

**BIOFUELS FOR TURBINE AVIATION ENGINES
BASED ON BIOHYDROCARBONS
AND OTHER BIOCOMPONENTS**

**BIOPALIWA LOTNICZE OPARTE NA
BIOWĘGLOWODORACH I INNYCH
BIOKOMPONENTACH**

Andrzej Kulczycki, Wojciech Dziegielewski

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
andrzej.kulczycki@itwl.pl, wojciech.dziegielewski@itwl.pl

Abstract: *The theme of the publication are current trends in the introduction of bio-components for jet fuel. This subject is the result of efforts to reduce the burden of aviation on the environment by reducing CO₂ emissions, and Directive 2009/28/EC on the promotion of renewable energy sources indicates the need to introduce biofuels for aviation. The publication will present the concept of the development of JET, containing biocomponents (biohydrocarbons) produced by the use of HVO technology and biocomponents containing oxygen, including biobutanol. Will present the preliminary results of research and analysis of the literature.*

Keywords: *aviation fuel, lubricity, tests for lubricity determination, biocomponents*

Streszczenie: *Tematem publikacji są aktualne kierunki we wprowadzaniu biokomponentów do paliw lotniczych. Tematyka ta jest efektem działań zmierzających do ograniczenia uciążliwości lotnictwa dla środowiska poprzez ograniczenie emisji CO₂. Również dyrektywa 2009/28/WE w sprawie promocji odnawialnych źródeł energii wskazuje potrzebę wprowadzania biopaliw do lotnictwa. W publikacji przedstawiona zostanie koncepcja opracowania paliwa typu JET zawierającego biowęglowodory wytwarzane technologią HVO oraz komponenty zawierające tlen, w tym biobutanol. Przedstawione zostaną wstępne wyniki badań i analiza literaturowa.*

Słowa kluczowe: *paliwo lotnicze, smarność, testy smarności, biokomponenty*

1. Wstęp

Zmieniające się wymagania dla paliw silnikowych zmierzają do poprawy ich jakości poprzez wyeliminowanie kancerogennych składników, takich jak węglowodory aromatyczne oraz zminimalizowanie zawartości siarki, mającej bezpośredni wpływ na skład emitowanych spalin. Podstawowym problemem stawianym obecnie przed lotnictwem jest ograniczenie emisji CO₂. Jednym z możliwych, powszechnie obecnie stosowanych w transporcie naziemnym sposobów redukcji emisji CO₂ jest stosowanie biokomponentów i biopaliw. Zakłada się, że węgiel, zawarty w organicznych związkach zawartych w roślinach, przekształcony w CO₂ w procesie spalania ulega asymilacji, a więc „zabierany” jest przez rośliny z powietrza. Tzw. zamknięty obieg węgla w przyrodzie powoduje, że ilość dwutlenku węgla w atmosferze nie ulega zwiększeniu, gdy spalane są paliwa pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego. Stąd coraz większe zainteresowanie lotnictwa biopaliwami. Znanych i stosowanych w paliwach do silników transportu naziemnego jest wiele rodzajów biokomponentów i biopaliw. Jednak szczególne warunki eksploatacji paliw w lotnictwie pozwalają traktować tylko niektóre z nich, jako potencjalne biokomponenty i biopaliwa do turbinowych silników lotniczych. W referacie niniejszym skupiono się na ilościowo dominujących paliwach do turbinowych silników lotniczych, pomijając benzyny lotnicze, do których może być stosowany bioetanol jako biokomponent.

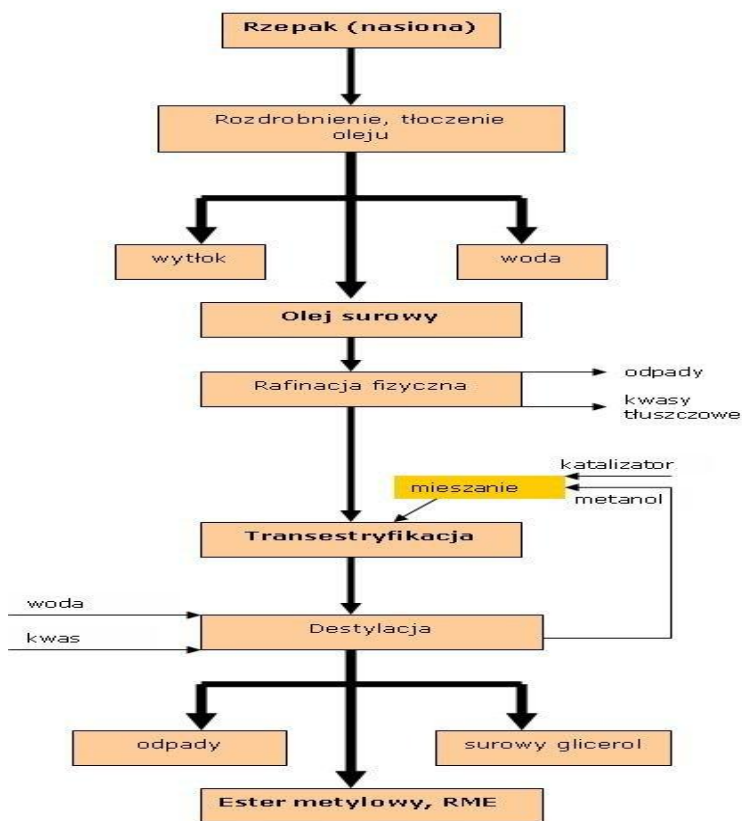
2. Przegląd technologii wytwarzania biokomponentów i biopaliw

Biokomponentami, których właściwości są zbliżone do właściwości paliw lotniczych są FAME i frakcje biowęglowodorowe, rozważane mogą być także wyższe alkohole.

