

## BADANIA OSIĄGÓW I EMISJI SPALIN SILNIKA LOTNICZEGO FRANKLIN-4A ZASILANEGO PALIWEM AVGAS I E85

PAWEŁ BOGUSZEWICZ

*Instytut Lotnictwa*

### Streszczenie

*W niniejszej pracy zostały przedstawione wyniki prób naziemnych czterocylindrowego silnika lotniczego Franklin 4A obciążonego hamulcem wiropładowym. Praca miała na celu porównanie osiągnięć i emisji spalin badanego silnika zasilanego „klasyczną” benzyną lotniczą Avgas 100LL i biopaliwem E-85 (mieszanka benzyny i etanolu) za pośrednictwem gaźnika, a następnie niskociśnieniowego układu wtryskowego. Opisano zakres zmian układu zasilania wykonanych w celu przystosowania silnika i stoiska do zasilania paliwem E-85. Wyniki prób potwierdzają możliwość zastąpienia stosowanych w lotnictwie benzyn zawierających tetraetylołów biopaliwem E-85.*

### WSTĘP

W dzisiejszym, szybko zmieniającym się świecie wiele organizacji intensywnie rozwija odnawialne technologie pozyskiwania energii. Jest to spowodowane niestabilnością gospodarki, która jest mocno uzależniona od kończących się zapasów ropy naftowej oraz węgla. Kolejnym powodem jest zwrócenie w ostatnich latach uwagi na czynniki ekologiczne. Wspomniane paliwa kopalne są potężnymi wytwórcami gazu „cieplarnianego”, tj. dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>. Przewodzone obecnie badania w zakresie biopaliw mają na celu zastąpienie paliw ropopochodnych, dostarczających 95% energii w transporcie, źródłami energii odnawialnej. W przeszłości nasze społeczeństwo korzystało prawie całkowicie z odnawialnych źródeł energii. Dzisiaj podejmowane są próby powrotu do takiego stanu na technologicznie zaawansowanym poziomie, zapewniającym wysokie standardy życia ciągle rosnącej liczbie ludzi na naszej planecie [1].

Najbardziej rozpowszechnionymi biopaliwami dzisiaj są etanol i biodiesel. Wzrost ich zastosowania jest spowodowany możliwością tworzenia mieszanek etanolu z benzyną i estrów olei roślinnych z olejem napędowym, które z kolei mogą być użyte do napędu istniejących silników.

Lotnictwo jest jedną z najbardziej wymagających gałęzi transportu w stosunku do własności paliw. Obecnie spora ilość tłokowych silników lotniczych wymaga wykorzystywania wysoko-kooktanowego paliwa, co jest główną trudnością w zastosowaniu bezołowiowej benzyny lotniczej. Zastąpienie paliw ropopochodnych biopaliwami w lotnictwie umożliwi zmniejszenie emisji zanieczyszczeń oraz niemal całkowite wyeliminowanie pewnych szkodliwych substancji wchodzących w skład spalin, takich jak siarka, czy dodatki antydetonacyjne (np. czteroetyłek ołowiu).

Biopaliwa, zwane także odtwarzalnymi, mają tę przewagę nad paliwami kopalnymi, że ich spaliny ( $\text{CO}_2$ ) zostaną biologicznie rozłożone i węgiel stanie się budulcem roślin, a tlen wzbogaci atmosferę Ziemi. Te przeobrażenia odbywają się „od zawsze” bez udziału człowieka – tylko dzięki tzw. fotosyntezie, tzn. dzięki słońcu. Natomiast kopalne paliwa, wydobyte ze skorupy ziemskiej do niej nie wrócą w czasie dla nas obecnie przewidywanym.

## 1. OBECNA PRODUKCJA BIOPALIW

Stany Zjednoczone, Brazylia i Państwa Unii Europejskiej są światowymi liderami w produkcji biopaliw. Obecnie produkcja biopaliw jest wspierana przez rządy wielu państw. Zwiększenie zainteresowania biopaliwami spowodowały ostatnie postępy w technologii ich wytwarzania i wykorzystania. Technologia wytwarzania etanolu z biomasy zawierającej celulozę jest obecnie rozwijana w kierunku zastąpienia benzyn. Prowadzone są również prace nad zastosowaniem bioetanolu w silnikach o zapłonie samoczynnym.

Przemysł lotniczy jest zainteresowany rozwojem proekologicznych technologii. Uniezależnienie się od zagranicznych dostawców, zmniejszenie kosztów oraz obniżenie emisji szkodliwych substancji są głównymi zaletami odnawialnych źródeł energii. Biopaliwa są doskonałą alternatywą dla „starych” paliw lotniczych i mogą być konkurencyjne cenowo.

## 2. SPECYFIKA ZASTOSOWANIA BIOPALIW DO NAPĘDU SILNIKÓW LOTNICZYCH

W lotnictwie obserwuje się coraz większe zainteresowanie biopaliwami. Planowane są kolejne loty demonstracyjne przy zasilaniu silników różnymi biopaliwami. W tabeli 1 przedstawiono parametry paliw biologicznych oraz dla porównania konwencjonalnych. We wszystkich przypadkach spalanie 1kg paliwa pochodzenia biologicznego produkuje mniej  $\text{CO}_2$  niż paliwa ropopochodne. Pod względem energetycznym biopaliwa przewyższają ilość energii przypadającej na jednostkę masy powstałego  $\text{CO}_2$ . Paliwa pochodzenia biologicznego zawierają więcej wodoru w stosunku do zawartości węgla, niż to ma miejsce w paliwach ropopochodnych. [2]

Tabela 1 Parametry i wskaźniki paliw pochodzenia biologicznego oraz benzyn i nafty lotniczej

Paliwo	Wartość opałowa [MJ/dm <sup>3</sup> ]	Wartość opałowa [MJ/kg]	Gęstość [kg/dm <sup>3</sup> ]	Liczba oktanowa MON	kg $\text{CO}_2$ /kg paliwa	MJ/kg $\text{CO}_2$
AvGas	32,0	44,0	0,69-0,79	100	3,30	13,4
Butanol	29,2	33,0	0,810	78	2,37	13,8
Etanol	19,6	27,0	0,789	112	1,91	14,2
Metanol	16,0	20,0	0,791	104	1,37	14,2
Jet A-1	33,6	42,0	0,800	8	3,40	12,3
Ester	34,8	39,6	0,880	25	2,90	13,8

### 3. STOISKO DO BADAŃ TŁOKOWEGO SILNIKA LOTNICZEGO FRANKLIN-4A

Badania tłokowego silnika lotniczego przedstawione w niniejszej pracy zostały przeprowadzone w hamowni Zakładu Napędów Instytutu Lotnictwa w Warszawie. Obiektem badań był silnik Franklin-4A zasilany gaźnikiem oraz wielopunktowym układem wtryskowym. Łącznie wykonano 5 charakterystyk śmigłowych w celu porównania osiągnięć i składu spalin silnika zasilanego „klasyczną” benzyną lotniczą Avgas i paliwem E-85.

