OH$ ). Podczas badań mierzono zawartość głównych gazowych składników spalin CO, HC,  $NO_x$ ,  $CO_2$  oraz cząstek stałych. W badaniach wykorzystano analizator SEMTECH DS oraz spektrometr EEPS. Wyniki badań poddano analizie na podstawie której określono wpływ etanolu jako dodatku do paliwa Jet A-1 na emisję związków szkodliwych spalin.*

*Słowa kluczowe: silnik odrzutowy, emisja spalin, paliwa alternatywne, etanol*

### 1. Wprowadzenie

Rozwój cywilizacyjny niesie ze sobą ciągły wzrost zapotrzebowania na energię. Zużycie paliw wzrasta w tempie około 3% rocznie, co powoduje wzrost zanieczyszczeń środowiska szkodliwymi składnikami spalin takimi jak: tlenek węgla (CO), dwutlenek węgla ( $CO_2$ ), węglowodory (HC), tlenki azotu ( $NO_x$ ), cząstki stałe (PM) [3].

W zakresie transportu lotniczego wzrost liczby eksploatowanych statków powietrznych w ciągu ostatnich lat, wiąże się ze wzrostem intensywności operacji lotniczych. Przyczynia się do wzrostu zapotrzebowania na paliwa kopalne generując zwiększoną emisję związków szkodliwych spalin. Emisja szkodliwych składników spalin pochodzących z transportu lotniczego, przyczynia się do pogorszenia jakości powietrza, zwłaszcza w obrębie lotnisk, jak również sprzyja wzrostowi efektu cieplarnianego. Poziom emisji generowanej przez statki powietrzne zależy w dużym stopniu od stosowanych zespołów napędowych oraz konstrukcji płatowca. W tym celu podejmowane są prace nad nowymi technologiami i konstrukcjami silników lotniczych oraz statków powietrznych. Postęp technologiczny w dziedzinie silników lotniczych powinien uwzględniać zapewnienie odpowiednich parametrów eksploatacyjnych, niezawodności, po-

ziomu bezpieczeństwa, a także spełnić odpowiednie wymogi w zakresie ochrony środowiska [1]. Jednym z kierunków realizacji tych zadań, a w szczególności w aspekcie ekologicznym, jest wprowadzenie do zasilania silników lotniczych paliw alternatywnych. Do najbardziej rozpowszechnionych paliw alternatywnych zaliczane są przede wszystkim etanol i estry pochodzenia roślinnego. Wzrastające ich zastosowanie jest spowodowane możliwością tworzenia mieszanek etanolu z benzyną i estrów olei roślinnych z olejem napędowym [2, 5].

Przydatność alkoholi jako dodatków do paliw lotniczych jest uzależniona wieloma czynnikami, do których należą m.in.: własności fizykochemiczne wpływające bezpośrednio na proces spalania, koszty wytwarzania oraz aspekty ekologiczne. Możliwość stosowania alkoholi jako paliwa znana jest od dawna i z powodzeniem stosowana do zasilania silników tłokowych, w szczególności w państwach Ameryki Południowej. W Europie również istnieją koncepcje silników 2-paliwowych, ale na szerszą skalę stosuje się alkohole jako 5% dodatku do benzyn wykorzystywanych do zasilania silników ZI, stosowanych w motoryzacji. Zaletą wykorzystania alkoholi jest przede wszystkim możliwość wytwarzania ich z surowców odnawialnych. W lotnictwie wyraźnie zauważalny jest wzrost zainteresowania biopaliwami. W związku z oceną

możliwości wykorzystania biopaliw do zasilania turbinowych silników lotniczych, prowadzi się wiele badań laboratoryjnych, a także podejmowane są próbné loty z użyciem tego rodzaju paliwa [10].