Technologie wytwarzania FAME

Technologie wytwarzania FAME oparte są na procesie transestryfikacji [1]. Proces ten polega na otrzymaniu estrów niższych alkoholi (metanol, etanol) i kwasów tłuszczowych z estrów gliceryny i kwasów tłuszczowych (oleje roślinne lub tłuszcze zwierzęce) w reakcji tłuszczu z alkoholem metylowym lub etylowym w obecności katalizatora alkalicznego. W wyniku reakcji transestryfikacji alkoholem oleju powstają estry alkoholi i glicerol.

W Polsce podstawową rośliną oleistą do produkcji biopaliwa jest i pozostanie rzepak. Zastosowanie mogą tu znaleźć ponadto inne rośliny oleiste: słonecznik, arachid, palma itp. Na poniższym schemacie przedstawiamy austriacką technologię produkcji estrów metylowych "BIO-DIESEL" firmy Vogel i Noot. Na świecie istnieje co najmniej kilka technologii produkcji biodiesela.



Rys. 1 Schemat przykładowej technologii produkcji estrów metylowych kwasów tłuszczowych

Pierwszym etapem technologii produkcji FAME jest czyszczenie, suszenie i rozdrobnienie nasion. Następnie rozdrobnione nasiona są wytłaczane na tłocznich ślimakowych, w wyniku czego otrzymujemy wodę, wytłok i olej surowy.

Proces otrzymania oleju rzepakowego jako wyjściowego surowca do produkcji estrów oleju rzepakowego wymaga: rozdrobnienia nasion, tłoczenia oleju i filtracji. Proces uzyskiwania oleju z nasion może być wzbogacony ponadto o ekstrakcję, bielenie i ponowną filtrację. Surowcem do produkcji biopaliwa może być olej surowy, rafinowany, a także olej zużyty z gastronomii, tzw. olej posmażalniczy.

Odpowiednio oczyszczony olej rzepakowy i mieszanina katalityczna trafiają do reaktora gdzie następuje reakcja transestryfikacji. Następnie mieszanina kierowana jest do destylacji, podczas której następuje oddestylowanie metanolu. Dodatek kwasu ma na celu zneutralizowanie katalizatora alkalicznego, a wody – wpływa na ułatwienie rozdzielenia mieszaniny. W efekcie końcowym otrzymujemy: estry metylowe, odpady (woda, zneutralizowany katalizator), surowy glicerol.

Technologie wytwarzania biowęglowodorów

Znacznie bardziej przydatne do stosowania jako biokomponenty paliw lotniczych są biowęglowodory. Ten rodzaj biokomponentów może być otrzymywany różnymi technologiami. Technologie te pozostają na poziomie doświadczalnym, część z nich realizowana jest już w przemysłowej skali pilotażowej. Do najbardziej zaawansowanych należą technologie:

- HVO (Hydrotreated Vegetable Oils)
- BtL (Biomass to Liquid)

Spośród wymienionych jedynie technologia HVO realizowana jest w skali przemysłowej.

Technologia HVO

Technologia ta stała się konkurencyjną wobec produkcji FAME. Podstawową zaletą technologii HVO jest produkt, będący węglowodorową frakcją oleju napędowego. Właściwości fizykochemiczne i użytkowe tego produktu są zbliżone do mineralnego oleju napędowego.

Surowcem mogą być różnego rodzaju oleje roślinne, przy czym ze względów ekonomicznych firma Neste Oil [2] preferuje olej palmowy. Poniżej scharakteryzowano proces technologiczny:

- katalityczny, wodorowy, temperatura 350-450 C, ciśnienie 30-150 atm
- Produkt: ciekłe węglowodory parafinowe

Przykłady instalacji przemysłowych: Parvoo w Finlandii (Neste Oil) Nex BTL1, 170 tys t/r, rozruch 2007 r.; Nex BTL2, 170 tys. t/r, rozruch 2009 r.; w budowie Singapur 800 tys. t/r rozruch 2010r; Rotterdam 800 tys. t/r rozruch 2011. W 2007 roku UOP i Eni wybudowały instalację pilotażową HVO.

Technologia B-t-L

Technologie BtL wytwarzania syntetycznego biopaliwa drugiej generacji pozwalają na stosowanie prawie wszystkich surowców roślinnych. Technologie te oparte są zgazowaniu biomasy. Jako surowiec stosowane mogą być: drewno oraz rośliny energetyczne, jak również odpady organiczne.[3]

Pierwsza wytwórnia Carbo-V-Technologie o mocy produkcyjnej 15 tys.t./rok paliw silnikowych wybudowała niemiecka firma Choren Industries we Freibergu. Rozwój technologii BtL napotyka na trudności techniczne. Wynikają one z faktu, że ostatnie ogniwo łańcucha technologicznego – synteza biowęglowodorów metodą Fischer-Tropscha, nie pozwala na obecnym etapie otrzymywać w pełni powtarzalnych produktów.