#### 3.1. Specyfikacja badanych paliw

Badania były przeprowadzone na dwóch paliwach:

- Avgas 100LL – lotnicza benzyna ołowiowa
- E85 – mieszanina benzyny i etanolu

Przed przeprowadzeniem badań została wykonana analiza własności fizykochemicznych i składu chemicznego próbek badanych paliw przez Zespół Badań Chemicznych Polskich Linii Lotniczych LOT S. A. Porównanie paliw Avgas i E85 na podstawie wykonanej analizy są przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2 Porównanie własności fizykochemicznych i składu chemicznego paliw Avgas 100LL i E85

Lp.	Parametr	AVGAS 100LL	E85
1	Wartość opałowa, [MJ/kg]	43,58	30,6
2	Wartość opałowa, [MJ/dm <sup>3</sup> ]	31,55	23,7
3	Gęstość w 20°C, [kg/m <sup>3</sup> ]	0,71893	0,77339
4	Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza, [kg/kg]	14,7	10,2
5	Wygląd zewnętrzny	bez zanieczyszczeń mechanicznych, klarowny	bez zanieczyszczeń mechanicznych, klarowny
6	Kolor	Niebieski	Żółty
7	Przewodność elektryczna	208 [pS/m (20°C)]	19 [uS/m]
8	pH	---	6,22/6,58
9	Chlorki, [mg/l]	---	1,5
10	Sucha pozostałość po odparowaniu, [mg/l]	---	13,2
11	Benzen, [%v/v]	0,02	0,17
12	Zawartość węglowodorów, [%v/v]	---	ok. 20%
13	Cu, [mg/l]	<0,1 (nie wykryto)	0,004
14	Fe, [mg/l]	<0,2 (nie wykryto)	0,013
15	Mn, [mg/l]	<0,1 (nie wykryto)	<0,001

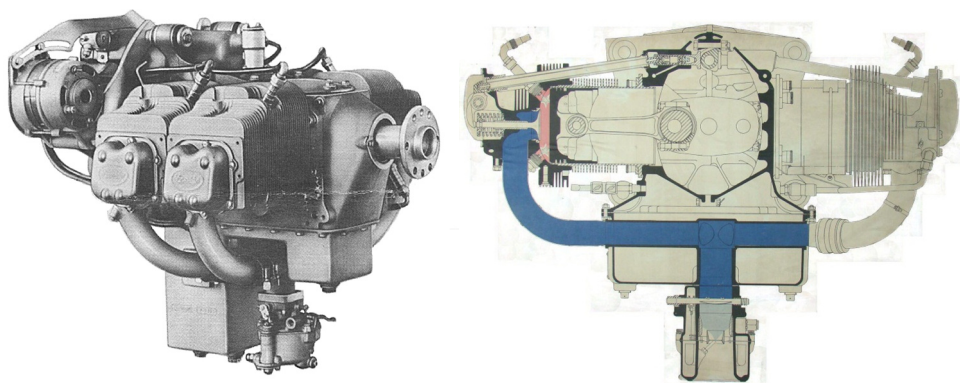
16	Na, [mg/l]	1,0	0,08
17	Pb, [mg/l]	488	0,008
18	P, [mg/l]	---	0,004
19	S, [mg/l]	0,1	3,85
20	Woda [%m/m]	67ppm	0,10%
21	Żywnice nieprzemylane, [mg/100ml]	0,4	6,4
22	Żywnice przemylane rozpuszczalnikiem, [mg/100ml]	0,4	0,2
23	Temp. końca destylacji, [°C]	124,1	164,8
24	Pozostałości po destylacji, [%v/v]	1,2	1,6
25	Prężność par, [kPa]	54,6	46,1
26	Smarność, korygowana średnica śladu zużycia w temp. 60°C, [µm]	851	701
27	Zawartość kwasów w przeliczeniu na kwas octowy, [mg/l]	---	9

### 3.2. Opis badanego obiektu

Badania przeprowadzono na silniku Franklin-4A-235-B4 (Rys. 1) zamontowanym na hamowni stacjonarnej. Jest to czterocylindrowy, 4-suwowy, chłodzony powietrzem silnik tłokowy o przeciwsobnym układzie cylindrów, stosowany jako napęd lekkich samolotów. Dane techniczne badanego silnika w kompletacji fabrycznej są przedstawione poniżej (Tabela 3).