## 2. Metodyka badań

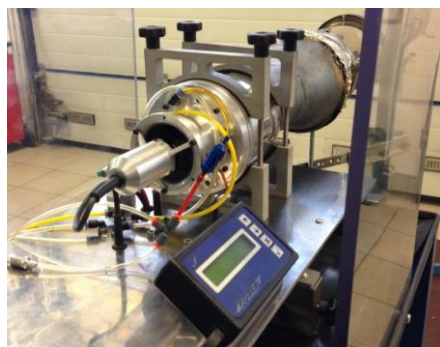
Celem badań jest określenie wpływu dodatku etanolu do paliwa lotniczego Jet A-1 na wartości stężeń CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub>, oraz PM, w spalinach silnika turbinowego. Badania emisji związków szkodliwych zawartych w spalinach silnika odrzutowego rozpoczęto od przeprowadzenia pomiarów w przypadku zasilania silnika paliwem Jet A-1. Uzyskane wartości stężeń związków szkodliwych zawartych w spalinach silnika stanowią odniesienie do wartości stężeń związków szkodliwych spalin podczas zasilania silnika paliwami zawierającymi dodatek etanolu o udziałach 10%, 20%, 30%.

Etanol jest bezbarwną cieczą mieszającą się w każdym stosunku z wodą i prawie wszystkimi rozpuszczalnikami organicznymi. Etanol jako dodatek do tradycyjnego paliwa lotniczego może być stosowany w ilości nawet do 30% udziału bez konieczności zmian konstrukcyjnych w silniku [4]. Zawiera w swojej budowie tlen, dlatego też wykazuje mniejsze teoretyczne zapotrzebowanie na powietrze podczas procesu spalania [6]. W porównaniu z paliwem Jet A-1, etanol ma mniejszą wartość opałową, jak również wykazuje niższą temperaturę wrzenia i zapłonu (tab. 2).

Tabela 2. Własności fizykochemiczne paliw Jet A-1 i Etanolu [4, 8]

Nazwa właściwości	Oznaczenie paliwa	
	JET A-1	Etanol
Gęstość w temp. 20°C [kg/m <sup>3</sup> ]	816	789
Wartość opałowa [MJ/kg]	42,8	27,2
Temperatura zapłonu [°C]	38	12
Temperatura wrzenia [°C]	150-290	78,4

Badania wpływu dodatku etanolu na stężenia związków szkodliwych zawartych w spalinach silnika lotniczego przeprowadzono na silniku odrzutowym GTM-120 zainstalowanym na stacjonarnym stanowisku badawczym (rys. 1). Silnik jest



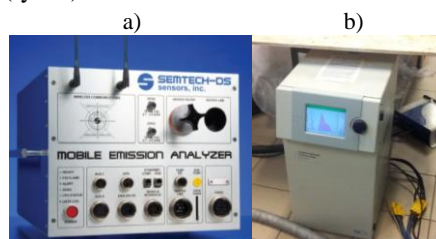
Rys. 1. Widok silnika GTM-120 na stanowisku badawczym

jednoprzepływowy, jednowałowy z jednostopniową sprężarką odśrodkową współpracującą z dyfuzorem, która napędzana jest jednostopniową turbiną osiową. Do rozruchu silnika wykorzystywany jest rozrusznik elektryczny zamontowany przed wlotem powietrza do sprężarki. Podczas rozruchu silnik zasilany jest paliwem LPG. Po osiągnięciu odpowiednich parametrów termodynamicznych silnika, następuje automatyczne przełączenie zasilania na paliwo ciekłe. Stanowisko wyposażone jest w elektroniczny sterownik silnika. Pomiar ciągu realizowany jest czujnikiem tensometrycznym, natomiast pomiar temperatury gazów wylotowych – termoparą umieszczoną w dyszy wylotowej [7]. Dane techniczne badanego silnika turbinowego przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Dane techniczne silnika turbinowego GTM-120 [7]

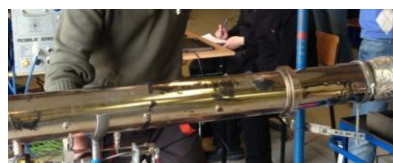
Ciąg statyczny [N]	120
Obroty wirnika przy mocy max. [obr/min]	120 000
Obroty minimalne [obr/min]	33 000
Zużycie paliwa [g/min]	340
Zasilanie	JET A1+3% oleju MOBILE Jet Oil II
Masa silnika [g]	1500

Do przeprowadzenia badań emisji związków szkodliwych spalin wykorzystano analizator spalin Semtech DS firmy Sensors Inc. oraz spektrometr EEPS (Engine Exhaust Particle Sizer) 3090 firmy TSI (rys. 2).