3. Porównanie własności biokomponentów i biopaliw z własnościami paliwa Jet

Omawiane biokomponenty, które mogą być zastosowane w paliwach lotniczych to FAME (głównie RME) oraz biowęglowodory. Technologią wytwarzania biowęglowododorów, najbardziej obecnie zaawansowaną jest uwodornienie tłuszczów – technologia HVO. [7] Produktami są biowęglowodory o własnościach podobnych do własności oleju napędowego wg EN 590, za wyjątkiem niskiej wartości gęstości. W tabelicy 1 zestawiono własności oleju napędowego, biowęglowododorów otrzymanych technologią HVO, oleju napędowego zawierającego 30 %v/v biowęglowododorów i FAME.

Tablica 1. Porównanie typowych własności HVO, oleju napędowego EN 590, oleju napędowego zawierającego 30 % v/v biowęglowododorów EN 590-30 i FAME [6]

Własność	Jednostka miary	HVO	EN 590-30	EN 590 (letni okres)	FAME (nasiona rzepaku)
Gęstość w temperaturze 15 °C	kg/m ³	775...785	70	~835	~885
Lepkość w temperaturze 40 °C	mm ² /s	2,5...3,5	30	~3,5	~4,5
Liczba cetanowa	-	~ 80...90	85,8	~53	~55
Zakres destylacji	°C	~180...320	14,0	~180...360	~350...370
Temperatura mętnienia	°C	-5...-25	6,1	~ -5	~ -5
Wartość opałowa , niższa	(MJ/kg)	~44,0	3	~42,5	~37,5
Zawartość tlenu	%(m/m)	0	20	0	~11
Zawartość siarki	%(m/m)	< 10	13,6 ⁽²⁾	< 10	< 10
Smarność HFRR w temperaturze 60 °C	µm	< 460	12,4 ⁽²⁾	< 460	< 460

4. Doświadczenia w stosowaniu FAME jako paliwa do turbinowych silników lotniczych

Ze względu na podobieństwo podstawowych właściwości fizykochemicznych, najbardziej zbliżonym do paliwa lotniczego typu nafty jest olej napędowy.[4] Biokomponentem, który jest już powszechnie stosowany do paliw do silników o zapłonie samoczynnym są estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME). W ITWL [8] był podjęty program badawczy zmierzający do sprawdzenia przydatności FAME do zastosowania w silnikach turbinowych. Poniżej przedstawiono krótką informację z badań przydatności FAME do zasilania silników lotniczych. Badania przeprowadzono w dwóch etapach:

- etap badań laboratoryjnych z zastosowaniem standardowych metod przyjętych do analiz paliw do turbinowych silników lotniczych,
- etap badań silnikowych – z wykorzystaniem miniaturowego silnika odrzutowego GTM-120 oraz pełnowymiarowego silnika turbinowego SO-3.

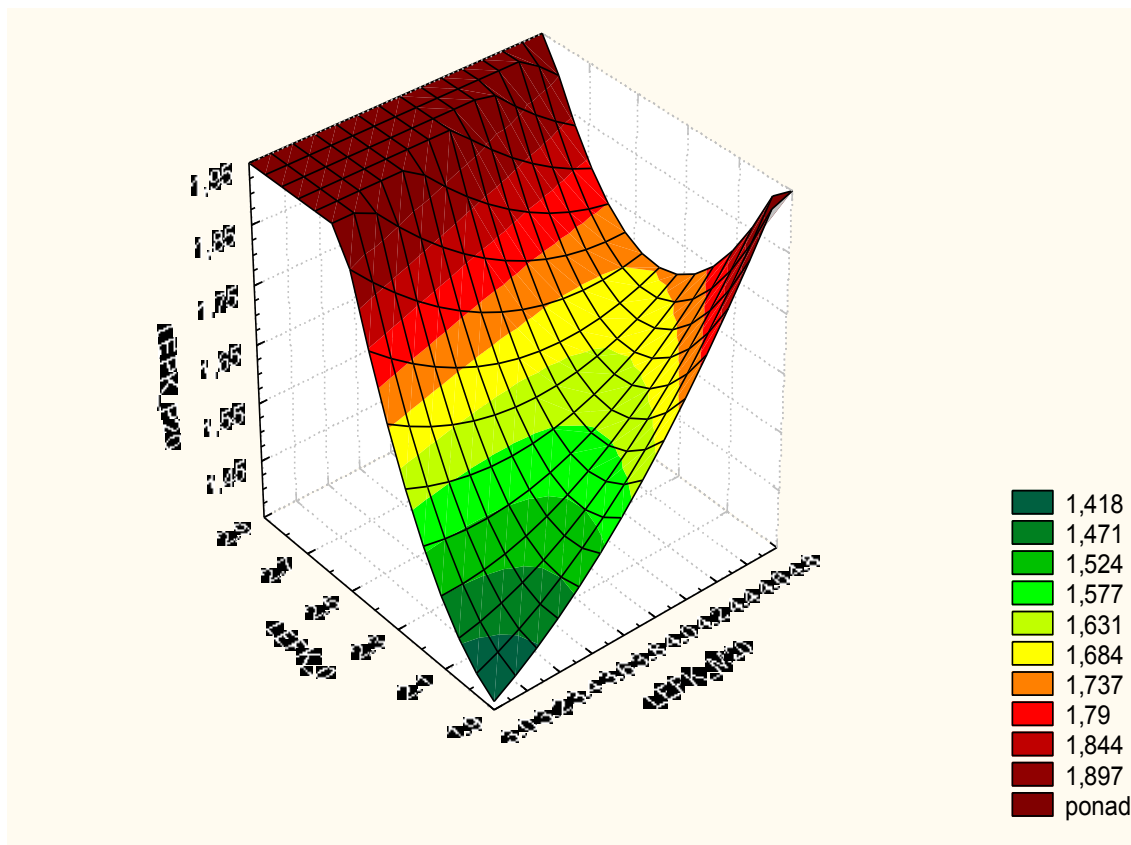
Spśród licznej grupy właściwości fizykochemicznych paliw lotniczych można wyselekcjonować takie, które mogą mieć istotny wpływ na eksploatację silników turbinowych, a jednocześnie ich wielkość jest uzależniona od udziału biokomponentów. Należą do nich przede wszystkim:

