

Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

Rozprawa doktorska

mgr inż. Paula Kurzawska-Pietrowicz

**Analiza zrównoważonych paliw lotniczych w kontekście
modelowania emisji cząstek stałych**

Promotor: dr hab. inż. Remigiusz Jasiński
Promotor pomocniczy: dr inż. Marta Maciejewska

Poznań 2026

Spis treści

Streszczenie	3
Abstract	4
Spis skrótów i oznaczeń	5
1. WPROWADZENIE	8
1.1 Motywacja podjęcia tematu.....	8
1.2 Problem badawczy i cel pracy	9
1.3 Forma rozprawy.....	9
1.4 Plan rozprawy	10
2. ZRÓWNOWAŻONE PALIWA LOTNICZE	12
2.1. Definicja i wymagania – publikacje A.1 i A.2	12
2.2. Proces certyfikacji SAF – publikacja A.1	12
2.3. Procesy produkcji SAF – publikacje A.1 i A.2	14
2.4. Ocena cyklu życia – publikacja A.1	14
2.5. Emisja cząstek stałych – publikacje A.1, A.3 i A.4.....	16
3. EMISJA CZĄSTEK STAŁYCH I PARAMETRY PRACY SILNIKA ZASILANEGO ZRÓWNOWAŻONYMI PALIWAMI LOTNICZYMI	18
3.1. Emisja cząstek stałych – publikacje A.2, A.3 i A.4	18
3.2. Parametry silnikowe – publikacja A.5	27
4. MODELOWANIE PARAMETRÓW EMISJI CZĄSTEK STAŁYCH – publikacja A.6.....	29
4.1. Metodyka opracowania modeli emisji cząstek stałych.....	29
4.2. Wyniki modelowania	31
4.2.1. Modele wskaźników emisji cząstek stałych.....	31
4.2.2. Modele parametrów rozkładu wymiarowego cząstek stałych.....	33
4.3. Walidacja opracowanych modeli emisji cząstek stałych.....	35
5. WNIOSKI I KIERUNKI DALSZYCH PRAC	38
5.1. Podsumowanie	38
5.2. Wnioski końcowe.....	39
5.3. Kierunki dalszych prac.....	41
ZAŁĄCZNIKI.....	42
Załącznik A Publikacje	43
Załącznik B Oświadczenia współautorów	49

Analiza zrównoważonych paliw lotniczych w kontekście modelowania emisji cząstek stałych

Streszczenie

Zrównoważone paliwa lotnicze są obecnie uznawane za najskuteczniejszy środek ograniczania emisji związków gazowych i cząstek stałych w sektorze lotniczym. Ze względu na brak konieczności zmian w infrastrukturze paliwowej i konstrukcji silników mogą być, w odpowiedniej mieszance, stosowane zamiennie z paliwem konwencjonalnym. Niniejsza praca skupia się na analizie emisji cząstek stałych z silników zasilanych zrównoważonymi paliwami lotniczymi i modelowaniu emisji cząstek stałych na podstawie przeprowadzonych pomiarów. Przedstawiono także analizę literaturową dotyczącą zrównoważonych paliw lotniczych oraz wyniki badań empirycznych przeprowadzonych na silnikowych stanowiskach pomiarowych.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych na silniku zasilanym mieszanką paliwa Jet A-1 i *HEFA-SPK* dokonano analizy parametrów pracy silnika oraz emisji cząstek stałych w zależności od udziału paliwa *HEFA-SPK* w mieszance paliwowej. Badania te posłużyły do modelowania parametrów emisji cząstek stałych w zależności od właściwości fizykochemicznych paliwa oraz parametrów silnikowych. Zakres analizy emisji cząstek stałych został rozszerzony o parametry rozkładu wymiarowego cząstek stałych, takie jak średnia średnica geometryczna i geometryczne odchylenie standardowe rozkładu cząstek stałych. Wszystkie analizy emisji cząstek stałych przeprowadzono zarówno dla stężenia liczbowego, jak i masowego.

Modele emisji cząstek stałych zostały opracowane metodą regresji liniowej wielorakiej i zweryfikowane statystycznie pod względem istotności współczynników modelu, współliniowości parametrów wejściowych oraz istotności całego modelu. Opracowane modele pozwoliły określić wpływ poszczególnych parametrów wejściowych na wskaźniki emisji cząstek stałych oraz oszacować ich wartości bez konieczności pomiaru stężenia liczbowego cząstek stałych w spalinach.

Kierunki dalszych prac obejmują opracowanie odpowiedniego składu chemicznego oraz właściwości fizykochemicznych zrównoważonych paliw lotniczych w taki sposób, aby przy zachowaniu właściwych parametrów eksploatacyjnych w znacznym stopniu ograniczały emisję cząstek stałych. Realizacja tych działań może być wsparta wykorzystaniem opracowanych w niniejszej rozprawie modeli.

Analysis of sustainable aviation fuels in the context of particulate matter emission modeling

Abstract

Sustainable Aviation Fuels (*SAF*) are currently recognized as the most effective means of reducing gaseous and particulate matter emissions in the aviation sector. Due to the absence of any need to modify existing fuel infrastructure or engine design, *SAF* can be used interchangeably with conventional jet fuel when appropriately blended. This dissertation focuses on the analysis of particulate matter emissions from engines fueled by sustainable aviation fuels and modeling of particulate matter emissions based on the measurements performed. It also presents a literature review on sustainable aviation fuels and the results of empirical studies conducted on engine test benches.

Based on experimental investigations carried out on an engine fueled with a blend of Jet A-1 and *HEFA-SPK*, an analysis was performed of the engine operating parameters and the emission of particulate matter as a function of the *HEFA-SPK* share in the fuel mixture. These studies were used to develop emission models that relate emission parameters to the physicochemical properties of the fuel and the engine operating conditions. The scope of emission analysis was extended to include parameters describing the particle size distribution, such as the geometric mean diameter and the geometric standard deviation. All particulate matter emission analyses were performed for both particle number and mass concentrations.

The emission models were developed using multiple linear regression and statistically verified in terms of the significance of model coefficients, collinearity of input parameters, and overall model significance. The developed models enabled the identification of the influence of specific input parameters on particles emission indices and allowed for the estimation of their values without the need for direct measurement of particles concentration in exhaust gases.

Future research directions include the development of optimized chemical compositions and physicochemical properties of sustainable aviation fuels so as to significantly reduce emissions of particulate matter while maintaining appropriate engine performance parameters. The implementation of these efforts may be supported by the application of the models developed in this dissertation.

Spis skrótów i oznaczeń

<i>AIRt</i>	temperatura otoczenia
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i> , Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów
<i>ATJ-SKA</i>	<i>Alcohol to Jet Synthetic Kerosene with Aromatics</i> , syntetyczna nafta lotnicza z alkoholu, zawierająca składniki aromatyczne
<i>ATJ-SPK</i>	<i>Alcohol to jet Synthetic Paraffinic Kerosene</i> , syntetyczna nafta lotnicza z alkoholu
<i>C</i>	zawartość węgla
<i>CEF</i>	<i>CORSIA Eligible Fuel</i> , paliwo kwalifikujące się w ramach <i>CORSIA</i>
<i>CHJ/CH-SK</i>	<i>Catalytic Hydrothermolysis Synthesized Kerosene</i> , syntetyczna nafta lotnicza wytwarzana metodą katalitycznej hydropirolizy
<i>CO₂</i>	<i>carbon dioxide</i> , dwutlenek węgla
<i>CORSIA</i>	<i>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation</i> , mechanizm kompensacji i redukcji emisji dwutlenku węgla w lotnictwie
<i>C_{PM}</i>	stężenie masowe cząstek stałych
<i>C_{PN}</i>	stężenie liczbowe cząstek stałych
<i>D</i>	średnica cząstki stałej
<i>EEPS</i>	<i>Engine Exhaust Particulate Sizer spectrometer</i> , spektrometr wielkości cząstek
<i>e_{fe_c}</i>	emisje dwutlenku węgla z uprawy surowców
<i>e_{fe_hc}</i>	emisje dwutlenku węgla pochodzące ze zbioru i gromadzenia surowców
<i>e_{fe_p}</i>	emisje dwutlenku węgla z przetwarzania surowców
<i>e_{fe_t}</i>	emisje dwutlenku węgla z transportu surowców
<i>e_{fe_{fu}_p}</i>	emisje dwutlenku węgla z procesu konwersji
<i>e_{fu_c}</i>	emisje dwutlenku węgla ze spalania paliwa
<i>e_{fu_t}</i>	emisje dwutlenku węgla z transportu i dystrybucji paliw
<i>EGT</i>	temperatura spalin na dyszy wylotowej
<i>EI_M</i>	wskaźnik masy cząstek stałych
<i>EI_N</i>	wskaźnik liczby cząstek stałych
<i>EI_V</i>	wskaźnik objętości cząstek stałych
<i>E_{PM}</i>	natężenie emisji cząstek stałych
<i>E_{PN}</i>	natężenie liczby cząstek stałych
<i>ETJ</i>	<i>Alcohol to Jet</i> bazujący na etanolu, syntetyczna nafta lotnicza z etanolu
<i>F</i>	siła ciągu
<i>FAA</i>	<i>Federal Aviation Administration</i> , Federalna Administracja Lotnictwa
<i>FF</i>	przepływ paliwa
<i>FP</i>	<i>Flash point</i> , temperatura zapłonu paliwa
<i>FT-SPK</i>	<i>Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene</i> , syntetyczna parafinowa nafta lotnicza wytwarzana metodą Fischera-Tropscha
<i>FT-SPK/A</i>	<i>Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene with aromatics</i> , syntetyczna parafinowa nafta lotnicza wytwarzana metodą Fischera-Tropscha, zawierająca składniki aromatyczne
<i>GMD</i>	<i>Geometric Mean Diameter</i> , średnia średnica geometryczna
<i>GMD_m</i>	<i>Geometric Mean Diameter</i> , średnia średnica geometryczna dla stężenia masowego cząstek stałych
<i>GMD_n</i>	<i>Geometric Mean Diameter</i> , średnia średnica geometryczna dla stężenia liczbowego cząstek stałych
<i>GSD</i>	<i>Geometric Standard Deviation</i> , geometryczne odchylenie standardowe