Tabela 3 Dane techniczne silnika Franklin-4A-235-B4

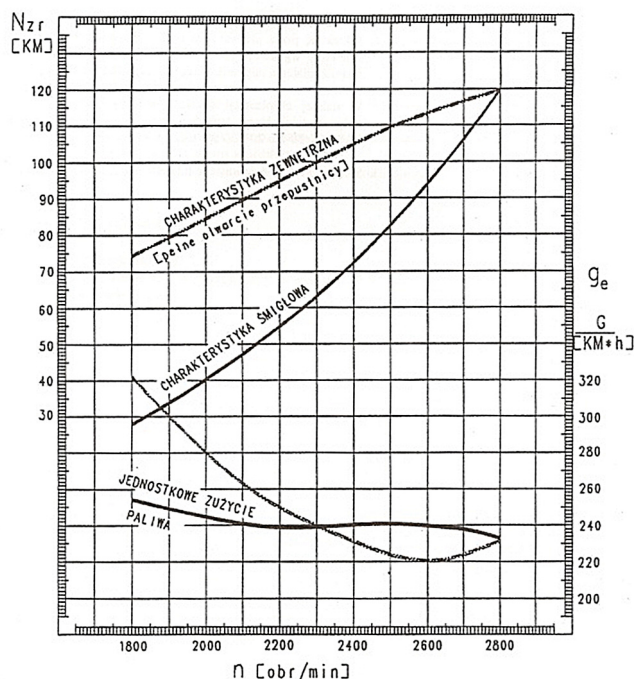
Moc startowa	91,9 ±4 kW (125 ±4 KM) przy 2800 obr/min
Prędkość obrotowa maksymalna	2800 obr/min
Prędkość obrotowa biegu jałowego	750 – 950 obr/min
Liczba cylindrów	4
Stopień sprężania	8,5 : 1
Pojemność skokowa silnika	3851 cm <sup>3</sup>
Średnica cylindra	117,5 mm
Skok	88,9 mm
Paliwo	Benzyna lotnicza 100/130
Maksymalna temperatura głowicy	200°C
Maksymalna temperatura oleju	120 °C
Masa	101 kg
Kąt wyprzedzenia zapłonu	32° przed GMP
Kolejność zapłonu	1, 4, 2, 3



Rys. 1. Widok i przekrój poprzeczny silnika Franklin-4A-235-B4

### 3.3. Zasilanie gaźnikowe

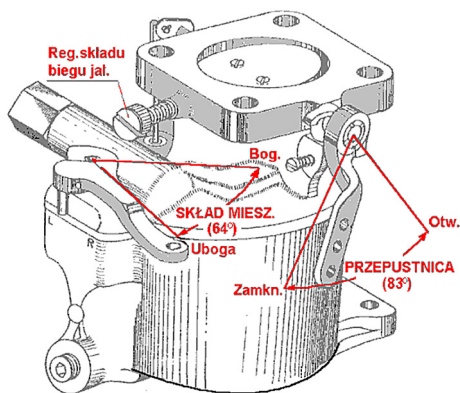
Silnik Franklin-4A w wersji fabrycznej jest zasilany gaźnikiem pływakowym Marvel-Schebler MA-3SPA, który jest przystosowany do pracy na benzynie lotniczej Avgas 100LL. Podawane przez producenta charakterystyki silnika, wygląd zewnętrzny oraz elementy sterowania są przedstawione poniżej (Rys. 2 i Rys. 3).



Rys. 2. Charakterystyki silnika Franklin 4A-235-B31

Elementy przepływowe fabrycznego gaźnika są tak dobrane, aby dostarczał on mieszankę maksymalnie zbliżoną do stechiometrycznej. W celu przystosowania badanego silnika do pracy na paliwie etanolowym wykonano pewne modyfikacje elementów przepływowych gaźnika,

aby zrekompensować zmniejszenie wartości opałowej paliwa E85 w stosunku do benzyny. Pierwotnie przy przepływie przez gardziel 14,7 kg powietrza z komory pływakowej zasysany był 1 kg benzyny. Należało tak zmodyfikować elementy przepływowe gaźnika aby 1 kg paliwa E85 była zasysany przy przepływie 10,2 kg powietrza.



Rys. 3. Wygląd zewnętrzny gaźnika Marvel-Schebler

Modyfikacje gaźnika obejmowały:

- Powiększenie szczeliny sterującej w parze suwakowej układu regulacji składu mieszanki,
- Powiększenie średnicy głównej dyszy paliwa z ok. 2,5 mm na 3 mm,
- Wypolerowano elementy przepływowe i gardziel gaźnika. [5]

Do istniejącej instalacji paliwowej stoiska badawczego, pracującego na benzynie, dobudowano:

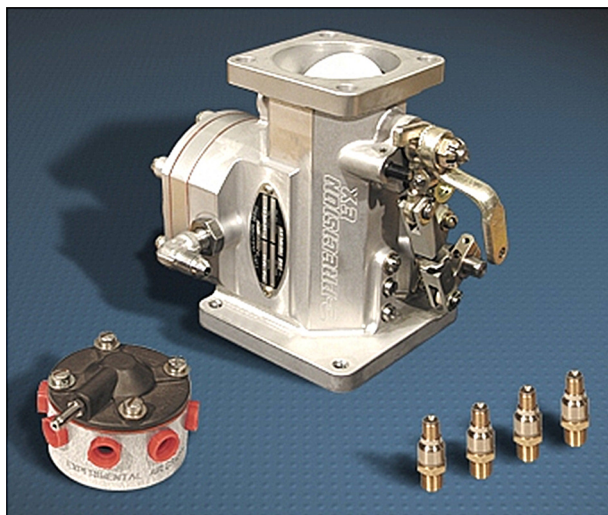
- zbiornik z materiału kwasoodpornego,
- odpowiedni filtr do paliwa E85,
- zawory przełączające przepływ,
- wymieniono wszystkie przewody na nierdzewne.