- właściwości niskotemperaturowe i reologiczne – określane na podstawie takich parametrów jak: temperatura krystalizacji i lepkość kinematyczna
- odporność na działanie wysokich temperatur – określana jako stabilność termiczna w warunkach dynamicznych (JFTOT) oraz zawartość żywic,
- skłonność do wydzielania wody w procesie filtracji – charakteryzowana przez tzw. oddziaływanie z wodą oraz wskaźnik wydzielania wody,
- właściwości smarne,
- skłonność do skażenia mikrobiologicznego.

Wbrew powszechnie głośzonym poglądom, wyniki badań laboratoryjnych pokazały, że największych zagrożeń i ograniczeń można się spodziewać w innych obszarach. Oczekiwano, że największe problemy będą z utrzymaniem odpowiedniej stabilności termicznej oraz właściwości niskotemperaturowych i reologicznych. Na rysunku 2 przedstawiono przebieg zmian lepkości w funkcji stężenia FAME i temperatury badania. Otrzymane wyniki wykazały podobieństwo przebiegu tej zależności dla FAME i dla mineralnych paliw lotniczych.

Parametrem, który jest podawany jako podstawowa przyczyna ograniczająca zastosowanie biopaliw, w tym przede wszystkim do silników turbinowych, jest stabilność termiczna. Przeprowadzone badania nie do końca potwierdzają tę tezę. Współczesne biokomponenty produkowaną są coraz częściej przy zastosowaniu technologii, w wyniku których można uzyskać stabilny produkt, odporny na działanie podwyższonych temperatur. Dodatkowym czynnikiem wspomagającym jest wprowadzenie dodatku przeciwutleniającego. Badania przeprowadzone metodą oceny stabilności termicznej w warunkach dynamicznych (JFTOT) wg zmodyfikowanej metodyki polegającej na wielokrotnym powtarzaniu badania (bez wymiany paliwa oraz rurki katalitycznej i filtra) aż do całkowitej dyskwalifikacji paliwa.

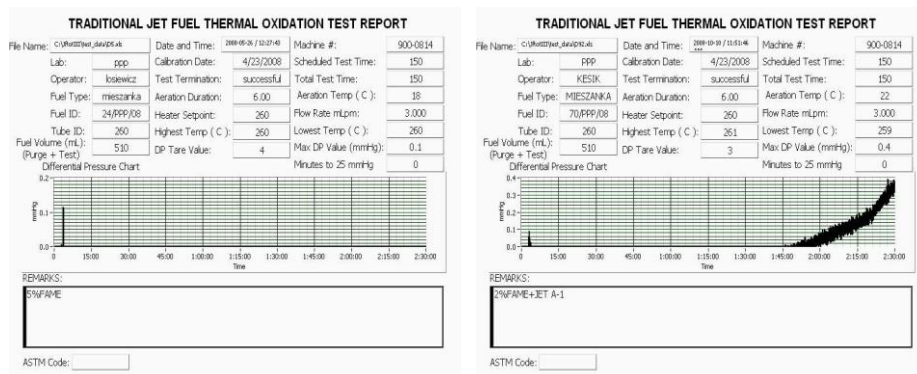
Pozwoliło to na stwierdzenie, czy wprowadzenie biokomponentu do paliwa lotniczego zmieniło jego całkowitą odporność termiczną.



Rys. 2 Wykres powierzchniowy przebiegu zmian lepkości kinematycznej biopaliwa w zależności od stężenia FAME i temp. badania (LEPK_M20 – lepkość w -20°C , LEPK_0 – lepkość w 0°C , LEPK_P20 – lepkość w $+20^{\circ}\text{C}$)