<i>GSDm</i>	<i>Geometric Standard Deviation</i> , geometryczne odchylenie standardowe dla stężenia masowego cząstek stałych
<i>GSDn</i>	<i>Geometric Standard Deviation</i> , geometryczne odchylenie standardowe dla stężenia liczbowego cząstek stałych
<i>H</i>	zawartość wodoru
<i>HC-HEFA-SPK</i>	<i>Hydroprocessed Hydrocarbons, Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene</i> , syntetyczna parafinowa nafta lotnicza z uwodornionych węglowodorów, estrów i kwasów tłuszczowych
<i>HEFA-SPK</i>	<i>Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene</i> , syntetyczna parafinowa nafta lotnicza z uwodornionych estrów i kwasów tłuszczowych
<i>HFS-SIP</i>	<i>Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Isoparaffins</i> , uwodornione cukry fermentacyjne przetworzone do syntetycznych izoparafin
<i>HHC-SPK</i>	<i>Hydroprocessed Hydrocarbons, Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene</i> , syntetyczna parafinowa nafta lotnicza z uwodornionych węglowodorów, estrów i kwasów tłuszczowych
<i>ICAO</i>	<i>International Civil Aviation Organization</i> , Organizacja Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego
<i>ILUC</i>	<i>Induced Land Use Change</i> , indukowana zmiana użytkowania gruntów
$k_{PN}/k_{PN\ max}$	względna wartość skumulowanego stężenia liczbowego cząstek stałych
<i>LCA</i>	<i>Life Cycle Assessment</i> , ocena cyklu życia
<i>LTO</i>	<i>Landing and Take-off test</i> , cykl startu i lądowania
<i>MAE</i>	<i>Mean Absolute Error</i> , średni błąd bezwzględny
$m_{PM}/m_{PM\ max}$	względna wartość skumulowanego stężenia masowego cząstek stałych
<i>MSW</i>	<i>Municipal Solid Waste</i> , stałe odpady komunalne
<i>n</i>	stężenie liczbowe cząstek stałych o określonej średnicy
<i>N</i>	stężenie całkowite
<i>OEM</i>	<i>Original Equipment Manufacturer</i> , producenci oryginalnego wyposażenia
p_2	ciśnienie za sprężarką
<i>PM</i>	<i>particulate matter</i> , cząstki stałe
R^2	współczynnik determinacji
<i>RMSE</i>	<i>Root Mean Square Error</i> , średni błąd kwadratowy
<i>RPM</i>	prędkość obrotowa wirnika sprężarki
<i>SAF</i>	<i>Sustainable Aviation Fuels</i> , zrównoważone paliwa lotnicze
T_2	temperatura powietrza za sprężarką
T_3	temperatura gazów za komorą spalania
<i>T50</i>	temperatura destylacji 50%
<i>TIT</i>	<i>Turbine Inlet Temperature</i> , temperatura gazów przed turbiną
<i>TMF</i>	<i>Total Mass Flow</i> , masowe natężenie przepływu powietrza
<i>TSFC</i>	<i>Thrust-specific Fuel Consumption</i> , jednostkowe zużycie paliwa
<i>UCO</i>	<i>Used Cooking Oil</i> , zużyty olej spożywczy
<i>VIF</i>	<i>Variance Inflation Factor</i> , współczynnik inflacji wariancji
<i>W</i>	wynik testu Shapiro-Wilka
W_{PM}	wskaźnik masy cząstek stałych
W_{PN}	wskaźnik liczby cząstek stałych
<i>X</i>	wartość rzeczywista,
x_k	zmienne objaśniające,
<i>Y</i>	zmienna objaśniana przez model
<i>Z</i>	wartość standaryzowana

β_0	stała wartość
β_k	parametry strukturalne modelu
γ	napięcie powierzchniowe
ε	składnik losowy
μ	średnia wartość wartości rzeczywistej
ν	lepkość kinematyczna
ρ	gęstość paliwa
σ	odchylenie standardowe wartości rzeczywistej
σ_k	konduktywność

1. WPROWADZENIE

1.1 Motywacja podjęcia tematu

Ze względu na rosnące znaczenie sektora lotniczego w całkowitym wpływie człowieka na środowisko naturalne, od wielu lat prowadzone są liczne badania mające na celu ograniczenie antropogenicznego wpływu lotnictwa na środowisko. Za jedno z najistotniejszych rozwiązań średnio- i długoterminowych uznaje się zrównoważone paliwa lotnicze *SAF* (*Sustainable Aviation Fuels*). Aktualnie certyfikowanych jest osiem procesów produkcji *SAF*, które mogą być bez przeszkód stosowane w silnikach samolotów odrzutowych po zmieszaniu w odpowiednich proporcjach z paliwem konwencjonalnym. Maksymalny dopuszczalny udział *SAF* w mieszaninie z paliwem konwencjonalnym zgodnie z normą *ASTM D7566* wynosi 50%. Prowadzone są jednak intensywne badania nad możliwością zasilania silników odrzutowych wyłącznie paliwami zrównoważonymi, bez konieczności udziału paliw konwencjonalnych.

Zakres surowców stosowanych do produkcji paliw zrównoważonych jest bardzo szeroki, począwszy od roślin oleistych, wykorzystywanych już w początkowym etapie rozwoju biopaliw silnikowych, aż po coraz częściej stosowane odpady i pozostałości pochodzące z przetwórstwa żywnościowego lub przemysłowego. Przedsiębiorstwa zajmujące się produkcją *SAF* stale poszerzają katalog surowców wykorzystywanych w procesach technologicznych, jednak obecnie szczególny nacisk kładzie się na zużyty olej spożywczy *UCO* (*Used Cooking Oil*), odpady z przetwórstwa biomasy lignocelulozowej oraz różnorodne frakcje odpadów, które mogą zostać ponownie zagospodarowane w produkcji paliw. Zrównoważone paliwa lotnicze wytwarzane z odpadów i pozostałości charakteryzują się zmniejszeniem emisji CO_2 w porównaniu zarówno do paliw konwencjonalnych, jak i tradycyjnych surowców stosowanych wcześniej w produkcji biopaliw. Paliwa alternatywne muszą spełniać kilka podstawowych wymagań, aby mogły zostać uznane za zrównoważone. Należą do nich m.in.: wykazanie zmniejszenia emisji dwutlenku węgla w całym cyklu życia paliwa w porównaniu z paliwem konwencjonalnym, wykorzystanie surowców, które nie konkurują o wodę słodką i grunty orne z produkcją żywności, oraz niedoprowadzanie do wylesiania terenów pod nowe uprawy surowców. Z tego względu nie wszystkie rośliny potencjalnie nadające się do produkcji paliw alternatywnych mogą zostać wykorzystane jako surowce do wytwarzania *SAF*.

Skupiając się na ostatnim etapie cyklu życia paliw lotniczych, jakim jest spalanie paliwa w silniku, należy podkreślić, że emisja związków szkodliwych oraz cząstek stałych generowanych podczas pracy silników odrzutowych powinna być istotnie ograniczona w porównaniu z paliwami konwencjonalnymi. W tym zakresie prowadzone są liczne badania, obejmujące zarówno emisję związków gazowych, jak i cząstek stałych, jednak dotychczas nie wszystkie certyfikowane paliwa zostały poddane analizom w jednakowym zakresie. Badania zrównoważonych paliw lotniczych w zakresie emisji cząstek stałych stanowią obszar naukowy o dużym potencjale rozwojowym. Procesy formowania cząstek stałych w silnikach zasilanych *SAF* wymagają dalszych badań, aby w pełni zrozumieć i określić, które właściwości paliw są kluczowe, dla maksymalnego ograniczenia emisji cząstek stałych w porównaniu do paliw tradycyjnych.

Główny obszar działalności naukowej autora opisywany w rozprawie dotyczy kompleksowej analizy zrównoważonych paliw lotniczych i emisji cząstek stałych z silników zasilanych tymi paliwami, ze szczególnym uwzględnieniem modelowania parametrów emisji cząstek stałych. Modelowanie parametrów emisji cząstek stałych pozwala na zdefiniowanie kluczowych właściwości fizykochemicznych paliw oraz parametrów eksploatacyjnych silnika, które w największym stopniu determinują wartość poszczególnych wskaźników emisji cząstek stałych. Dane te umożliwiają ocenę, w jaki sposób zmiana konkretnego parametru wpływa na wskaźniki emisji cząstek stałych, co w przyszłości może stanowić podstawę do opracowania paliw ograniczających

emisję w znacznie większym stopniu niż obecnie dostępne rozwiązania. Modele opisujące zależności między wskaźnikami emisji spalin a właściwościami fizykochemicznymi paliw alternatywnych i parametrami pracy silnika są kluczowe dla zrozumienia procesów tworzenia się związków toksycznych w silnikach przepływowych. Ze względu na to, że zrównoważone paliwa lotnicze są wciąż rozwijane i surowce stosowane do ich produkcji pozostają zmienne, skład chemiczny tych paliw oraz ich właściwości fizykochemiczne mogą się różnić w zależności od zastosowanego surowca. Dlatego w niniejszej pracy przeprowadzono analizę aktualnie dostępnych SAF oraz badań emisji cząstek stałych, które posłużyły do modelowania wskaźników emisji cząstek stałych w odniesieniu do właściwości fizykochemicznych paliw i parametrów eksploatacyjnych silnika.

1.2 Problem badawczy i cel pracy

Zakres niniejszej pracy determinują następujące czynniki badawcze i poznawcze:

- a) potrzeba pogłębienia wiedzy w obszarze zrównoważonych paliw lotniczych,
- b) dążenie do zrozumienia procesów powstawania cząstek stałych w zależności od składu mieszaniny paliwa konwencjonalnego i SAF,
- c) analiza zależności między parametrami emisji cząstek stałych a właściwościami fizykochemicznymi paliwa oraz parametrami pracy silnika,
- d) identyfikacja parametrów frakcji stałej cząstek stałych w odniesieniu do rodzaju zastosowanego paliwa.

Dotychczasowy stan wiedzy nie pozwala w sposób wystarczająco precyzyjny określić zależności pomiędzy parametrami emisji cząstek stałych generowanych przez silniki lotnicze a właściwościami fizykochemicznymi zrównoważonych paliw lotniczych. Brakuje również zweryfikowanych modeli opisujących wpływ parametrów pracy silnika oraz składu mieszaniny paliwa konwencjonalnego i SAF na wielkość emisji cząstek stałych oraz charakterystykę rozkładu wymiarowego cząstek stałych.

W związku z tym zasadniczym problemem badawczym niniejszej rozprawy jest określenie zależności między parametrami emisji cząstek stałych a parametrami fizykochemicznymi zrównoważonych paliw lotniczych i parametrami pracy silnika, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości opisu tych zależności za pomocą modeli liniowych i ich walidacji.