### 3.4. Zasilanie układem wtryskowym

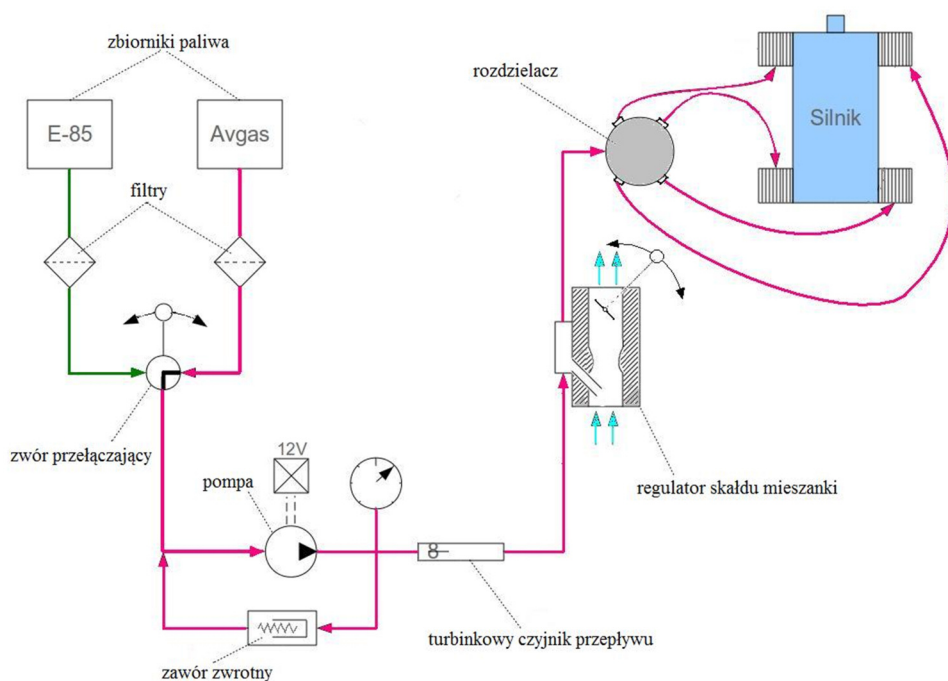
Przeprowadzone były również badania na silniku zasilanym wielopunktowym układem wtryskowym EX-5VA1 Fuel Injection Servo firmy Precision Airmotive (Rys. 4). Jest to niskociśnieniowy układ wtryskowy o ciągłym wtrysku. Układ wtryskowy umożliwia wyeliminowanie dwóch podstawowych wad gaźnika – nierównomiernego składu mieszanki w poszczególnych cylindrach oraz oblodzenia gaźnika. Proces odparowania jest przeniesiony w pobliże zaworów ssących, dzięki czemu unika się spadku temperatury w okolicy przepustnicy i jej oblodzenia.

Niskociśnieniowy układ wtryskowy składa się z następujących podzespołów:

- Pompa rozruchowa,
- Regulator składu mieszanki,
- Rozdzielacz,
- Zawory zwrotne,
- Wtryskiwacze.

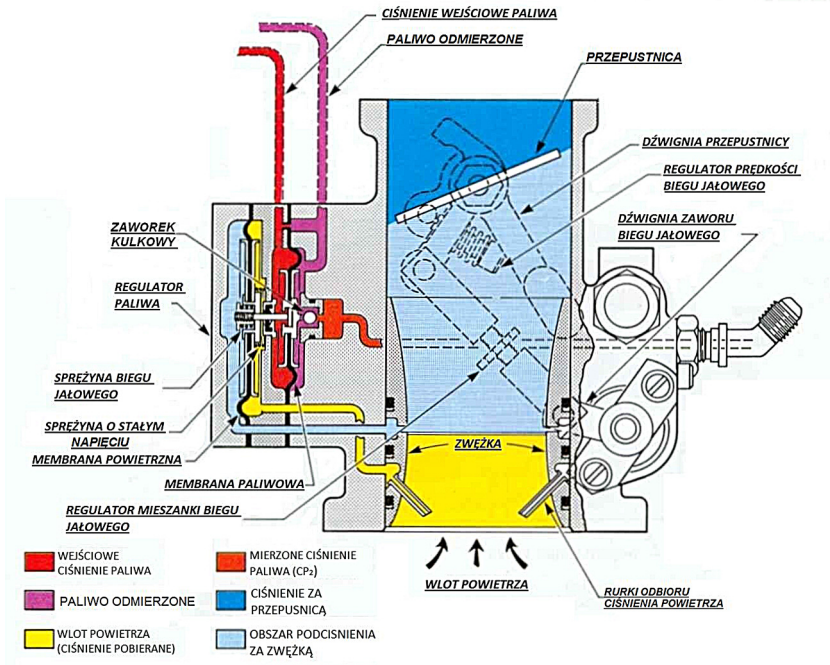


Rys. 4. Wielopunktowy układ wtryskowy EX-5VA1 Fuel Injection Servo [8]



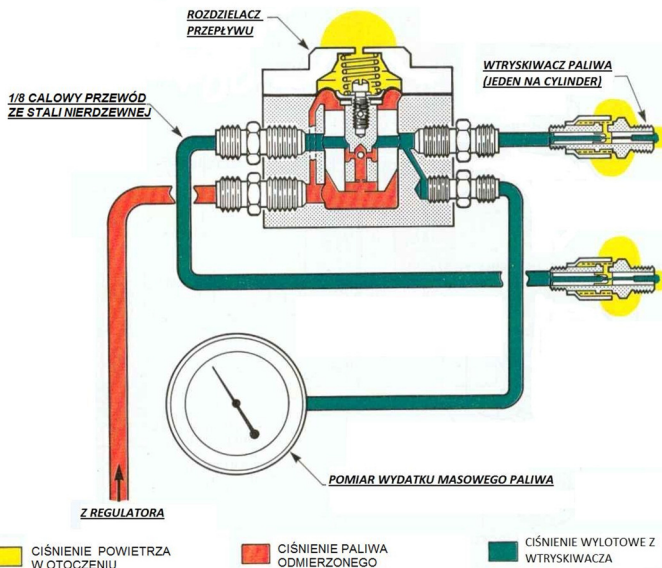
Rys. 5. Schemat instalacji paliwowej zawierającej niskociśnieniowy układu wtryskowy

Pompa elektryczna podaje paliwo poprzez zawór zwrotny do regulatora składu mieszanki (Rys. 6), następnie do rozdzielacza, skąd dociera do wtryskiwaczy. Ilość paliwa podawana do wtryskiwaczy zależy od położenia przepustnicy (ciśnienia panującego w gardzieli regulatora).