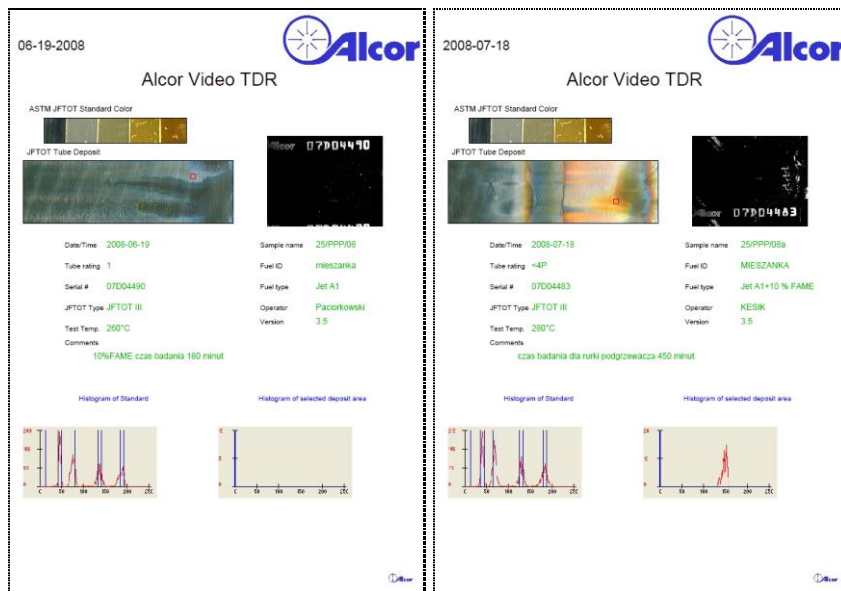
Pomimo wielokrotnych powtórzeń nie otrzymano jednoznacznych wyników. Jednakże stwierdzono, że zarówno charakter przebiegów, jak i liczba cykli była porównywalna dla czystych paliw naftowych oraz dla biopaliw o różnym stężeniu biokomponentu (rysunek 3). W przypadku biopaliw występowała niższa powtarzalność wyników. Częściej uzyskiwano niespodziewane rozbieżności (szczególnie w zakresie pomiarów ciśnień. Świadczyć to może o niecałkowitej przydatności metody do badania tego typu produktu.

*Biofuels for turbine aviation engines based on biohydrocarbons...
Biopaliwa lotnicze oparte na biowęglowodorach i innych biokomponentach*



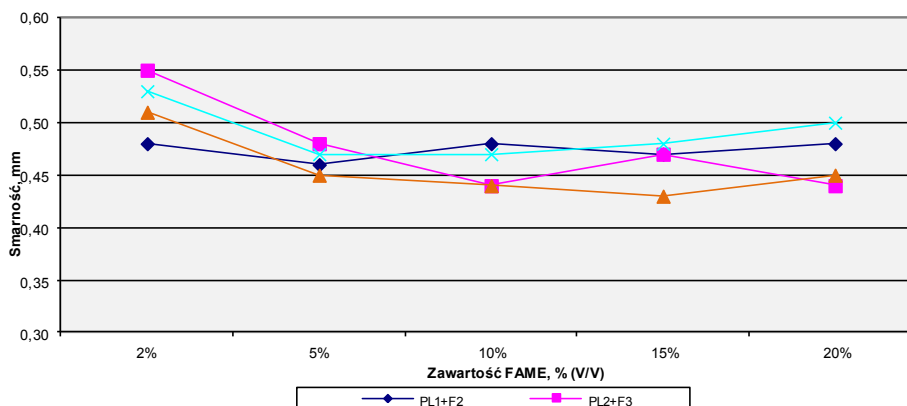
Rys. 3 Przykładowe raporty przebiegu cyklu badań stabilności termicznej biopaliwa (I i VI cykl badania)

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe widma osadów powstałych na rurce katalitycznej. Również i w tym przypadku przebieg powstawania barwnych osadów był podobny, bez względu na badane paliwo. Badania paliwa, w którym zawartość biokomponentu wynosi 10 % (V/V) pokazały, że biopaliwo zachowuje się nie gorzej niż paliwo lotnicze, a zatem wnioskowanie o przydatności na podstawie badań tego parametru nie jest jednoznaczne.



Rys. 4. Przykładowe widmo osadów po badaniach stabilności termicznej czystego paliwa Jet A-1 (I cykl badania) oraz biopaliwa o zawartości FAME 10% (VI cykl badania)

Stereotypy nie do końca potwierdziły się również w przypadku oceny właściwości smarnych. Badania wykonane wg metodyki BOCLE pokazały, że istnieje tendencja początkowego polepszenia się smarności wraz ze zwiększaniem udziału FAME, ale powyżej 15 % (V/V) zaobserwowano tendencję odwrotną (rys. 5). Najlepsze właściwości wykazują mieszanki o zawartości FAME około 15 % (V/V).