Rys. 2. Widok aparatury pomiarowej: a) Semtech DS, b) EEPS

Za pomocą analizatora spalin Semtech DS dokonano pomiaru stężenia gazowych składników spalin. Spektrometr EEPS umożliwił określenie emisji cząstek stałych. Próbkę gazów wylotowych pobierana była przy wykorzystaniu przepływomierza EFM (Exhaust Flow Meter) firmy Sensors Inc. (rys. 3) o średnicy 5".



Rys. 3. Przepływomierz EFM

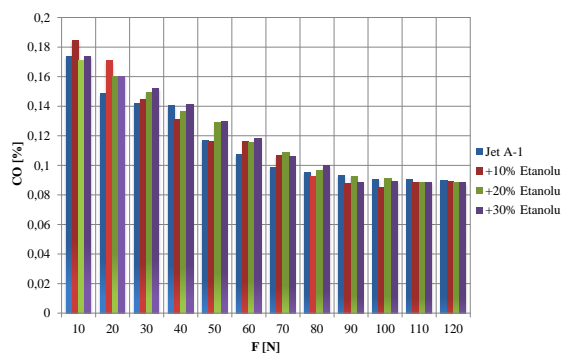
Na potrzeby realizacji pomiarów emisji związków szkodliwych spalin zastosowano redukcję, umożliwiającą połączenie badanego silnika z przepływomierzem spalin.

Analizator Semtech DS umożliwia pomiar wartości stężeń CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub> oraz O<sub>2</sub>. Połączenie analizatora z przepływomierzem EFM pozwoliło na pomiar masowego natężenia przepływu spalin. Za pomocą spektrometru EEPS możliwy jest pomiar składu granulometrycznego cząstek stałych zawartych w spalinach. Analizator pozwala na pomiar emisji cząstek stałych w zakresie średnic od 5,6 nm do 560 nm, w czasie 1/10 sekundy. Dzięki częstotliwości pomiarów wynoszącej 10 Hz analizator ten nadaje się do wykonywania pomiarów dynamicznych w szerokim zakresie koncentracji cząstek stałych [9]. Pomiaru stężenia związków szkodliwych spalin dokonano dla ustalonych wartości ciągu w zakresie od 10 do 120 N.

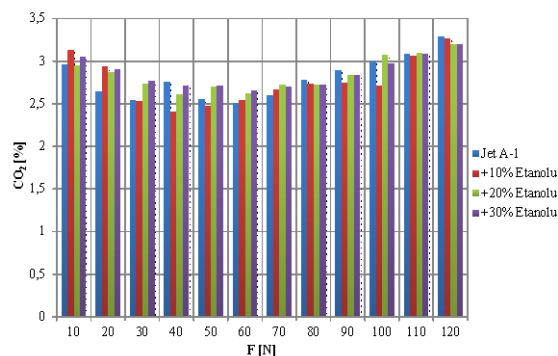
### 3. Analiza wyników pomiaru

Przedstawione w artykule wyniki odnoszą się do wartości maksymalnych stężeń, uzyskanych w czasie przeprowadzonych badań. Obejmują one wartości otrzymane dla podstawowego paliwa Jet A-1 oraz paliwa z dodatkiem 10%, 20%, 30% etanolu.

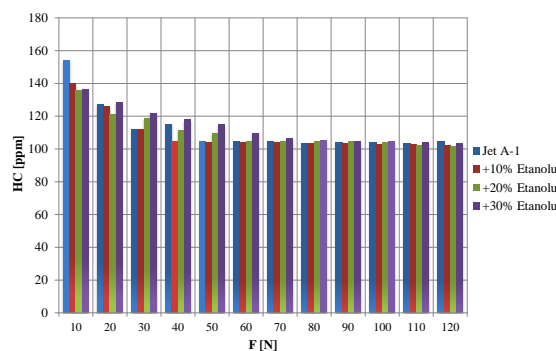
Zasilanie silnika odrzutowego paliwem lotniczym Jet A-1 z zawartością etanolu nie wykazuje tendencji do obniżania wartości stężeń CO, CO<sub>2</sub>, HC, w stosunku do paliwa Jet A-1 bez udziału alkoholu (rys. 4, 5, 6).