Na podstawie powyższych rozważań sformułowano następujący cel niniejszej rozprawy:

Analiza zrównoważonych paliw lotniczych i opracowanie metodyki wyznaczania wskaźników emisji cząstek stałych oraz parametrów ich rozkładu wymiarowego w zależności od parametrów pracy silnika i właściwości fizykochemicznych zrównoważonych paliw lotniczych.

1.3 Forma rozprawy

Rozprawa składa się z cyklu sześciu artykułów opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych:

A.1 Kurzawska-Pietrowicz P. i Jasiński R. *A Review of Alternative Aviation Fuels*. Energies, 2024, tom 17, numer 16, strony 3890-1-3890-22, DOI: 10.3390/en17163890 (IF: 3,0; MNiSW: 140).

A.2 Kurzawska-Pietrowicz P. i Jasiński R. *Overview of Sustainable Aviation Fuels with Emission Characteristic and Particles Emission of the Turbine Engine Fueled ATJ Blends with Different Percentages of ATJ Fuel*. Energies, 2021, tom 14, numer 7, strony 1858-1-1858-18, DOI: 10.3390/en14071858 (IF: 3,252; MNiSW: 140).

- A.3** Jasiński R., **Kurzawska-Pietrowicz P.** i Przysowa R. *Characterization of Particle Emissions from a DGEN 380 Small Turbofan Fueled with ATJ Blends*. Energies, 2021, tom 14, numer 12, strony 3368-1-3368-12, DOI: 10.3390/en14123368 (**IF: 3,252; MNiSW: 140**).
- A.4** **Kurzawska-Pietrowicz P.** i Jasiński R. *Characterization of Particle Emissions from GTM 400 Fueled with HEFA-SPK Blends*. Energies, 2025, tom 18, numer 11, strony 2696-1-2696-11, DOI: 10.3390/en18112696 (**IF: 3,0; MNiSW: 140**).
- A.5** **Kurzawska-Pietrowicz P.**, Szrama S., Jasiński R. i Siedlecki M. *Evaluation of Jet Engine Performance Parameters Fueled with Sustainable Aviation Fuel*. Combustion Engines, 2025, in press, strony 3-10, DOI: 10.19206/CE-208774 (**CiteScore: 1,7; MNiSW: 70**).
- A.6** **Kurzawska-Pietrowicz P.**, Jasiński R. i Maciejewska M. *Modeling the Impact of Hydroprocessed Ester And Fatty Acids – Synthetic Paraffinic Kerosene Fuel Properties and Engine Performance on Emission Characteristics and Particle Size Distribution*. Advances in Science and Technology Research Journal, 2025, tom 19, numer 10, DOI: 10.12913/22998624/207916 (**IF: 1,3; MNiSW: 100**).

W Załączniku A załączono pełne teksty publikacji. Załącznik B zawiera oświadczenia współautorów o udziale w publikacjach. Chociaż niniejszy dokument podsumowuje badania przedstawione w publikacjach A.1-A.6, nie może być rozpatrywany bez nich.

1.4 Plan rozprawy

- Rozdział 1: Wprowadzenie** – obejmuje motywację podjęcia tematu badawczego, opis problemu badawczego, cel pracy oraz opis formy rozprawy.
- Rozdział 2: Zrównoważone paliwa lotnicze** – obejmuje analizę zrównoważonych paliw lotniczych w zakresie: definicji, wymagań, procesów produkcji, procesu certyfikacji, oceny cyklu życia oraz emisji cząstek stałych. Podstawą opracowania rozdziału 2 są publikacje A.1-A.4.
- Rozdział 3: Emisja cząstek stałych i parametry pracy silnika zasilanego zrównoważonymi paliwami lotniczymi** – obejmuje wyniki badań własnych dotyczących parametrów pracy silników lotniczych oraz emisji cząstek stałych. Podstawą opracowania rozdziału 3 są publikacje A.2-A.5.
- Rozdział 4: Modelowanie parametrów emisji cząstek stałych** – obejmuje przedstawienie metody opracowywania modeli liniowych oraz ostatecznie uzyskanych modeli wskaźników emisji cząstek stałych i parametrów rozkładu wymiarowego cząstek stałych. Podstawą opracowania rozdziału 4 jest publikacja A.6.
- Rozdział 5: Wnioski i kierunki dalszych prac** – obejmuje wnioski końcowe i kierunki dalszych prac.

Literatura rozprawy składa się z:

- Publikacja **A.1** – 95 źródeł,
- Publikacja **A.2** – 38 źródeł,
- Publikacja **A.3** – 47 źródeł,
- Publikacja **A.4** – 33 źródła,
- Publikacja **A.5** – 25 źródeł,
- Publikacja **A.6** – 19 źródeł,

Załącznik A zawiera **Publikacje A.1-A.6**.

Załącznik B zawiera oświadczenia współautorów publikacji.

2. ZRÓWNOWAŻONE PALIWA LOTNICZE

2.1. Definicja i wymagania – publikacje A.1 i A.2

Publikacja A.1 zawiera kompleksową analizę zrównoważonych paliw lotniczych, w zakresie wymagań, sposobu certyfikacji, procesów produkcji, oceny cyklu życia paliw, i dostępnych badań emisyjnych związków gazowych oraz cząstek stałych. Zrównoważone paliwa lotnicze stanowią perspektywiczne rozwiązanie średnio- i długoterminowe w zakresie ograniczania emisji gazów cieplarnianych w sektorze lotniczym [A.1, A.2]. Zgodnie z Załącznikiem 16 Organizacji Międzynarodowego Lotnictwa Cywilnego ICAO (*International Civil Aviation Organization*), SAF definiuje się jako „odnawialne lub pochodzące z odpadów paliwo lotnicze, które spełnia kryteria zrównoważonego rozwoju”.

Zrównoważone paliwo lotnicze jest pojęciem o szerszym zakresie niż biopaliwa, ponieważ jako surowce do jego produkcji wykorzystywane są nie tylko materiały pochodzenia biologicznego, ale także substraty niebiologiczne. Aby paliwa lotnicze mogły być uznane za „zrównoważone”, muszą spełniać kilka kluczowych kryteriów: zmniejszać emisję dwutlenku węgla w całym cyklu życia, zapewniać, że surowce używane do produkcji nie konkurują z uprawami roślin żywieniowych o wodę i grunty orne, oraz charakteryzować się ograniczonym zapotrzebowaniem na wodę słodką. Ponadto uprawa surowców wykorzystywanych do produkcji paliwa nie może prowadzić do wylesiania obszarów naturalnych. Nie każdy surowiec używany do produkcji alternatywnego paliwa lotniczego spełnia wszystkie wymienione powyżej wymagania. Termin SAF jest powszechnie stosowany przez międzynarodowe organizacje lotnicze, jednak istnieje również inne określenie odnoszące się do zrównoważonych paliw lotniczych – paliwo kwalifikujące się w ramach programu CORSIA – CEF (*CORSIA Eligible Fuel*). CORSIA to program mający na celu kompensację i redukcję emisji dwutlenku węgla w lotnictwie (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*). Tego rodzaju paliwo musi spełniać więcej kryteriów niż SAF, przy czym wymagania te nie ograniczają się wyłącznie do aspektów środowiskowych. Szczegółowe wymagania dotyczące paliw CEF oraz ich dokładna analiza zostały przedstawione w publikacjach A.1 i A.2.

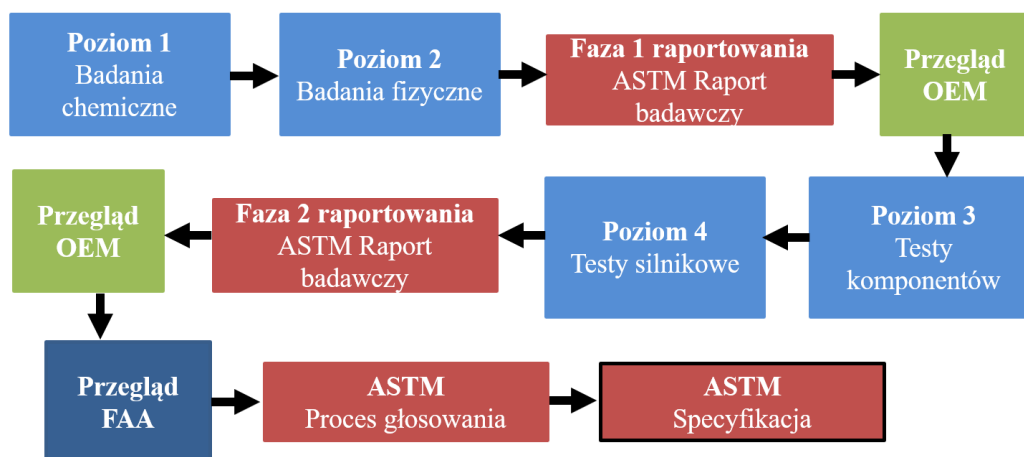
2.2. Proces certyfikacji SAF – publikacja A.1

Nowe paliwo, które ma być używane w lotnictwie, musi spełniać określone wymagania stawiane wobec paliw konwencjonalnych i być zatwierdzone w ramach procedury ASTM D4054 (*Standard Practice for Evaluation of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives*). Etapy procesu certyfikacji przedstawiono na rys. 1. Certyfikacja paliwa lotniczego obejmuje cztery poziomy badań oraz dwie fazy raportowania. Łączny czas certyfikacji może wynosić od około czterech do sześciu lat. Poziom 1 dotyczy analizy właściwości fizykochemicznych paliwa, natomiast poziom 2 obejmuje badania właściwości użytkowych. Poziomy 1 i 2 mają charakter laboratoryjny, a ich realizacja trwa około sześciu miesięcy. Objętość próbki paliwa wymagana w poziomie 1 wynosi około 40 dm³, natomiast w poziomie 2 – od 40 do 400 dm³. Po zakończeniu poziomów 1 i 2 sporządzany jest pierwszy raport badawczy ASTM (faza 1 raportowania), po którym następuje jego weryfikacja przez producentów OEM (*Original Equipment Manufacturer*) – faza ta trwa od sześciu miesięcy do jednego roku.