Rys. 5 Zależność smarności od zawartości FAME

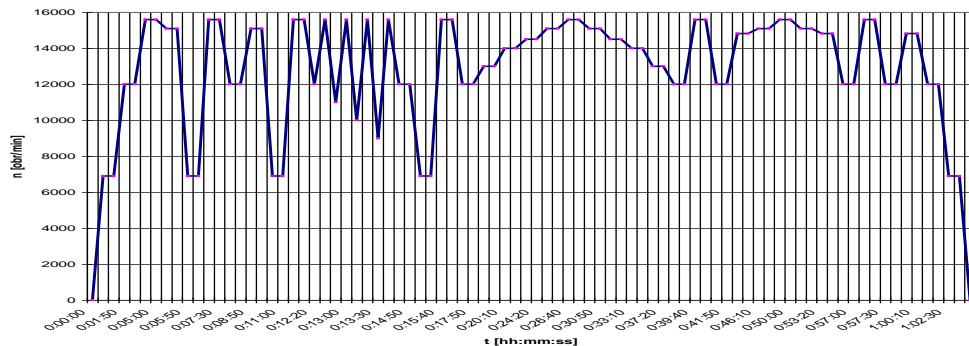
W przypadku paliw do zastosowań lotniczych istotną cechą jest skłonność do wydzielania wody w procesie filtracji. W praktyce wodę oddziela się od paliwa przy użyciu filtrów koalescencyjno – separacyjnych. Podstawową własnością wykorzystywaną w czasie pracy tych urządzeń jest napięcie powierzchniowe. Ponieważ woda i paliwo mają różne napięcia, paliwo jest przepuszczane przez siatkę pokrytą materiałem powierzchniowo czynnym (np. politetrafluoroetylenem), a małe krople wody są wyłapywane na siatce filtracyjnej, a następnie łączą się ze sobą i w postaci większych kropeł spływają do osadnika filtra. W przypadku FAME dochodzi do zaburzenia procesu koalescencji, przez co woda nie zostanie usunięta w dostatecznym stopniu. Przyczyna tego zjawiska nie leży po stronie napięcia powierzchniowego, gdyż wartości dla paliwa naftowego i FAME są zbliżone (odpowiednio: 25,36 i 28,27), co wobec wartości tego parametru dla wody (72,75) nie powinno stanowić problemu. Przyczyna jest inna. Na tym etapie badań można przypuszczać, że cząsteczki FAME oblepiają powierzchnie koalescera i blokują jego działanie. Hipoteza ta wymaga jeszcze potwierdzenia. Na podstawie wyników badań tego parametru należy całkowicie wykluczyć przydatność estrów metylowych kwasów tłuszczowych (biopaliw I generacji) do zastosowań lotniczych.

Tablica 2. Wpływ biokomponentu na właściwości związane z możliwością odwadniania paliwa na filtrach koalescencyjnych

Lp.	Nazwa właściwości	Zawartość biokomponentu (FAME) w paliwie lotniczym, % (V/V)				
		2	5	10	15	20
1	Oddziaływanie z wodą: ocena pow. międzyfazowej	2	3	>3	>3	-
2	Oddziaływanie z wodą: stopień rozdziału faz	3	4	4	>4	-
3	Oddziaływanie z wodą: zmiana objętości fazy wodnej, cm ³	1	1	1	-	-
4	Wskaźnik wydzielania wody	39	0	0	0	0

W niektórych przypadkach – szczególnie w warunkach dodatnich temperatur – obecność niewielkiej ilości wody nie stanowi problemu dla przebiegu procesu spalania. W przypadku silników o zastosowaniach nielotniczych woda w paliwie wpływa nawet pozytywnie m.in. na emisję szkodliwych składników spalin. Nie można jednak wnioskować, że odwadnianie takiego paliwa jest zbędne. W obecności wody wydzielonej każde paliwo narażone jest na skażenie mikrobiologiczne. Biokomponenty ze względu na swoją doskonałą biodegradowalność oraz higroskopijność są bardzo podatne na rozwój mikroorganizmów. Ze względu na praktyczny brak możliwości utrzymania paliwa w stanie bezwodnym, jedynym sposobem na skażenie jest stosowanie biocydów. Należy jednak pamiętać, że są to najczęściej związki chemiczne o stosunkowo dużej agresywności, więc mogą szkodliwie oddziaływać na urządzenia dystrybucyjno – magazynowe oraz materiały, z których wykonane zostały elementy silnika.

Oprócz badań laboratoryjnych przeprowadzono próby silnikowe. Wykorzystano do tego celu miniaturowy silnik odrzutowy GTM-120 oraz pełnowymiarowy silnik turbinowy SO-3. Badania prowadzono wg metody typowych dla tradycyjnych paliw (wg pięciu różnych cyklogramów, pozwalających na przeprowadzenie badań w różnorodnych warunkach i przy różnych cyklach wymuszeń). Przykładowy cyklogram próby silnika przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6 Przykładowy cyklogram próby silnika

W obydwu przypadkach nie stwierdzono praktycznie żadnych różnic w procesie zasilania paliwem oraz w procesie spalania. Skład oraz wielkość emisji gazów spalinowych był nieco korzystniejszy dla biopaliwa. Nie zaobserwowano zwiększonego, w stosunku do tradycyjnego paliwa, nagarowania aparatów wtryskowych, łopatek turbin oraz gorących części komór spalania. Na rysunku 7 przedstawiono fotografie parownic po 20 godzinach pracy silnika zasilanego paliwem tradycyjnym (Jet A-1) oraz biopaliwem o zawartości 10%(V/V) FAME (BioJet 10). Jak widać nagary w obydwu przypadkach są porównywalne.



Rys. 7 Fotografie parownic: przed badaniem (rys. lewy), po 20 h próby na paliwie Jet A-1 (rys. środkowy) i po 20 h próby na paliwie BioJet 10% (rys. prawy)

W warunkach naziemnych nie stwierdzono zatem przeciwwskazań do stosowania paliwa typu BioJet. Na podstawie wyników badań własnych i wstępnych wniosków, które przedstawiono powyżej, można stwierdzić, że istnieją pewne ograniczenia w zastosowaniu biokomponentów jako składników paliw do silników turbinowych. Ze względów oczywistych są one większe dla zastosowań lotniczych. Dla paliw do silników turbinowych stosowanych na lądzie lub w okrętownictwie mogą być one znacznie mniejsze. Jak wykazały praktyczne badania nie zawsze problemów możemy spodziewać się tam, gdzie wydaje się to oczywiste. Związane to może być z niezbyt jeszcze rozpoznaną teoretycznie problematyką oraz jeszcze mniejszym doświadczeniem eksploatacyjnym. Istnieje ponadto możliwość, że ze względu na odmienność chemiczną paliw naftowych i biokomponentów, metody analityczne opracowane dla tych pierwszych nie zawsze mogą być właściwe dla biopaliw lub paliw zawierających biokomponenty.