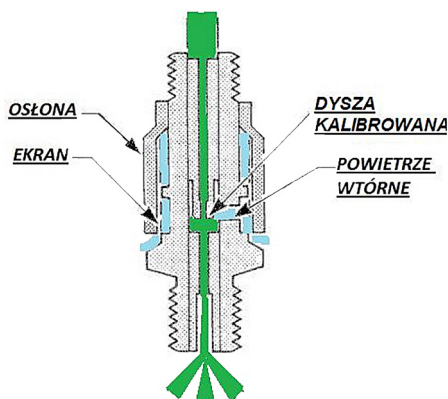
Rys. 6. Regulator składu mieszanki, przekrój i schemat działania

Niezależnie od położenia przepustnicy ilość podawanego paliwa może być regulowana dźwignią składu mieszanki, która również służy do zatrzymywania silnika (w skrajnym położeniu). Strumień paliwa odmierzony przez regulator składu mieszanki dopływa do rozdzielacza (Rys. 7), z którego jest rozprowadzany do wtryskiwaczy (Rys. 8) umieszczonych w kolektorach dolotowych (Rys. 9) poszczególnych cylindrów silnika. [6]

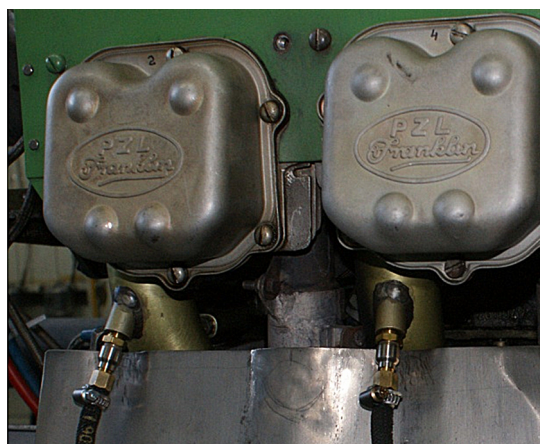


Rys. 7. Schemat rozdzielacza paliwa





Rys. 8. Schemat wtryskiwacza paliwa



Rys. 9. Widok wtryskiwaczy zamontowanych w kolektorach dolotowych

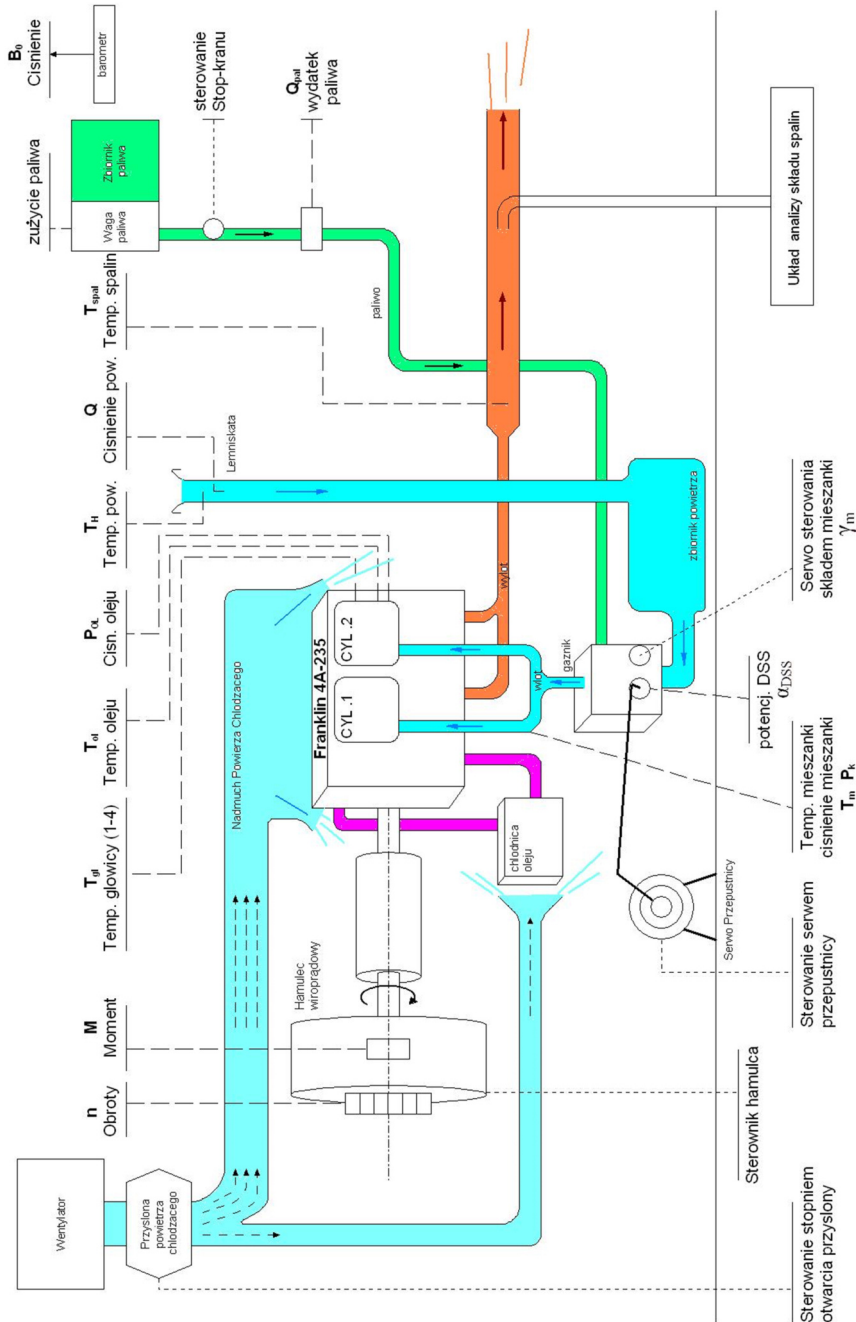
Podczas prób silnika zasilanego układem wtryskowym zastosowano elektryczną pompę paliwa Energy E0409 (od układu wtrysku wielopunktowego silnika Rover K16). Według wymagań technicznych układ Silver Hawk EX-5VA1 ciśnienie paliwa zasilającego regulator składu mieszanki powinno wynosić od 1,5 do 3 barów, dlatego w układzie tłoczenia paliwa zastosowano zawór przelewowy, który nadmiar paliwa kierował na wlot pompy utrzymując po stronie tłocznej zadane ciśnienie.

### 3.5. Opis stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze znajduje się hamowni silników tłokowych (budynek „P”) Instytutu Lotnictwa. Jest ono wyposażone w:

- Hamulec elektrowirowy,
- Układ zasilania paliwem,
- Układ chłodzenia,
- Układy sterowania
- Układy pomiarowe parametrów pracy silnika,
- Układ pomiaru składu spalin.

Ogólny schemat stanowiska jest przedstawiony poniżej (Rys. 10).