Druga faza jest podzielona na poziom 3 – testowanie komponentów – oraz poziom 4 – testowanie napędów lotniczych. Czas trwania poziomów 3 i 4 wynosi od dwóch do trzech lat. Objętość paliwa wymagana na poziomie 3 mieści się w zakresie od około 950 do 40 000 dm³, natomiast w poziomie 4 może sięgać nawet 850 000 dm³. Po zakończeniu poziomów 3 i 4 sporządzany jest kolejny raport badawczy ASTM (faza 2 raportowania), który następnie jest

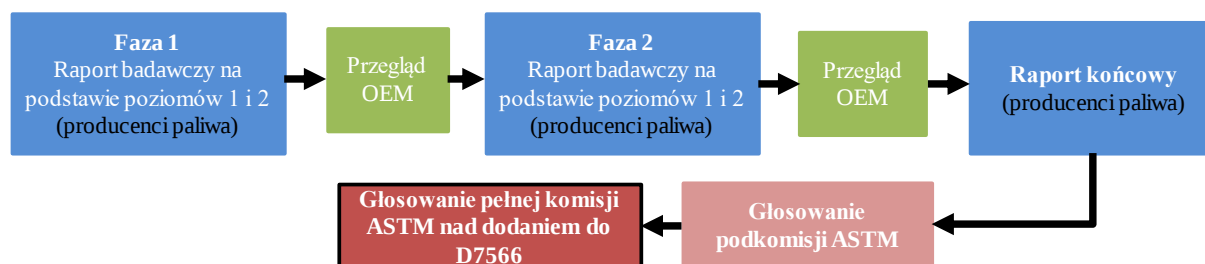
weryfikowany i zatwierdzany przez producentów *OEM* – faza ta trwa od sześciu miesięcy do jednego roku.

Kolejnym etapem jest przegląd dokumentacji przez Federalną Administrację Lotnictwa *FAA* (*Federal Aviation Administration*), po którym następuje proces głosowania w radzie *ASTM*. Na tym etapie ścieżka produkcji paliwa może zostać zaakceptowana lub odrzucona. Po zakończeniu procesu głosowania ścieżka produkcji zostaje dodana do specyfikacji *ASTM*, co kończy proces certyfikacji.



Rysunek 1. Standardowy proces certyfikacji nowych paliw lotniczych i dodatków do paliw zgodnie z normą *ASTM D4054* [rys. 1 w A.1]

Po zakończeniu testów zgodnych z procedurą *ASTM D4054* rozpoczyna się proces zatwierdzania zgodnie z normą *ASTM D7566* (*Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*). Na tym etapie właściwości i charakterystyki nowych paliw alternatywnych są porównywane z właściwościami paliw konwencjonalnych, a jeśli paliwo spełnia wszystkie wymagania, do specyfikacji *ASTM D7566* zostaje włączona nowa ścieżka produkcyjna. Paliwa spełniające wymagania normy *ASTM D7566* nadają się do stosowania w układach napędowych samolotów wymagających zgodności z normą *ASTM D1655*, dotyczącą paliwa lotniczego. Certyfikowane paliwo alternatywne jest paliwem typu *drop-in*, co oznacza, że nie wymaga żadnych modyfikacji w konstrukcji silnika ani w infrastrukturze paliwowej i systemach dystrybucji. Paliwo typu *drop-in* może być stosowane w silnikach lotniczych w identyczny sposób jak paliwo konwencjonalne. Obecnie istnieje osiem ścieżek produkcyjnych certyfikowanych zgodnie z normą *ASTM D7566*. Norma ta definiuje maksymalny limit mieszania dla każdej ścieżki produkcyjnej, przy czym obecnie dopuszczalny maksymalny udział wynosi 50% objętości paliwa alternatywnego oraz 50% objętości konwencjonalnego paliwa lotniczego (Jet A-1 lub Jet A). Ogólna procedura uzyskania certyfikacji zgodnej z *ASTM D7566* składa się z następujących etapów przedstawionych na rys. 2.



Rysunek 2. Proces certyfikacji paliw lotniczych zgodnie z normą *ASTM D7566* [rys. 2 w A.1]

2.3. Procesy produkcji SAF – publikacje A.1 i A.2

Certyfikowane procesy produkcji SAF zostały szczegółowo opisane w publikacjach A.1 i A.2. Zestawienie obecnie zatwierdzonych procesów, wraz z przykładami stosowanych surowców oraz maksymalnym dopuszczalnym udziałem paliwa alternatywnego w mieszaninie z paliwem konwencjonalnym, przedstawiono w tab 1.

Tabela 1. Zatwierdzone procesy produkcji SAF [tab. 2 w A.2]

Załącznik	Proces	Surowiec	Data zatwierdzenia	Limit mieszanki z Jet A-1
A1	Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK)	Biomasa (odpady drzewne, trawa, stałe odpady komunalne)	2009	do 50%
A2	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA-SPK)	Biomasa oleista, np. zużyty olej spożywczy, jatrofa, lnicznik siewny	2011	do 50%
A3	Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Isoparaffins (HFS-SIP)	Bakteryjna konwersja cukrów w węglowodory	2014	do 10%
A4	FT-SPK with aromatics (FT-SPK/A)	Biomasa odnawialna, tj. stałe odpady komunalne, odpady rolnicze i drzewne	2015	do 50%
A5	Alcohol to jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK)	Odpady rolnicze (pędy kukurydzy, trawa, słoma), biomasa celulozowa	2016	do 50%
A6	Catalytic Hydrothermolysis Synthesized Kerosene (CH-SK, lub CHJ)	Tłuszcze, oleje i smary roślinne lub zwierzęce	2020	do 50%
A7	Hydroprocessed Hydrocarbons, Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene (HHC-SPK lub HC-HEFA-SPK)	Węglowodory pochodzenia biologicznego, estry kwasów tłuszczowych, wolne kwasy tłuszczowe, gatunek alg <i>Botryococcus braunii</i>	2020	do 10%
A8	Alcohol to Jet Synthetic Kerosene with Aromatics (ATJ-SKA)	Odpady rolnicze (pędy kukurydzy, trawa, słoma), biomasa celulozowa	2023	do 50%

2.4. Ocena cyklu życia – publikacja A.1

Ocena cyklu życia LCA (*Life Cycle Assessment*) zrównoważonego paliwa lotniczego obejmuje oszacowanie emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia paliwa oraz porównanie uzyskanego wyniku z wartością dla paliwa konwencjonalnego. W metodzie LCA dla konwencjonalnego paliwa lotniczego Jet A-1 przyjmuje się wartość 89 gCO_{2e}/MJ, natomiast zrównoważone paliwo lotnicze lub paliwo kwalifikujące się do programu CORSIA musi charakteryzować się mniejszą wartością emisji CO₂ niż paliwo konwencjonalne. Zgodnie z dokumentem ICAO CORSIA *Methodology for Calculating Actual Life Cycle Emissions Values*, całkowite emisje CO₂ w ocenie cyklu życia stanowią sumę wartości Core LCA oraz indukowanej zmiany użytkowania gruntów ILUC (*Induced Land Use Change*). Wartość Core LCA obejmuje wszystkie emisje CO₂ związane z poszczególnymi etapami produkcji, transportu i wykorzystania SAF w lotnictwie. Uwzględnia ona emisje CO₂ wynikające

z uprawy surowca, przetwarzania, gromadzenia, odzyskiwania, ekstrakcji, transportu do zakładów przetwórczych, konwersji na paliwo, transportu gotowego paliwa, jego dystrybucji oraz spalania w silnikach samolotów. Poniższy wzór przedstawia zależność wykorzystywaną do wyznaczenia wartości *Core LCA*:

$$Core\ LCA\ value = e_{fe_c} + e_{fe_hc} + e_{fe_p} + e_{fe_t} + e_{fefu_p} + e_{fu_t} + e_{fu_c}, \quad (1)$$

gdzie:

e_{fe_c} – emisje CO₂ z uprawy surowców,

e_{fe_hc} – emisje CO₂ pochodzące ze zbioru i gromadzenia surowców,

e_{fe_p} – emisje CO₂ z przetwarzania surowców,

e_{fe_t} – emisje CO₂ z transportu surowców,

e_{fefu_p} – emisje CO₂ z procesu konwersji,

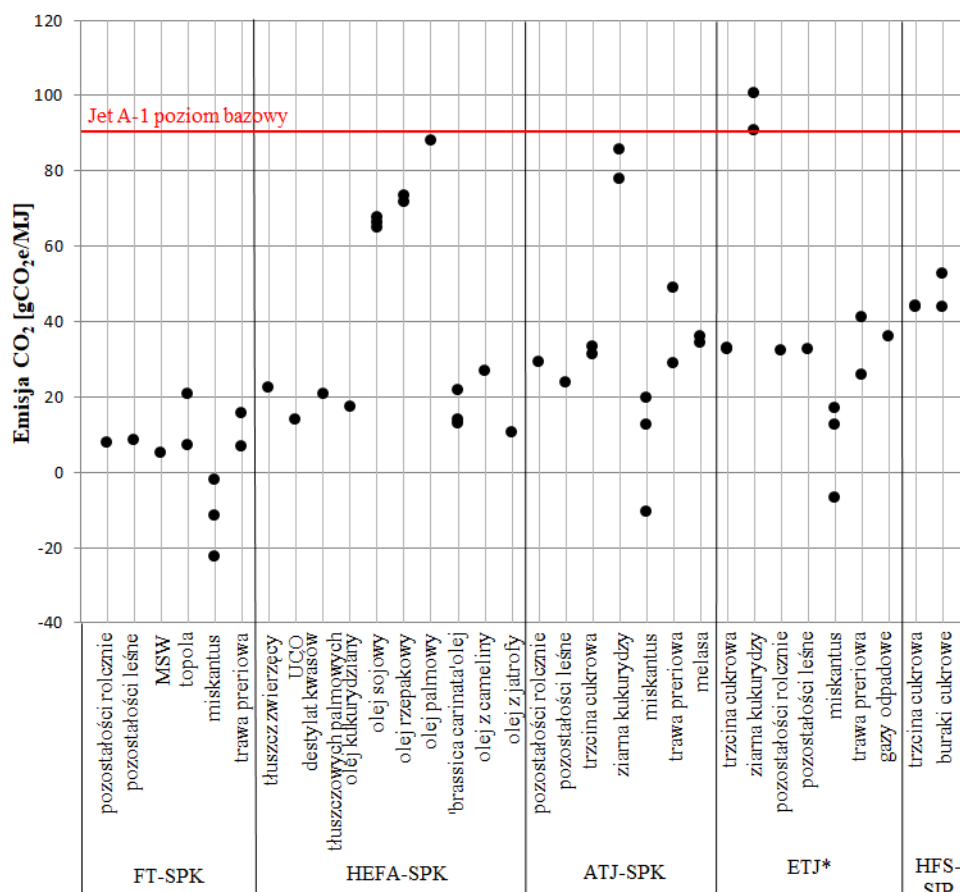
e_{fu_t} – emisje CO₂ z transportu i dystrybucji paliw,

e_{fu_c} – emisje CO₂ ze spalania paliwa.