5. Perspektywy wprowadzenia biowęglowodorów jako biokomponentów paliw do turbinowych silników lotniczych

Wobec przedstawionych powyżej wyników badań znacznie większą uwagę skupia się obecnie na wprowadzaniu biowęglowodorów do paliw lotniczych. Aktualnie firma Solena prowadzi badania w zakresie wykorzystania bioodpadów (z terenu Londynu) do wytwarzania biowęglowodorów. Technologia ich wytwarzania oparta jest na plazmowym zgazowaniu bioodpadów do gazu syntezowego i następnie syntezie biowęglowodorów metodą Fischera-Tropscha. Solena zakłada rozpoczęcie produkcji opartego na tej technologii paliwa Bio-JET w 2014 roku. Solena zamierza także wybudować zakłady w USA (Kalifornia i Nevada) oraz w innych krajach. British Airways zamierza stosować Bio-JET.

Firmą, która rozpoczęła od kwietnia 2011 roku w ramach programu burnFAIR (Future Aircraft Research) stosowanie biowęglowodorów jest Lufthansa. Biowęglowodory otrzymywane są technologią HVO przez firmę Neste. W marcu 2011 roku biokomponent ten uzyskał certyfikat, zezwalający na stosowanie go w silnikach turbinowych. Paliwo jest badane w warunkach eksploatacyjnych przez sześć miesięcy w rejsowym samolocie Airbus A321 na trasie Hamburg - Frankfurt. Paliwem jest mieszanka 50 – 50 biowęglowodorów i paliwa JET. Badania eksploatacyjne pozwolą na określenie wpływu biowęglowodorów na właściwości eksploatacyjne, trwałość i niezawodność silników. Zakłada się, że w trakcie badań eksploatacyjnych Lufthansa ograniczy emisję CO₂ o 1 500 t.

6. Perspektywy wprowadzenia wyższych alkoholi jako biokomponentów paliw do turbinowych silników lotniczych

Butanol jest alkoholem o wzorze chemicznym C₄H₁₀O, znany również jako alkohol butylowy, a w zależności od budowy cząsteczki jego izomery noszą nazwy: n-butanol, tert-butanol, izobutanol. Poszczególne izomery butanolu ze względu na różną budowę, wykazują różne właściwości. Wszystkie dają się mieszać z wodą w stopniu umiarkowanym. Butanol otrzymywany może być z paliw stałych ale również przez fermentację biomasy – wtedy jest to biobutanol.

Kaloryczność butanolu wynosi 29,2 MJ/l (dla porównania **benzyna** ma ok. 32 MJ/l) czyli ok. 36 MJ/kg⁽¹⁾. Butanol wykazuje stosunkowo niskie ciepło parowania, w porównaniu do metanolu (3x niższe) czy etanolu (2x niższe). Z tego względu łatwiejsze jest uruchamianie silnika na butanolu w niskich temperaturach, ale wciąż nieco trudniejsze niż w przypadku benzyny.

Lepkość butanolu jest kilka razy wyższa niż benzyny (przy 20°C 3,64 mm²/s w porównaniu do 0,4-0,8mm²/s), co może powodować kłopoty z układem paliwowym (np. z dobrym rozpyleniem paliwa przez wtryskiwacze).

Istnieje ryzyko, że butanol nie będzie odpowiedni dla niektórych elementów układu paliwowego (np. uszczelek) i może powodować ich rozmiękanie bądź rozpuszczanie.

Liczba oktanowa butanolu jest różna w zależności od izomeru, np. n-butanol ma LO 96 a tert-butanol LO 105. Z tego względu tert-butanol używany jest jako

dodatek podnoszący odporność benzyny na spalanie detonacyjne, ale nie można go używać jako samodzielnego paliwa, gdyż jego temperatura topnienia wynosi 25,5°C (poniżej tej temperatury zamienia się w galaretę).

Jako że wszystkie alkohole zawierają w cząsteczce atomy tlenu, mieszanka paliwowo-powietrzna musi być bogatsza w paliwo niż w przypadku benzyny czy innych paliw węglowodorowych. To z kolei ogranicza zastosowanie paliwa alkoholowego do nowoczesnych silników benzynowych z wtryskiem, które automatycznie (przez komputer sterujący silnikiem) regulują skład mieszanki i ilość wtryskiwanego paliwa. Ponieważ każdy silnik ma ograniczony zakres regulacji składu mieszanki paliwowo-powietrznej, nie można mieszać benzyny z alkoholem w dowolnych proporcjach. Ponieważ butanol w porównaniu do etanolu zawiera mniej tlenu w przeliczeniu na jednostkę masy, można go dodawać do benzyny więcej. I tak jak typowe mieszanki etanolu z benzyną mają 5-20% tego alkoholu, tak mieszanki z butanolem mogą mieć go 8-32%. W obecności wody biobutanol wykazuje mniejsze tendencje do oddzielania się od węglowodorów niż **etanol**.