Rys. 4. Stężenie CO w funkcji ciągu silnika



Rys. 5. Stężenie CO<sub>2</sub> w funkcji ciągu silnika



Rys. 6. Stężenie HC w funkcji ciągu silnika

Wartości stężeń tlenku węgla były na ogół wyższe dla paliwa lotniczego z zawartością etanolu w porównaniu do paliwa Jet A-1. Stopniowe obniżenie wartości stężeń tlenku węgla zaobserwowano dla paliwa lotniczego z zawartością etanolu, w zakresie ciągu silnika od 90 N do 120 N. Największy spadek wartości stężeń CO zanotowano dla paliwa lotniczego z 10% udziałem etanolu, które przyczyniło się do zmniejszenia wartości stężeń CO o około 6% dla wartości ciągu silnika 90 N i 100 N, względem paliwa Jet A-1.

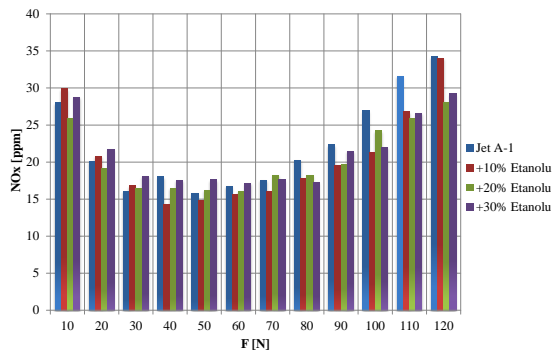
W przypadku pracy silnika odrzutowego przy zasilaniu paliwem Jet A-1 z zawartością etanolu zaobserwowano stosunkowo niewielki wpływ udziału alkoholu w paliwie lotniczym na wartości stężeń CO<sub>2</sub>. W czasie całych badań poziomy stężeń dwutlenku węgla nieznacznie wzrosły dla paliwa lotniczego z zawartością etanolu w zakresie niskich i średnich wartości ciągu silnika.

Poziom stężeń niespalonych węglowodorów, utrzymywał się w przybliżeniu na jednakowym poziomie dla średnich oraz wysokich wartości ciągu silnika. Największe obniżenie wartości stężeń węglowodorów zaobserwowano dla ciągu silnika wręgowego 10 N przy zasilaniu silnika paliwem Jet A-1 z udziałem etanolu, gdzie spadek wartości stężenia HC wyniósł około 11% w stosunku do paliwa Jet A-1. Podobnie jak w przypadku przebiegu emisji CO, wzrostowi ciągu silnika towarzyszył spadek emisji niespalonych węglowodorów.

Obniżenie wartości stężeń CO, CO<sub>2</sub>, HC przy wyższych wartościach ciągu silnika zasilanego paliwem Jet A-1 z udziałem etanolu, wiąże się ze zmianą parametrów fizykochemicznych paliwa, co wpływa na jego odparowanie w układzie zasilania a w konsekwencji poprawia przebieg procesu spalania. Zastosowanie alkoholu etylowego jako dodatku do paliwa Jet A-1 przyczynia się do obniżenia ilości węgla w składzie chemicznym mieszanki. Zmniejszanie CO i HC wraz ze wzrostem ciągu silnika jest charakterystyczne dla turbinowych silników odrzutowych. Stanowią one produkty niepełnego spalania, a ich emisja zależy w dużym stopniu od warunków tworzenia mieszanki.

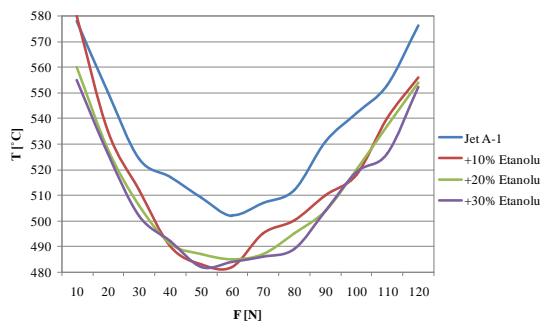
Wartości stężeń NO<sub>x</sub> dla paliwa Jet A-1 i paliwa Jet A-1 z zawartością etanolu, utrzymywały się

na względnie zbliżonych poziomach w zakresie niskich i średnich wartości ciągu silnika (rys. 7).