Wartość *ILUC* odnosi się do emisji CO₂ wynikających z potencjalnej zmiany sposobu użytkowania gruntów w celu pozyskania surowców do produkcji zrównoważonych paliw lotniczych. W niektórych przypadkach wartość *ILUC* przyjmuje wartość równą zero. Do tej grupy należą surowce pochodzące z odpadów, pozostałości i produktów ubocznych, a także takie, które nie powodują ekspansji globalnego użytkowania gruntów rolnych lub charakteryzują się znacznie wyższymi plonami z jednostki powierzchni w porównaniu z tradycyjnymi uprawami lądowymi, jak niektóre gatunki alg.

Według dostępnych badań, etapem o najniższej emisji CO₂ w cyklu życia *SAF* jest transport i dystrybucja, natomiast głównymi źródłami emisji gazów cieplarnianych pozostają działalność rolnicza, uprawa surowców oraz proces produkcji paliwa. Jednym z czynników zwiększających emisję podczas uprawy surowców jest stosowanie nawozów mineralnych i pestycydów.

Współczynniki emisji CO₂ w całym cyklu życia, przedstawione w opracowaniu *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels*, zaprezentowano na rys. 3. Końcowa wartość emisji gazów cieplarnianych stanowi sumę składników *ILUC* i *Core LCA*, zgodnie z metodyką opisaną w dokumentach *ICAO*.



Rysunek 3. Wskaźniki emisji CO₂ w cyklu życia paliw CEF [rys. 4 w A.1]

* ETJ—Alcohol to jet bazujący na etanolu

Powyższe zestawienie uwzględnia zarówno procesy ATJ-SPK oparte na izobutanolu (ATJ-SPK) i etanolu (ETJ), jak i pozostałe certyfikowane ścieżki produkcji SAF. Najmniejsze wartości współczynnika emisji CO₂ w cyklu życia charakteryzują paliwa wytwarzane metodą FT-SPK, zwłaszcza przy wykorzystaniu miskantu jako surowca. Małe wartości uzyskano również dla procesów ATJ-SPK i ETJ bazujących na tym samym surowcu. Z kolei największy współczynnik emisji CO₂ dotyczy procesu ETJ opartego na kukurydzy, podczas gdy proces ATJ-SPK z izobutanolu, również wytwarzanego z kukurydzy, wykazuje wartości zbliżone do paliwa Jet A-1. W przypadku ścieżki HEFA-SPK widoczny jest wyraźny wpływ rodzaju surowca – największe wartości emisji CO₂ uzyskano dla oleju palmowego, rzepakowego i sojowego, natomiast najmniejsze dla oleju z jatrofy oraz zużytego oleju spożywczego. Dla surowców takich jak pozostałości rolnicze i leśne, stałe odpady komunalne MSW (*Municipal Solid Waste*) oraz zużyty olej spożywczy, wartość *ILUC* przyjmuje się jako równą zero, co wpływa na znaczące zmniejszenie całkowitego wskaźnika emisji CO₂. Analiza median współczynników emisji CO₂ w cyklu życia wskazuje, że najmniejszą wartość (6,8 gCO₂e/MJ) odnotowano dla procesu FT-SPK, natomiast największą (44 gCO₂e/MJ) dla procesu HFS-SIP w przypadku, którego w dokumentach ICAO uwzględniono jedynie dwa surowce pochodzące z różnych regionów świata.

2.5. Emisja cząstek stałych – publikacje A.1, A.3 i A.4

Cząstki stałe *PM* (*Particulate Matter*) emitowane przez silniki odrzutowe to głównie cząstki bardzo drobne o średnicy do 100 nm oraz nanocząstki o średnicy do 50 nm. W spalinach silników lotniczych pod względem liczbowym przeważają cząstki stałe o średnicy mniejszej niż 80 nm, które

powstają w wyniku mechanizmu nukleacji. Z kolei cząstki stałe powstające w mechanizmie akumulacji (o średnicach od 80 nm do 1000 nm) w największym stopniu przyczyniają się do całkowitej emisji cząstek stałych.

Emisja cząstek stałych z silników odrzutowych jest głównie związana ze składem chemicznym paliwa, jego właściwościami fizykochemicznymi i parametrami procesu spalania. Z tego względu, konkretne właściwości paliwa i zawartość poszczególnych frakcji węglowodorów w paliwie mogą wpływać na zmiany w emisji cząstek stałych. Cząstki stałe emitowane przez silniki zasilane paliwami zrównoważonymi mają na ogół mniejszą średnicę niż cząstki stałe pochodzące ze spalania paliw konwencjonalnych. Zgodnie z literaturą, jest to spowodowane zmniejszoną liczbą jąder sadzy, co ogranicza proces aglomeracji i powstawanie większych cząstek. Zmniejszona emisja cząstek stałych z silników zasilanych SAF jest głównie związana z zawartością wodoru i węglowodorów aromatycznych oraz siarki w paliwie. Zrównoważone paliwa lotnicze, które mają w składzie znikomą ilość węglowodorów aromatycznych lub nie mają ich wcale, mają zauważalnie mniejszą emisję sadzy niż paliwa konwencjonalne. Zgodnie z normą ASTM D7566, zawartość aromatów w mieszaninie paliwa konwencjonalnego z SAF powinna wynosić między 8% a 25%. Nawet niewielki dodatek SAF do paliwa konwencjonalnego zmniejsza zawartość aromatów w mieszaninie, co może wpływać na zmniejszoną emisję cząstek stałych.

Inne właściwości fizykochemiczne paliwa, które mają wpływ na tworzenie cząstek stałych w silnikach odrzutowych to m.in. gęstość, lepkość, napięcie powierzchniowe, stosunek wodoru do węgla w składzie chemicznym paliwa, temperatura dymienia, temperatura wrzenia. Według dostępnych badań, wpływ na tworzenie się cząstek stałych mają także ciśnienie i temperatura płomienia w komorze spalania oraz opóźnienie zapłonu. Nieefektywne rozpylanie i parowanie paliwa w komorze spalania wpływa na proces spalania i powstawanie związków toksycznych spalin, w tym cząstek stałych.

Wiele badań eksperymentalnych przeprowadzonych zarówno na odrzutowych silnikach pełnowymiarowych jak i silnikach laboratoryjnych, wykazało znaczne zmniejszenie emisji cząstek stałych z silników zasilanych paliwami zrównoważonymi w porównaniu do paliwa konwencjonalnego. Zmiany te były widoczne zarówno pod względem liczbowym, jak i masowym cząstek stałych i wynosiły nawet 95% zmniejszenia emisji cząstek stałych w porównaniu z paliwem konwencjonalnym. Wyniki różnią się w zależności od sposobu produkcji paliwa zrównoważonego, zastosowanych surowców, jak i jego udziału w mieszaninie z paliwem konwencjonalnym.

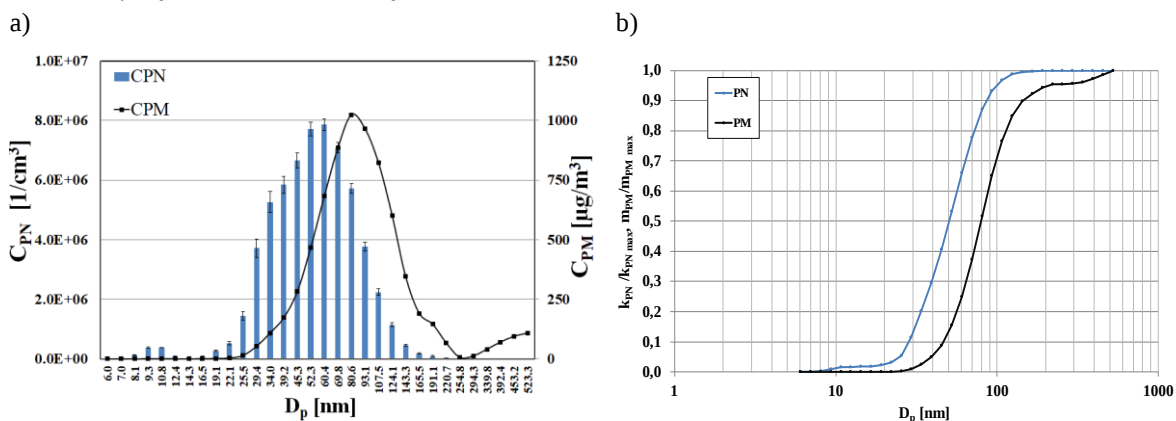
3. EMISJA CZĄSTEK STAŁYCH I PARAMETRY PRACY SILNIKA ZASILANEGO ZRÓWNOWAŻONYMI PALIWAMI LOTNICZYMI

3.1. Emisja cząstek stałych – publikacje A.2, A.3 i A.4

W publikacji A.2 przedstawiono wyniki pomiarów emisji cząstek stałych, analizowanych w zakresie stężenia liczbowego (C_{PN}) i masowego (C_{PM}) dla mieszanin paliwa Jet A-1 i *ATJ-SPK*.

Metodyka badań: pomiary zostały przeprowadzone na stanowisku silnikowym GTM 120, którego maksymalna siła ciągu wynosi 100 N. Zakres pomiarowy obejmował punkty pracy silnika od 10 N do 100 N, a pomiary wykonywano co 10 N. W celu przejrzystego zaprezentowania wyników, punkty pomiarowe pogrupowano i uśredniono w każdym z zakresów: małe obciążenia silnika (od 10 N do 30 N), średnie obciążenia silnika (od 40 N do 60 N) oraz duże obciążenia silnika (od 70 N do 100 N). Silnik był zasilany mieszaniną paliwa Jet A-1 i *ATJ-SPK* w udziale objętościowym: 30% *ATJ-SPK* i 50% *ATJ-SPK* oraz paliwa referencyjnego Jet A-1. W badaniach zastosowano syntetyczną parafinową naftę lotniczą typu *ATJ-SPK*, otrzymaną z izobutanolu. W trakcie pomiarów zmierzono stężenie liczbowe cząstek stałych w spalinach silnika z wykorzystaniem analizatora *EEPS 3090 (Engine Exhaust Particulate Sizer spectrometer)*. Analizator ten umożliwia pomiar dyskretnych średnic cząstek stałych od 5,6 nm do 560 nm. Szczegółowa metodyka badań została opisana w publikacji A.2.