Rys. 10. Schemat stanowiska badawczego

Badany silnik został obciążony hamulcem elektrowirowym AMX 200/200, który służy do odbioru i pomiaru mocy. Moc silnika w określonym punkcie pracy jest wyliczana z podstawowych parametrów silnika, które są mierzone na hamulcu:

- moment obrotowy [Nm] (precyzyjny czujnik tensometryczny),
- prędkość obrotową [obr/min] (magnetyczny nadajnik impulsowy) [9].

Sterowanie silnikiem odbywa się poprzez sterownik hamulca AMX211 sterujący prądem hamulca za pomocą sterownika prądu AMX 202 i położeniem przepustnicy przy użyciu sterownika organu wykonawczego AMX 201. Został wykonany oddzielny układ sterowania serwowym składem mieszanki ( $\gamma_m$ ).

Podczas badań sterowanie zespołem silnik – hamulec odbywało się w trybie, w którym zadawane były następujące sygnały:

- Położenie przepustnicy –  $\alpha_{DSS}$
- Położenie dźwigni składu mieszanki –  $\gamma_m$
- Prędkość obrotowa –  $n$

Wartości parametrów pracy silnika były rejestrowane przy użyciu trzech systemów pomiarowych:

- systemu firmy „Automex” wykorzystującego oprogramowanie „PARM”,
- systemu rejestracji ciągłej ATM-QAR z oprogramowaniem FDS,
- systemu firmy Signal do pomiaru składu spalin.

#### 4. WYNIKI PRÓB NAZIEMNYCH SILNIKA FRANKLIN 4A ZASILANEGO PALIWEM „KLASYCZNYM” I PALIWEM ETANOLOWYM

Próby obejmowały wykonanie charakterystyk śmigłowych badanego silnika i porównanie jego osiągnięć przy zasilaniu benzyną lotniczą Avgas 100LL i paliwem etanolowym E85. Badany silnik był zasilany pierwotnie poprzez gaźnik, a następnie poprzez układ wtryskowy. W celu dostosowania gaźnikowego układu zasilania badanego silnika do pracy na paliwie E85 zmodyfikowano jego elementy przepływowe, aby zrekomensować zmniejszenie wartości opałowej paliwa E85.

Ze względu na to, że silnik obciążony był hamulcem, a nie śmigłem, wykonanie charakterystyki śmigłowej silnika było oparte o wcześniej założoną charakterystykę śmigła. Podczas próby ustawiano położenie przepustnicy oraz prędkość obrotową według założonej charakterystyki śmigłowej. Następnie po osiągnięciu stanu ustalonej pracy silnika zapisywano wszystkie parametry przy czterech położeniach dźwigni regulacji składu mieszanki  $\gamma_m$  (zaczynając od pełnego wzbogacenia). Nie we wszystkich punktach udało się uzyskać stan ustalonej pracy silnika. Prezentowane wyniki obejmują jedynie te punkty w których silnik pracował „równo”.

##### 4.1. Silnik zasilany benzyną Avgas 100LL za pomocą gaźnika

Z wyników próby można odczytać, że przebieg charakterystyki dla silnika zasilanego benzyną lotniczą Avgas 100LL zależy od składu mieszanki w przedziale prędkości obrotowych od 1800 do 2400 obr/min. Maksymalna moc uzyskana podczas próby wynosi 80,3 kW, przy prędkości obrotowej 2800 obr/min i składzie mieszanki biskim stechiometrycznemu  $\lambda=0,975$ . Minimalne jednostkowe zużycie paliwa uzyskane podczas tej próby wynosi 284 g/kWh przy  $N=2400$  obr/min i  $\lambda=1,025$ . W przedziale prędkości obrotowych 2400 – 2600 obr/min dla mieszanki zbliżonej do stechiometrycznej ( $\lambda \rightarrow 1$ ) uzyskiwana jest maksymalna temperatura spalin w kolektorze wylotowym ok. 830°C. Jedynie natężenie przepływu powietrza zasysanego przez silnik nie zależy od składu mieszanki i jest funkcją prędkości obrotowej silnika.

Zawartość tlenków azotu zależy od temperatury spalania i podobnie jak temperatura spalin rośnie zawartość NOx wraz z prędkością obrotową silnika. W całym zakresie prędkości obrotowych dla mieszanek najbardziej ubogich uzyskiwano odpowiednio maksymalne temperatury gazów w kolektorze wylotowym, którym odpowiadała maksymalna zawartość NOx w spalinach.

Zawartości węglowodorów zależy od składu mieszanki – im bogatsza mieszanka tym więcej produktów niezupełnego spalania zawierają gazy wylotowe. Zaobserwowano wysoki poziom CH oraz O<sub>2</sub> na początku charakterystyki śmigłowej, czyli dla prędkości obrotowej od 1000 do 1200 obr/min i 7-8 % otwarcia przepustnicy. W tych punktach uzyskano odpowiednio niski poziom CO<sub>2</sub>. Temperatura spalin odpowiadająca tym punktom jest najniższa a jednostkowe zużycie paliwa osiąga maksymalną wartość. Dowodzi to, że w tych warunkach następuje niecałkowite spalanie. Może to być spowodowane ucieczką części świeżego ładunku w czasie współotwarcia zaworów przy małych prędkościach obrotowych.

Jednym z bardziej szkodliwych składników spalin jest tlenek węgla, który powstaje w wyniku niezupełnego spalania przy zbyt małej ilości tlenu (mieszanki bogate,  $\lambda < 1$ ) i przy zbyt krótkim czasie reakcji. Zaobserwowano, że zawartość CO jest funkcją składu mieszanki.

#### **4.2. Silnik zasilany paliwem etanolowym E-85 za pomocą gaźnika**

W trakcie próby wszystkie regulacje gaźnika (średnica dyszy paliwa 2,5 mm) i układu zapłonowego pozostały bez zmian. Zmieniono jedynie paliwo, zamiast benzyną zasilano silnik paliwem E-85.

Porównując osiągi oraz skład spalin podczas prób zasilania silnika paliwem E-85 i Avgas 100LL poprzez gaźnik o regulacjach fabrycznych zaobserwowano:

- zmniejszenie maksymalnej mocy o około 3,8 %,
- zwiększenie minimalnej wartości jednostkowego zużycia paliwa o 32,7%,
- wzrost maksymalnej temperatury spalin od 830 do 994°C,
- możliwość pracy jedynie na mieszankach ubogich,
- zmniejszoną zawartość CH i CO,
- większą zawartość NOx.