Rys.7. Stężenie  $NO_x$  w funkcji ciągu silnika

Znaczne zmniejszenie wartości stężeń tlenków azotu zaobserwowano dla pracy silnika odrzutowego w zakresie ciągu silnika od 80 N do 120 N, przy zasilaniu silnika paliwem Jet A-1 z udziałem etanolu. Największy spadek wartości stężeń  $NO_x$  w spalinach zanotowano przy zastosowaniu paliwa lotniczego z 10% zawartości etanolu, dla ciągu silnika wynoszącego 100 N. Uzyskano zmniejszenie stężenia  $NO_x$  o około 20% w porównaniu do wartości stężeń  $NO_x$  otrzymanych dla paliwa odniesienia Jet A-1. Uzyskany przebieg stężeń  $NO_x$  wykazuje korelację ze zmianami wartości temperatury gazów wylotowych (rys. 8).

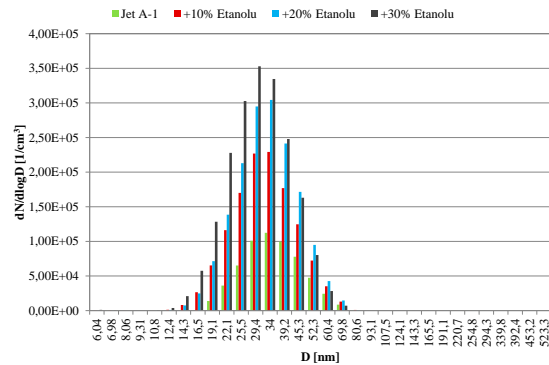


Rys. 8. Temperatura gazów wylotowych w zależności od ciągu silnika

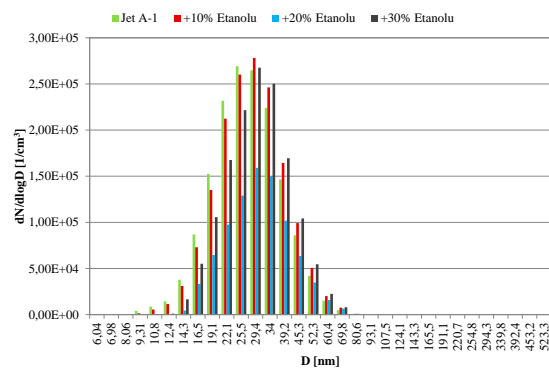
Na podstawie otrzymanych wartości temperatur gazów wylotowych stwierdzono wyraźne różnice w przebiegu zmian temperatur w zależności od zastosowanego rodzaju paliwa. W zakresie zmiany zawartości etanolu od 10% do 30% zaobserwowano stopniowy spadek temperatury gazów wylotowych. Najniższe wartości temperatury spalin zmierzono podczas pracy silnika zasilanego paliwem Jet A-1 z 30% zawartością etanolu. W badanym zakresie ciągu silnika uzyskano spadek temperatury gazów wylotowych o około  $20^{\circ}C$  w stosunku do wartości temperatur otrzymanych w czasie zasilania silnika paliwem Jet A-1 bez zawartości alkoholu. Przebieg zmian temperatury mierzonej w dyszy wylotowej

badanego silnika, potwierdza zasadność spadku stężenia tlenków azotu. Wysoka temperatura gazów wylotowych i związany z tym wysoki poziom stężeń  $NO_x$ , przy niskich wartościach ciągu silnika, jest efektem małej wartości masowego natężenia przepływu. Dalszy przebieg temperatury gazów wylotowych wynika z charakterystyk sprężarki i turbiny.

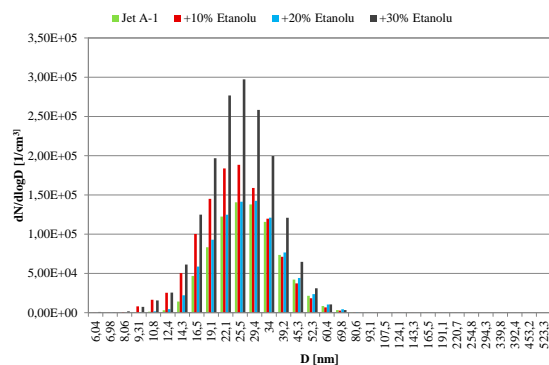
Analizując przebiegi rozkładów wymiarowych cząstek stałych otrzymanych dla badanych rodzajów paliw zaobserwowano zróżnicowany wpływ udziału etanolu w paliwie Jet A-1 (rys. 9-13).