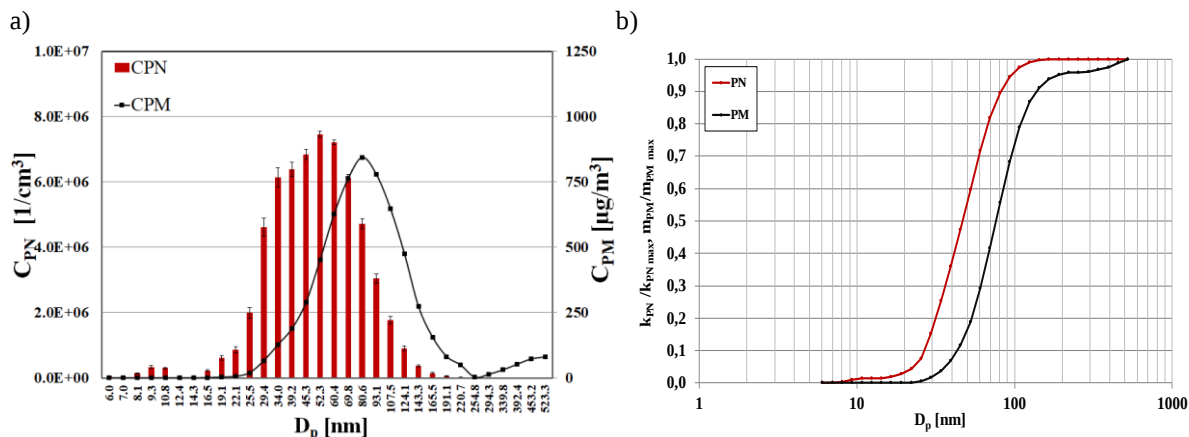
Wyniki dotyczące emisji cząstek stałych wskazują, że w spalinach silnika zasilanego paliwem Jet A-1 (rys. 4a), przy małych obciążeniach, dominowały cząstki o średnicach w zakresie od 25 do 125 nm. Średnica charakterystyczna dla rozkładu stężenia liczbowego wynosiła około 60 nm. Analiza rozkładu stężenia masowego w funkcji średnicy cząstek stałych wykazała, że dla paliwa Jet A-1 przy małych obciążeniach silnika zasadniczą część masy stanowiły cząstki o średnicach od 25 do 220 nm. Pozostała część masy wynikała z emisji niewielkiej liczby cząstek stałych o większych średnicach, mieszczących się w zakresie od 290 do 520 nm. Na podstawie względnej wartości skumulowanego stężenia liczbowego ($k_{PN}/k_{PN\ max}$) i masowego ($m_{PM}/m_{PM\ max}$) cząstek stałych dla małych obciążeń (rys. 4b) można stwierdzić, że w przypadku paliwa Jet A-1 około 90% liczby emitowanych cząstek stałych odpowiada 60% emitowanej masy. Około 90% wszystkich emitowanych cząstek stałych charakteryzuje się średnicą mniejszą niż 100 nm.



Rysunek 4. Charakterystyka stężenia liczbowego i masowego cząstek stałych w zależności od średnicy (a) i skumulowana względna liczba oraz masa cząstek stałych (b) dla małych obciążeń silnika zasilanego paliwem Jet A-1 [rys. 5 w A.2]

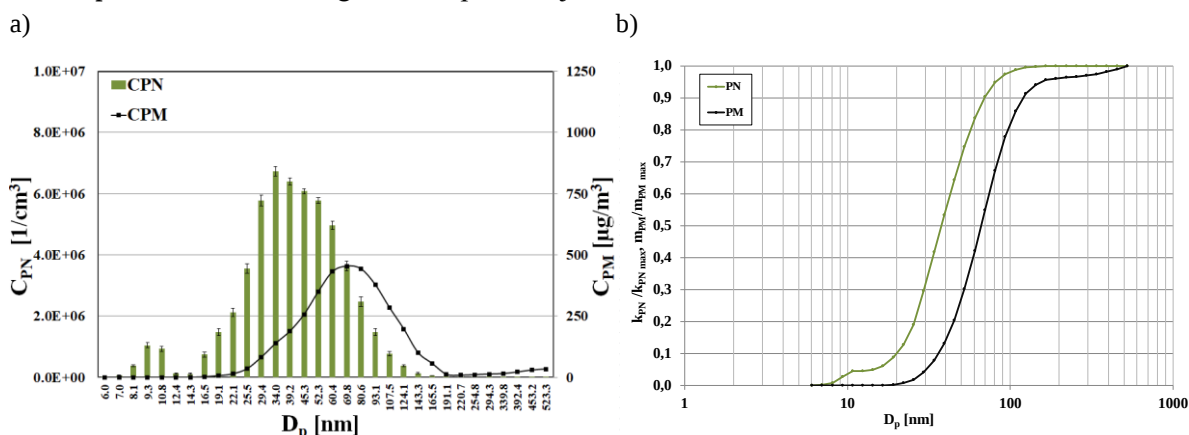
W zakresie małych obciążeń silnika, od 10 N do 30 N, dla paliwa zawierającego 30% udziału *ATJ-SPK* (rys. 5a) dominowały cząstki o średnicach 25–110 nm, przy czym największą liczebność wykazywały cząstki o średnicy 53 nm. W porównaniu z paliwem Jet A-1 mieszanka z 30% *ATJ-SPK* charakteryzowała się nieznacznym zmniejszeniem liczby cząstek stałych. Główną część emisji

stanowiły cząstki o średnicach w zakresie od 34–165 nm, natomiast pozostała część wynikała z emisji niewielkiej liczby cząstek stałych o średnicach od 290 do 520 nm. Na podstawie wartości skumulowanego stężenia liczbowego i masowego cząstek stałych dla małych obciążeń (rys. 5b) stwierdzono, że w przypadku paliwa z 30% udziałem *ATJ-SPK* około 90% liczby wszystkich emitowanych cząstek stałych odpowiada za około 55% emisji. Około 90% wszystkich cząstek stałych charakteryzuje się średnicą mniejszą niż 80 nm.



Rysunek 5. Charakterystyka stężenia liczbowego i masowego cząstek stałych w zależności od średnicy (a) i skumulowana względna liczba oraz masa cząstek stałych (b) dla małych obciążeń silnika zasilanego paliwem Jet A-1 z 30% udziałem *ATJ-SPK* [rys. 5 w A.2]

Dla paliwa zawierającego 50% udziału *ATJ-SPK*, w zakresie małych obciążeń silnika, dominujący przedział średnic cząstek stałych mieścił się w zakresie 20–100 nm, przy czym największą liczebność wykazywały cząstki o średnicy 35 nm (rys. 6a). W porównaniu z pozostałymi badanymi paliwami, stężenie liczbowe cząstek stałych było w tym przypadku najmniejsze – o około 10% mniejsze niż dla paliwa konwencjonalnego Jet A-1. Analiza rozkładu stężenia masowego wykazała, że zasadniczą część emitowanych cząstek stałych stanowiły cząstki o średnicach 25–165 nm, natomiast pozostałą część – niewielka liczba cząstek stałych o średnicach 250–523 nm. Całkowite stężenie masy cząstek stałych dla paliwa *ATJ50%* było o około 51% niższe w porównaniu z paliwem Jet A-1 w analizowanym zakresie pracy silnika. Na podstawie wartości skumulowanego stężenia liczbowego i masowego cząstek stałych dla małych obciążeń (rys. 6b) stwierdzono, że około 90% liczby emitowanych cząstek stałych odpowiada za około 55% masy. Około 90% wszystkich cząstek stałych charakteryzuje się średnicą mniejszą niż 70 nm. Analizę wyników dla pozostałych zakresów obciążeń silnika przedstawiono szczegółowo w publikacji A.2



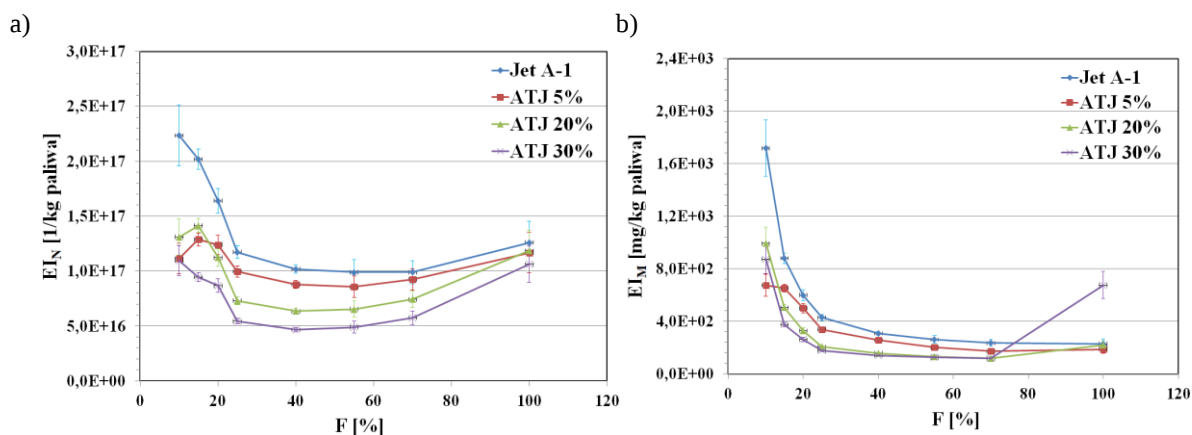
Rysunek 6. Charakterystyka stężenia liczbowego i masowego cząstek stałych w zależności od średnicy (a) i skumulowana względna liczba oraz masa cząstek stałych (b) dla małych obciążeń silnika zasilanego paliwem Jet A-1 z 50% udziałem *ATJ-SPK* [rys. 5 w A.2]

Badania opisane w publikacji A.3 dotyczyły emisji cząstek stałych dla różnych mieszanin paliwa konwencjonalnego Jet A-1 i paliwa alternatywnego *ATJ-SPK*.