#### **4.3. Silnik zasilany paliwem etanolowym E-85 za pomocą gaźnika po modyfikacjach**

Gaźnik został zmodyfikowany tak, aby dostarczał mieszankę maksymalnie zbliżoną do stechiometrycznej. Modyfikacje są opisane w punkcie (3.3).

Porównując osiągi oraz skład spalin podczas próby zasilania silnika paliwem E-85 poprzez zmodyfikowany gaźnik z próbą silnika zasilanego paliwem Avgas 100LL (4.1) zaobserwowano:

- zwiększenie maksymalnej mocy o około 5,8 %,
- zwiększenie minimalnej wartości jednostkowego zużycia paliwa o 28,2%,
- wzrost maksymalnej temperatury spalin od 830 do 882°C (6,3%),
- mniejszą zawartość CO nawet kilkakrotnie,
- zawartość NOx i CH była na podobnym poziomie.

#### **4.4. Silnik zasilany benzyną Avgas 100LL poprzez wielopunktowy układ wtryskowy EX-5VA1 Fuel Injection Servo**

Próba obejmowała wyznaczenie charakterystyki śmigłowej dla silnika zasilanego lotniczą benzyną Avgas 100LL poprzez wtryskowy układ zasilania EX-5VA1 Fuel Injection Servo. Zasilanie układem wtryskowym zostało opisane w punkcie (3.4).

Silnik zasilany układem wtryskowym pracuje znacznie równomierniej, niż zasilany przez gaźnik. Regulacja składu mieszanki umożliwia uzyskanie mieszanek bogatych i ubogich.

Porównując osiągi oraz skład spalin podczas próby zasilania silnika paliwem Avgas 100LL poprzez niskociśnieniowy układ wtryskowy z próbą silnika zasilanego paliwem Avgas 100LL poprzez gaźnik (4.1) zaobserwowano:

- zwiększenie maksymalnej mocy o 4,4 %,
- zmniejszenie minimalnej wartości jednostkowego zużycia paliwa o 19,7%,
- wzrost maksymalnej temperatury spalin od 830 do 923°C (11,2%),
- znaczne zwiększenie zawartości CO i CH w spalinach,
- zawartość NO<sub>x</sub> była większa o 5-10%.

#### **4.5. Silnik zasilany paliwem E-85 poprzez wielopunktowy układ wtryskowy EX-5VA1 Fuel Injection Servo**

Próba obejmowała wyznaczenie charakterystyki śmigłowej dla silnika zasilanego paliwem etanolowym E-85 poprzez wtryskowy układ zasilania EX-5VA1 Fuel Injection Servo.

Porównując osiągi oraz skład spalin podczas próby zasilania silnika paliwem E-85 poprzez niskociśnieniowy układ wtryskowy z próbą silnika zasilanego paliwem Avgas 100LL poprzez ten sam układ zasilania (4.4) zaobserwowano:

- zmniejszenie maksymalnej mocy o 2,1%,
- zwiększenie minimalnej wartości jednostkowego zużycia paliwa o 50,9%,
- temperatura spalin nieznacznie wzrosła od 923 do 928°C (0,5%),
- znaczne zwiększenie zawartości CO i CH w spalinach,
- zwiększenie zawartości NO<sub>x</sub>,
- znaczące zmniejszenie zawartości CH i CO, nawet kilkukrotne.

#### **PODSUMOWANIE**

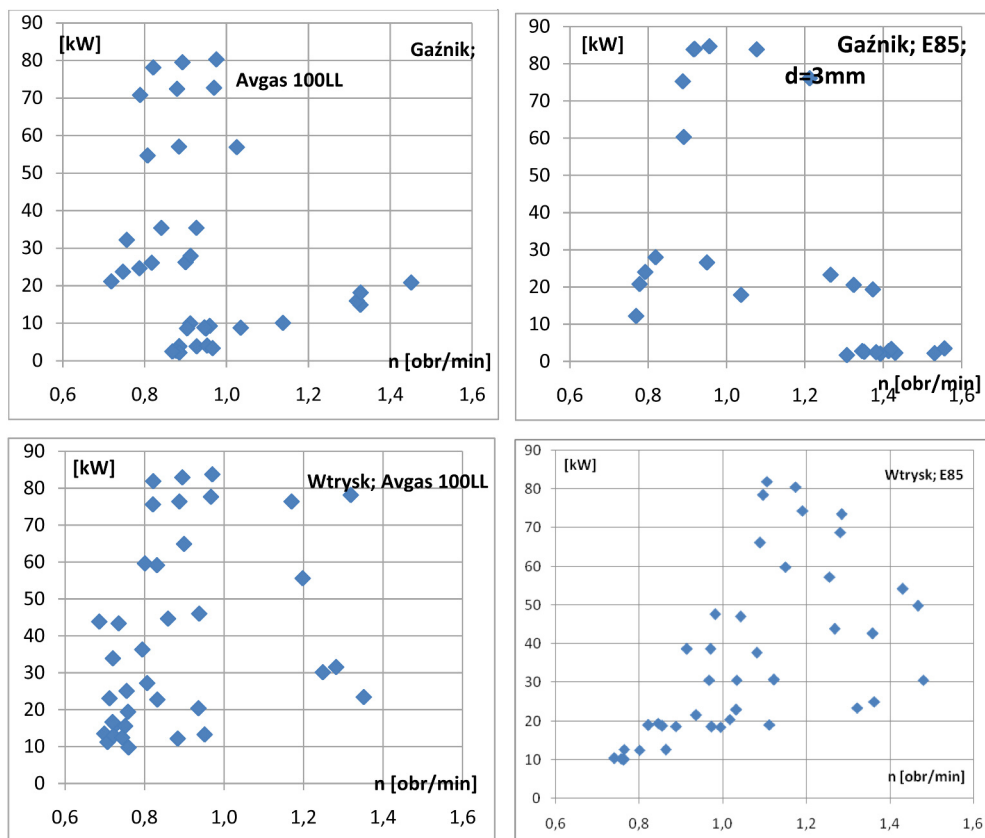
Zastosowanie biopaliw do napędu silników spalinowych jest znane od ponad 100 lat. W ostatnich latach nastąpił ogromny rozwój metod zasilania paliwami alternatywnymi. Wyniki badań paliw zawierających bioetanol wskazują, że istnieje możliwość zmniejszenia emisji substancji szkodliwych dla zdrowia ludzi, a także prekursorów ozonu troposferycznego odpowiedzialnego za zjawisko smogu fotochemicznego.