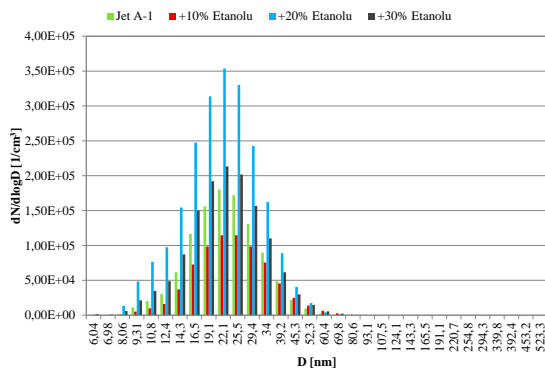
Rys. 9. Rozkład wymiarowy cząstek stałych dla badanych paliw odpowiadający sile ciągu 10 N



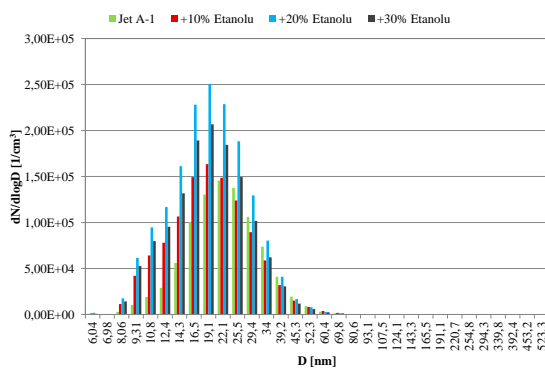
Rys. 10. Rozkład wymiarowy cząstek stałych dla badanych paliw odpowiadający sile ciągu 30 N



Rys. 11. Rozkład wymiarowy cząstek stałych dla badanych paliw odpowiadający sile ciągu 60 N



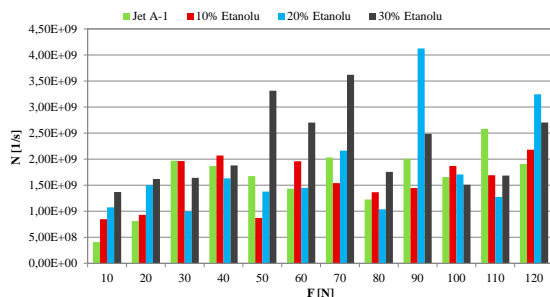
Rys. 12. Rozkład wymiarowy cząstek stałych dla badanych paliw odpowiadający sile ciągu 90 N



Rys. 13. Rozkład wymiarowy cząstek stałych dla badanych paliw odpowiadający sile ciągu 120 N

Na podstawie otrzymanych wartości stężeń liczbowych cząstek stałych, stwierdzono korzystny wpływ udziału etanolu w paliwie Jet A-1 na obniżenie stężenia w zakresie ciągu silnika od 30 N do 110 N w stosunku do paliwa lotniczego. Najwyższe stężenie liczbowe cząstek stałych uzyskano dla paliwa Jet A-1 z 30% udziałem etanolu, dla niskich i średnich wartości ciągu silnika. W przypadku wysokich wartości ciągu silnika zaobserwowano wzrost stężeń liczbowych cząstek stałych przy zasilaniu silnika paliwem lotniczym z 20% udziałem etanolu.

Na podstawie wyznaczonej liczby cząstek stałych w spalinach widoczny jest zróżnicowany wpływ udziału etanolu w paliwie Jet A-1 (rys. 14).