Metodyka badań: badania przeprowadzono z wykorzystaniem silnika turbowentylatorowego DGEN 380, którego maksymalna siła ciągu wynosi 2550 N. Przed rozpoczęciem testów paliwo Jet A-1 zmieszano z paliwem alternatywnym *ATJ-SPK* w następujących proporcjach objętościowych: 5% (ATJ5%), 20% (ATJ20%) oraz 30% (ATJ30%) udziału *ATJ-SPK*. Zakres pomiarowy obejmował 8 punktów pracy silnika: 10%, 15%, 20%, 25%, 40%, 55%, 70% i 100% ciągu maksymalnego (F). Do pomiaru stężenia cząstek stałych w spalinach użyto analizatora *EEPS 3090*, który umożliwia pomiar dyskretnych średnic cząstek stałych od 5,6 nm do 560 nm. Szczegółowa metodyka badań została opisana w publikacji A.3.

Charakterystykę wskaźnika liczby cząstek stałych (EI_N) dla badanych paliw przedstawiono na rys. 7a. W przypadku silnika zasilanego paliwem Jet A-1 średnia wartość EI_N zmniejszyła się z $2,2 \cdot 10^{17}$ do $9,9 \cdot 10^{16}$ 1/kg paliwa wraz ze zwiększeniem siły ciągu z 10% F do 70% F . Przy dalszym zwiększeniu siły ciągu do 100% F zaobserwowano nieznaczny wzrost wartości EI_N do poziomu $1,2 \cdot 10^{17}$ 1/kg. Jak pokazano na rys. 7a, paliwo Jet A-1 charakteryzowało się największymi wartościami EI_N w całym zakresie pracy silnika, w porównaniu z pozostałymi badanymi paliwami.

Wartości wskaźnika liczby cząstek stałych dla paliwa z 30% udziałem *ATJ-SPK* były najmniejsze spośród czterech badanych mieszanin. Dla tego paliwa wartość EI_N zmniejszyła się z $1,1 \cdot 10^{17}$ do $4,7 \cdot 10^{16}$ 1/kg paliwa wraz ze zwiększeniem siły ciągu z 10% F do 40% F . Dalsze zwiększanie siły ciągu skutkowało wzrostem wartości EI_N dla wszystkich testowanych paliw, w tym dla ATJ30%, osiągając poziom $1,1 \cdot 10^{17}$ 1/kg paliwa. W efekcie charakterystyka EI_N przyjmuje kształt zbliżony do litery „U”. Zgodnie z oczekiwaniami, wartości EI_N dla mieszanin ATJ5% i ATJ20% mieściły się pomiędzy wartościami uzyskanymi dla paliwa Jet A-1 i mieszaniny ATJ30%, wykazując podobny trend zmian.



Rysunek 7. Charakterystyka (a) wskaźnika liczby cząstek stałych (EI_N) i (b) wskaźnika masy cząstek stałych (EI_M) w zależności od natężenia przepływu paliwa w silniku DGEN 380 [rys. 3 i 4 w A.3]

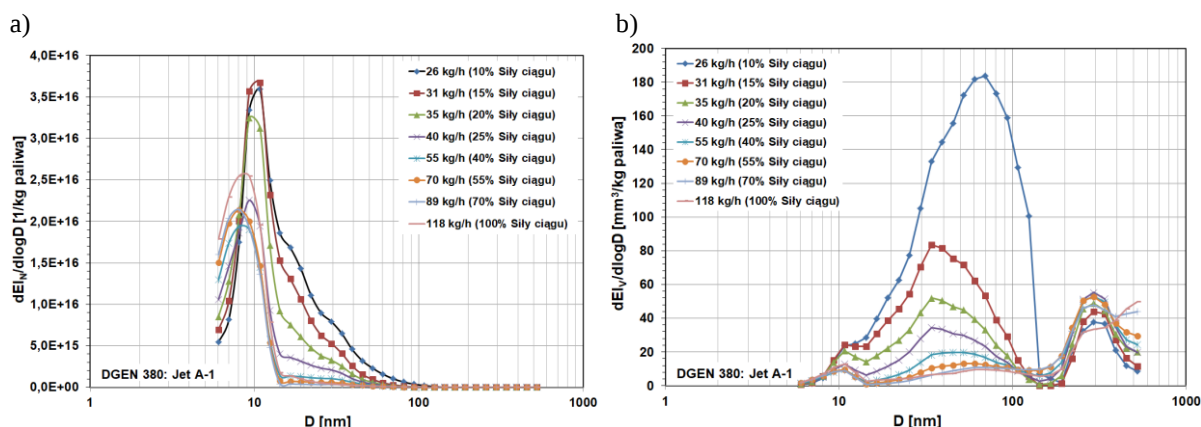
Zastosowanie paliwa alternatywnego spowodowało ograniczenie emisji cząstek stałych w całym badanym zakresie pracy silnika, z wyjątkiem punktu, w którym siła ciągu wynosiła 100% F , a silnik zasilany był paliwem ATJ30% (rys. 7b). Wartości EI_M wyraźnie zmniejszały się wraz ze zwiększaniem siły ciągu, osiągając minimum 117 mg/kg przy obciążeniu silnika wynoszącym 70% F . Największe zmniejszenie EI_M odnotowano w początkowej fazie testu – do poziomu około 25% F – powyżej którego wskaźnik pozostawał na względnie stałym poziomie lub wykazywał niewielkie zwiększenie. Zwiększenie udziału paliwa alternatywnego w mieszaninie skutkowało dalszym ograniczeniem emisji cząstek stałych. Zwiększenie wartości EI_M przy największych wartościach siły ciągu było prawdopodobnie spowodowane większą emisją cząstek stałych o dużych średnicach (tzw. *soot mode*).

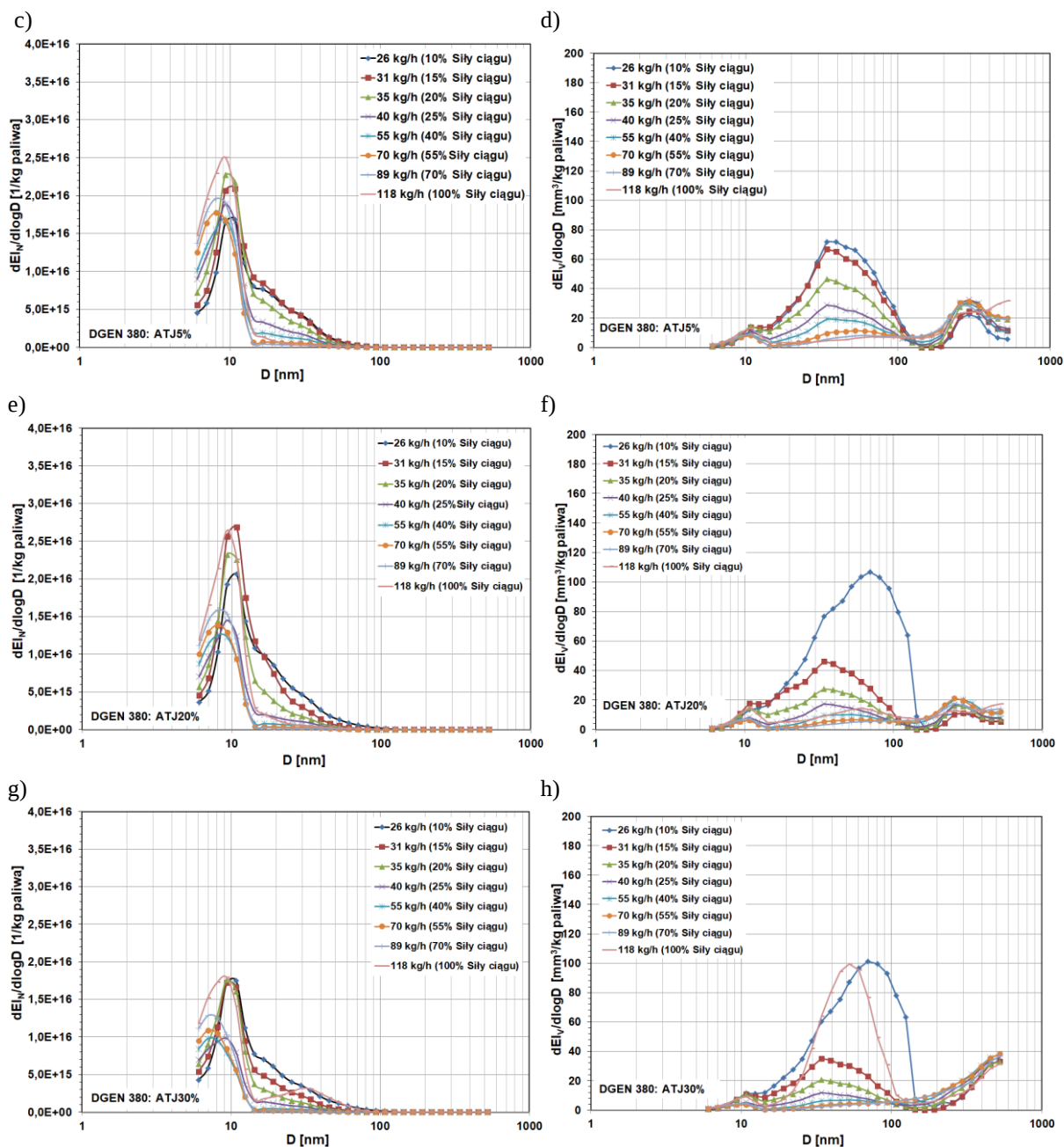
Nawet niewielka liczba cząstek stałych o średnicy przekraczającej 50 nm istotnie wpływa na wartość stężenia masowego, zwłaszcza w przypadku silników odrzutowych, w których dominuje frakcja cząstek stałych o średnicach poniżej 20 nm (nukleacja).

Na rys. 8 przedstawiono przykładowe charakterystyki wskaźnika liczby i objętości cząstek stałych w zależności od ich średnicy, przy różnej nastawie siły ciągu silnika. Badane paliwa to Jet A-1 (rys. 8a i b), ATJ5% (rys. 8c i d), ATJ20% (rys. 8e i f) i ATJ30% (rys. 8g i h). Cząstki powstające w mechanizmie nukleacji dominują w rozkładzie wymiarowym stężenia liczbowego cząstek stałych, co jest typowe dla silników odrzutowych. Charakterystyka wskaźnika liczby cząstek stałych wykazuje rozkład logarytmiczno-normalny o pojedynczym maksimum lokalnym. Na podstawie tej charakterystyki stwierdzono, że cząstki o średnicach przekraczających 100 nm praktycznie nie występują. Zwiększenie siły ciągu sprzyja formowaniu się cząstek stałych w trybie *soot mode*, wynikającego z procesów koagulacji oraz kondensacji siarki i węglowodorów aromatycznych. W efekcie powstaje niewielka liczba cząstek stałych o średnicach przekraczających 30 nm i 100 nm, co w niektórych przypadkach prowadzi do występowania rozkładów bimodalnych, a nawet trimodalnych (rys. 8b, d, f, h).