Istnieje kilka głównych źródeł energii odnawialnej, których potencjał jest wykorzystywany do zastąpienia paliw kopalnych. Są to: wiatr, źródła geotermalne, energia słoneczna oraz biopaliwa pozyskiwane z biomasy. Wszystkie te źródła są intensywnie rozwijane i wprowadzane do użytku powszechnego w odpowiednich gałęziach gospodarki. Odnawialne źródła energii są w pewnym sensie niewyczerpalne, gdy używa się ich w sposób zrównoważony. Wykorzystanie tych źródeł powoduje uniezależnienie energetyki od ciągle rosnących cen importowanych paliw kopalnych. Rozwijanie technologii paliw odnawialnych pozytywnie wpływa na rozwój gospodarek lokalnych i wiejskich. Perspektywa zastąpienia paliw ołowionych biopaliwami jest bardzo korzystna ze względów ekologicznych i ekonomicznych. W przyszłości zastosowanie etanolu i ETBE w lotnictwie spowoduje zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych.

Analizując przykłady zastosowań biopaliw w silnikach lotniczych można stwierdzić, że na świecie podejmowane są wysiłki mające na celu opracowanie paliw alternatywnych przyjaznych dla środowiska naturalnego oraz o własnościach nie gorszych od obecnych powszechnych paliw ropopochodnych. Loty demonstracyjne jak i wzrastająca liczba eksploatowanych samolotów, potwierdzają sensowność rozwijania technologii biopaliw w lotnictwie. W większości przypadków zaobserwowano poprawę własności eksploatacyjnych, wyrażających się w wydłużeniu czasu eksploatacji silników i aparatury paliwowej, obniżeniu emisji zanieczyszczeń,

wzrostu mocy silników, przy niewielkiej ilości zmian. Obecnie istnieje wiele problemów natury technologicznej w zastosowaniach biopaliw, jednak głównym problemem są koszty produkcji.

Z przeprowadzonych prób silnika można wywnioskować, że rodzaj paliwa oraz współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$  mają dominujący wpływ na uzyskiwane parametry pracy silnika i skład spalin. Maksymalna moc przy zasilaniu silnika benzyną lotniczą Avgas 100LL była uzyskiwana dla mieszanek bogatych i bliskich stechiometrycznym ( $\lambda \in [0,8 : 1,0]$ ) dla obydwu układów zasilania. Silnik zasilany paliwem etanolowym E-85 uzyskiwał maksymalną moc dla mieszanek bliskich stechiometrycznym ( $\lambda \in [0,9 : 1,1]$ ) przy zasilaniu poprzez gaźnik oraz dla mieszanek ubogich ( $\lambda \in [1,1 : 1,3]$ ) przy zasilaniu poprzez układ wtryskowy (Rys. 11).



Rys. 11. Moc obliczeniowa w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  dla poszczególnych prób silnika

Zmiana paliwa z benzyny lotniczej Avgas 100LL na paliwo etanolowe E-85, bez wprowadzania modyfikacji, spowodowała spadek maksymalnej mocy o około 3,5% oraz wzrost jednostkowego zużycia paliwa o 28%. Gaźnik fabrycznie przystosowany do benzyny lotniczej umożliwił pracę silnika zasilanego paliwem E-85 jedynie na mieszanek ubogich. Po zmodyfikowaniu gaźnika moc silnika wzrosła o około 5,5% i zużycie paliwa wzrosło o 39,5% w stosunku do próby przeprowadzonej na benzynie lotniczej.

Zasilanie silnika poprzez niskociśnieniowy układ wtryskowy benzyną Avgas 100LL zwiększyło maksymalnie osiąganą moc o około 4% (83,8 kW) oraz zmniejszyło jednostkowe zużycie

cie paliwa o 2,7 %. Zmiana paliwa na E-85 spowodowała zmniejszenie mocy maksymalnej o 2% (82 kW) i zwiększenie jednostkowego zużycia paliwa o 25,7% w stosunku do próby zasilania silnika paliwem Avgas 100LL poprzez układ wtryskowy.

Mimo braku efektywnych korzystnych zmian osiągnięć silnika pracującego na biopaliwie wyniki należy uznać za zachęcające do prowadzenia dalszych modyfikacji w układzie zasilania, jak i ustalenia wpływu kątów wyprzedzenia zapłonu, faz rozrządu silnika czy stanu cieplnego silnika.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Balicki W.: Przystosowanie gaźnikowego układu zasilania silnika Franklin 4A do paliwa etanolowego. Instytut Lotnictwa, Warszawa 2007
- [2] Boguszewicz P., Teodorczyk A. (promotor) Praca dyplomowa magisterska; Badania osiągnięć i emisji spalin silnika lotniczego Franklin-4A zasilanego paliwem Avgas i E85. Politechnika Warszawska, 2010
- [3] Hendricks R.C., Bushnell D.M.: Synthetic and Biomass Alternate Fueling in Aviation. Mechanical Engineering Magazine – Biomass
- [4] <http://www.precisionairmotive.com/>
- [5] <http://www.automex.pl/prod/ham/amx200.php>
- [6] Opis, instrukcja użytkowania i obsługi silnika Franklin-4A-235-B4. Wytwórnia sprzętu komunikacyjnego „PZL – Rzeszów” S.A.
- [7] Pągowski Z.: Lotnicze silniki turbinowe. Paliwa i oleje. Instytut lotnictwa
- [8] Szczepański J., Kurek M.: Opracowanie dokumentacji technicznej, wykonanie i przebadanie niskociśnieniowego układu wtryskowego do silnika PZL-F4A-235. Instytut Lotnictwa, Warszawa 1988.
- [9] Vandamme Erick J., Wim Soetaert: Biofuels. Wiley Series in Renewable Resources;