Rys. 14. Liczba cząstek stałych w zależności od ciągu silnika

Liczbę cząstek stałych w spalinach w zależności od ciągu silnika, w przypadku zasilania silnika odrzutowego różnego rodzaju paliwem, wyznaczono na podstawie iloczynu liczby cząstek stałych w jednostce objętości i przepływu spalin. Znaczne zwiększenie liczby cząstek stałych zanotowano dla paliwa Jet A-1 z 30% udziałem etanolu w zakresie średnich wartości ciągu silnika oraz paliwa z 20% udziałem etanolu dla wartości ciągu 90 N oraz 120 N. Dla pozostałych wartości ciągu paliwa z udziałem etanolu wykazują zbliżoną lub obniżoną liczbę cząstek stałych w stosunku do paliwa Jet A-1.

#### 4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania i analiza wyników przedstawiają wpływ stosowania etanolu jako dodatku do paliwa lotniczego, na wartości stężeń gazowych składników spalin oraz stężenia liczbowe cząstek stałych, w spalinach silnika odrzutowego. Przebieg wartości stężeń tlenków węgla, węglowodorów i dwutlenku węgla przy zasilaniu silnika odrzutowego paliwem lotniczym z dodatkiem etanolu, kształtował się na poziomie nie odbiegającym znacznie od wartości stężeń uzyskanych przy stosowaniu paliwa Jet A-1. Najkorzystniejszy wpływ zawartości etanolu w paliwie Jet A-1 zanotowano dla przebiegu wartości stężeń tlenków azotu. Uzyskane zmniejszenie wartości stężeń  $\text{NO}_x$  dla paliwa Jet A-1 z zawartością etanolu, jest wynikiem niższej wartości opałowej alkoholu w stosunku do paliwa Jet A-1, prowadzącej do obniżenia temperatury gazów wylotowych.

Na podstawie otrzymanego rozkładu wymiarowego cząstek stałych oraz liczby cząstek stałych w spalinach, dla badanego zakresu ciągu silnika, nie stwierdzono znaczącego wpływu żadnego z wybranych udziałów etanolu w paliwie.

Badania przeprowadzone przy zasilaniu silnika odrzutowego GTM-120 paliwem lotniczym Jet A-1 z zawartością etanolu, wykazały że udział etanolu w paliwie lotniczym w większości wpływa korzystnie lub nie wykazuje zmiany wartości stężeń związków gazowych oraz stężeń liczbowych cząstek stałych w spalinach. Na podstawie uzyskanych wyników i przedstawionej analizy udało się stwierdzić, że wykorzystanie etanolu o udziale 10% w paliwie lotniczym, do zasilania silnika odrzutowego, umożliwia częściowe zastąpienie obecnie stosowanych paliw kopalnych.

---

## Bibliography/Literatura

- [1] Boguszewicz P. Badania osiągow i emisji spalin silnika lotniczego Franklin-4A zasilonego paliwem AVGAS I E85. Prace Instytutu Lotnictwa 213, Warszawa 2011.
- [2] Bielaczyc P., et. al. A comparison of the exhaust emission of a vehicle fuelled with different ethanol-petrol blends. *Combustion engines*. 2012, **149**(2), 57-65. ISSN 0138-0346.
- [3] Chakuu S., Kozłowski P., Nędza M. Podstawy transportu lotniczego. Konsorcjum Akademickie, Kraków – Rzeszów – Zamość 2012.
- [4] Górski K., i inni. Alkohole i etery jako paliwa dla silników o zaplonie samoczynnym. Politechnika Krakowska, z. 7-M/2008, Kraków 2008.
- [5] Łomankiewicz D., et. al. GC-MS/FID analysis of aldehyde and hydrocarbon emissions from exhaust gases of a spark ignition engine fueled with different ethanol-gasoline blends. *Combustion engines*. 2012, **149**(2), 30-38. ISSN 0138-0346.
- [6] Szewczyk K.W. Zarys możliwości wykorzystania etanolu jako odnawialnego źródła energii. Politechnika Warszawska, Warszawa 2004.
- [7] <http://www.jetpol.home.pl>
- [8] <http://www.orlen.pl>
- [9] <http://www.tsi.katowice.pl/D/KATALOG%20NR%202.pdf>
- [10] <http://www.ekonomia24.pl>

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](mailto:jerzy.merkisz@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](mailto:jaroslaw.markowski@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](mailto:kamil.da.kubiak@doctorate.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](mailto:marta.m.galant@doctorate.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](mailto:dominik.p.karpinski@doctorate.put.poznan.pl)