Podstawową metodą produkcji biobutanolu jest fermentacja, z wykorzystaniem bakterii *Clostridium Acetobutylicum*. Co ciekawe, bakteria ta jest w stanie przerobić wiele różnych surowców, nie tylko trzcinę cukrową, kukurydzę, pszenicę, ale również słomę i inne materiały zawierające celulozę (a więc również odpady drzewne). Jest to istotna zaleta w porównaniu do produkcji etanolu.

Produkcja butanolu w drodze fermentacji jest bardzo podobna do produkcji etanolu, zatem według niektórych źródeł możliwe jest łatwe dostosowanie instalacji produkujących aktualnie etanol do produkcji butanolu, bo potrzebne są jedynie niewielkie zmiany na etapie fermentacji i destylacji.

Produkcja butanolu w drodze fermentacji jest bardzo podobna do produkcji etanolu, zatem według niektórych źródeł (np. [2]) możliwe jest łatwe dostosowanie instalacji produkujących aktualnie etanol do produkcji butanolu, bo potrzebne są jedynie niewielkie zmiany na etapie fermentacji i destylacji. Problemem jest natomiast wydajność procesu, która na obecnym etapie jest niezadowalająca.

Z doświadczeń współpracującego z ITWL słowackiego ośrodka VURUP wynika, że butanol, w tym biobutanol jest interesującym składnikiem paliw do lotniczych silników turbinowych. ITWL rozpoczął wstępne badania w tym zakresie i przygotowuje ich kontynuację we współpracy z VURUP.

7. Podsumowanie

W podsumowaniu można stwierdzić, że wobec światowej, w tym europejskiej polityki ekologicznej rozwój biopaliw dla lotnictwa jest nieunikniony. Trwające intensywne prace w tym zakresie pozostają na różnym stopniu zaawansowania. Takie firmy jak Solana w zakresie produkcji, i Lufthansa w zakresie badań eksploatacyjnych są już mocno zaawansowane.

Dotychczasowe doświadczenia, w tym ITWL wskazują na ograniczone możliwości stosowania tzw. biopaliw I generacji – FAME jako składników paliw do turbinowych silników lotniczych. Perspektywy zastosowania biokomponentów będących mieszaniną biowęglowodorów otrzymywanych przy zastosowaniu różnych technologii są znacznie większe. Również pojawiają się perspektywy zastosowania wyższych alkoholi np. biobutanolu jako składnika paliw typu JET.

8. Literatura

- [1] J. Tys, W.Piekarski, I. Jackowska, A.Kaczor, G.Zajac, P.Starobrat – Technologiczne i ekonomiczne uwarunkowania produkcji biopaliwa, PAN Lublin 2003.
- [2] Hannu Aatola, Martti Larmi, Teemu Sarjovaara, Seppo Mikkonen - Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel:Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine”, SAE Technical Paper, 2008-01-2500, Published 06 Oktober 2008.
- [3] Thomas G. Kreutz, Eric D. Larson, Guangjian Liu, Robert H. Williams: Fischer-Tropsch Fuels from Coal and Biomass; 25th Annual International Pittsburgh Coal Conference Pittsburgh, Pennsylvania, USA 7 October 2008
- [4] K. Shaine Tyson, “Biodiesel Handling and Use Guidelines” A National Laboratory of the U.S. Department of Energy, The National Renewable Energy Laboratory, Published September 2001.
- [5] Dina Bacovsky, „Overview on biofuels”, Austrian Bioenergy Centre Wieselburg, Austria, <http://www.sems-project.eu/pdf>
- [6] Gerhard Knothe, “Biodiesel and renewable diesel: A comparison”, Progress in Energy and Combustion Science 36 (2010) 364–373, Published online 24 December 2009.
- [7] Bjørn Donniss , Rasmus Gottschalck Egeberg , Peder Blom , Kim Grøn Knudsen, “Hydroprocessing of Bio-Oils and Oxygenates to Hydrocarbons. Understanding the Reaction Routes”, Springer Science + Business Media, LLC 2009, Top Catal (2009) 52:229–240, Published online: 21 January 2009.
- [8] Wojciech Dzięgielewski - The limitation of use of biocomponents in the form of Fatty Acid Methyl Esters based on analysis selected turbine fuel properties, Journal of Polish CIMAC, Diagnosis, Reliability and Safety, Vol. 4, No. 2, Gdańsk 2009, s. 41 – 47



Dr inż. Wojciech Dzięgielewski, absolwent Wojskowej Akademii Technicznej, w latach 1989-2000 pracownik badawczo – techniczny WOBR Śl. MPS. Od 2000 do 2005 zastępca dyrektora WOBR Śl. MPS. Aktualnie pracownik badawczo – techniczny ITWL. Doktor nauk technicznych. Przewodniczący KT 176 ds. Techniki Wojskowej i Zaopatrzenia. Specjalista w zakresie paliw i płynów eksploatacyjnych, szczególnie paliw lotniczych i biopaliw.



Dr hab. Andrzej Kulczycki prof. ITWL, absolwent Uniwersytetu Warszawskiego, w latach 1975-1982 pracownik badawczo – techniczny WAT. Od 1982 do 1992 pracownik Instytutu Technologii Nafty, od 1992 do 2009 pracownik Centralnego Laboratorium Naftowego, następnie Instytutu Paliw i Energii Odnawialnej. W latach 1992 – 2008 dyrektor Instytutu. Doktor habilitowany nauk technicznych. Specjalista w zakresie paliw i płynów eksploatacyjnych, szczególnie paliw lotniczych i biopaliw.