Analiza charakterystyk wskaźnika liczby cząstek stałych w zależności od ich średnicy wykazała, że zmiany średnicy charakterystycznej cząstek stałych powstałych w procesie nukleacji wraz ze zmianą siły ciągu były stosunkowo niewielkie. Wartości wskaźnika liczby cząstek stałych wykazywały tendencję malejącą wraz ze zwiększeniem siły ciągu silnika. W niektórych przypadkach, szczególnie przy poziomach 70% i 100% siły ciągu, zaobserwowano jednak zwiększenie intensywności procesu nukleacji. Średnica charakterystyczna tzw. *soot mode* pozostawała w dużej mierze niezmienna w funkcji siły ciągu, natomiast wartości wskaźnika liczby cząstek stałych rosły wraz ze zwiększeniem siły ciągu. Oznacza to, że większe obciążenie silnika sprzyja zwiększaniu emisji sadzy, mimo względnej stabilności rozmiaru cząstek stałych w tym zakresie.

Na podstawie analizy charakterystyk wskaźnika liczby cząstek stałych w zależności od ich rozmiaru stwierdzono, że udział paliwa ATJ-SPK w mieszaninie z paliwem konwencjonalnym ma znaczenie w kwestii emisji liczby cząstek stałych. Ograniczenie formowania się cząstek stałych stwierdzono w szczególności w przypadku paliwa z 30% udziałem ATJ-SPK, dla którego średnie zmniejszenie wartości EI_N wyniosło około 50% w porównaniu do paliwa referencyjnego. Dodatek paliwa alternatywnego ATJ-SPK nie wpłynął istotnie na średnice cząstek stałych w związku z czym wszystkie rozkłady wymiarowe mają zbliżony kształt.





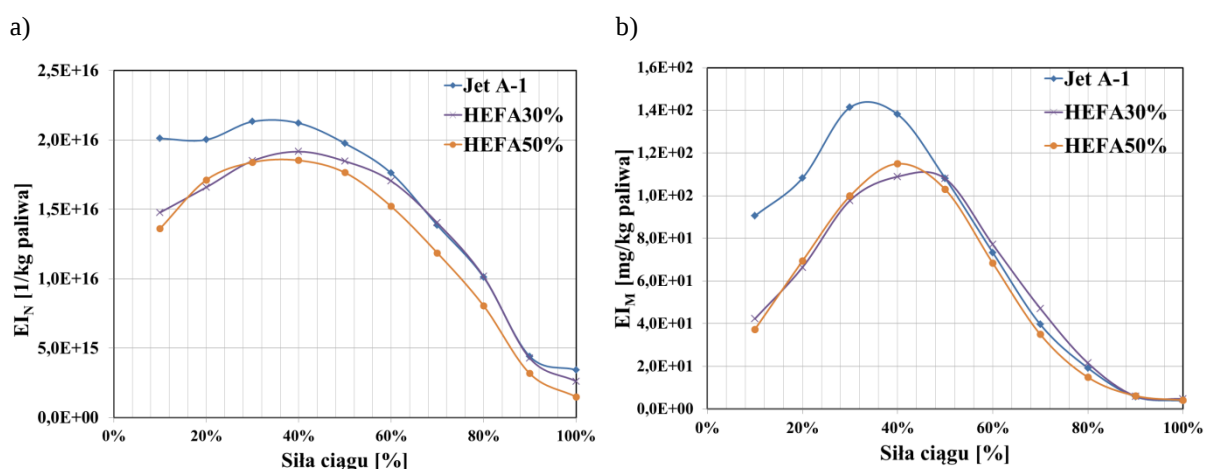
Rysunek 8. Charakterystyka wskaźnika liczby (EI_N) i objętości (EI_V) cząstek stałych w zależności od ich średnicy dla silnika zasilanego paliwami: Jet A-1 (a, b), ATJ5% (c, d), ATJ20% (e, f) i ATJ30% (g, h) [rys. 5 w A.3]

W publikacji A.4 przedstawiono analizy badań różnych mieszanin paliwa konwencjonalnego Jet A-1 i paliwa alternatywnego *HEFA-SPK* pod względem emisji cząstek stałych.

Metodyka badań: pomiary przeprowadzono na stanowisku silnikowym GTM 400, którego maksymalna siła ciągu wynosi 400 N. Badane paliwa były mieszaninami zawierającymi 30% objętości *HEFA-SPK* i 70% objętości Jet A-1 (oznaczone jako HEFA30%) oraz 50% objętości *HEFA-SPK* i 50% objętości Jet A-1 (oznaczone jako HEFA50%). Dodatkowe testy przeprowadzono na referencyjnym paliwie Jet A-1. Podstawowym surowcem wykorzystywanym w produkcji tego konkretnego paliwa *HEFA-SPK* był zużyty olej spożywczy. Zakres pomiarowy wynosił 10 punktów pomiarowych od 10% do 100% maksymalnej siły ciągu silnika, ze zmianą co 10%. Do pomiaru

stężenia liczbowego cząstek stałych w spalinach użyto analizatora *EEPS* 3090. Szczegółowa metodyka badań została przedstawiona w publikacji A.4.

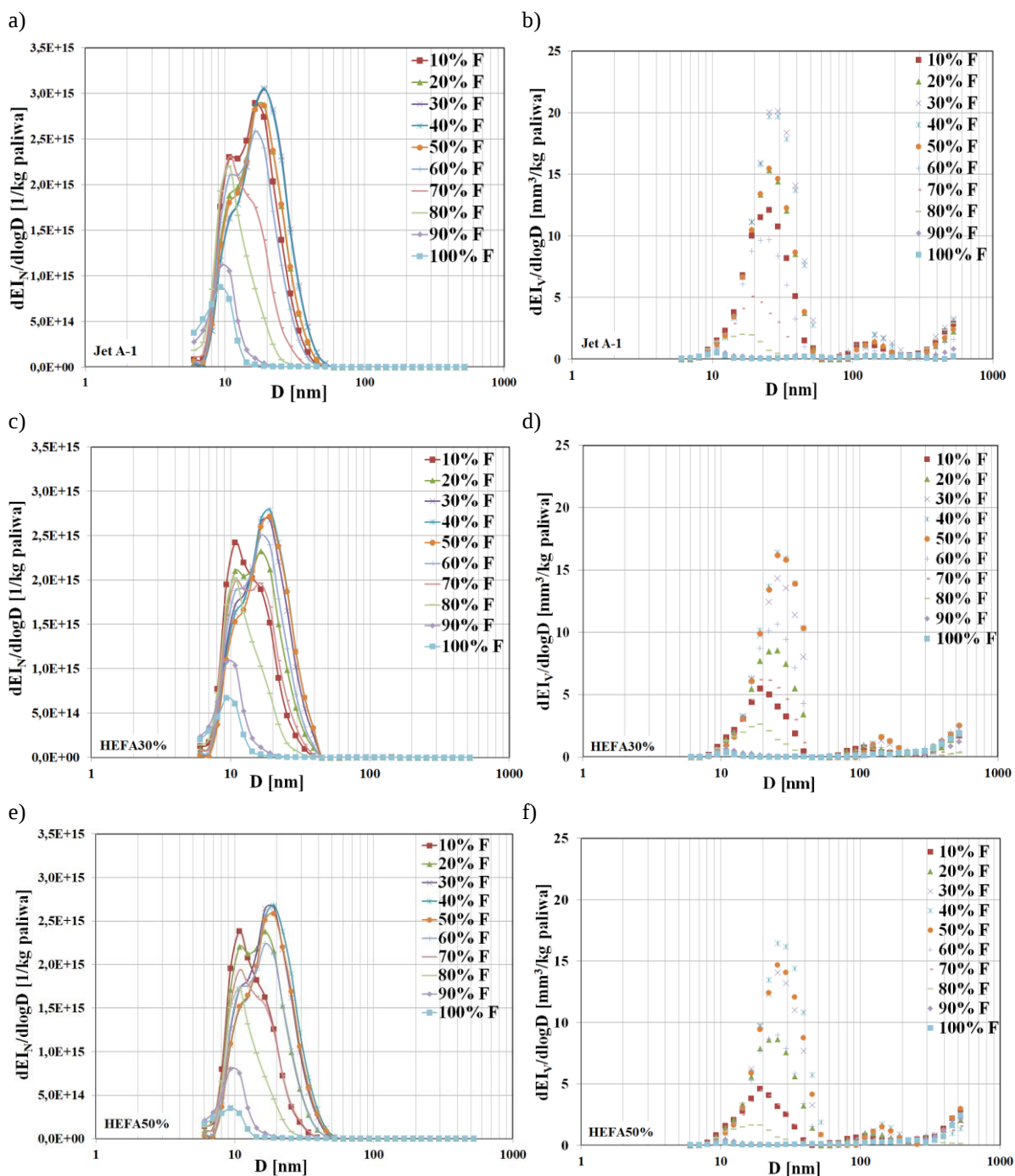
Charakterystyki wskaźnika liczby cząstek stałych w zależności od siły ciągu przedstawiono na rys. 9a. Dla całego zakresu pracy silnika największe wartości odnotowano dla konwencjonalnego paliwa lotniczego Jet A-1, z czego w dwóch punktach pracy silnika wartości EI_N dla Jet A-1 i HEFA30% były bardzo zbliżone: dla 70% (około $1,4 \cdot 10^{16}$ 1/kg) i 80% ($1,01 \cdot 10^{16}$ 1/kg) siły ciągu silnika. Paliwo HEFA50% wykazało najmniejsze wartości EI_N w prawie całym zakresie pracy silnika, z wyjątkiem 20% maksymalnej siły ciągu, gdy wartości EI_N były większe niż dla HEFA30%, ale nadal mniejsze niż dla Jet A-1. Maksymalna wartość EI_N dla paliwa Jet A-1 wystąpiła przy 30% siły ciągu silnika i była równa $2,13 \cdot 10^{16}$ 1/kg paliwa, a dla paliw HEFA30% i HEFA50% maksymalna wartość EI_N wystąpiła przy 40% siły ciągu i wynosiła odpowiednio $1,92 \cdot 10^{16}$ i $1,85 \cdot 10^{16}$ 1/kg paliwa. Przy maksymalnym obciążeniu silnika, paliwo HEFA50% wykazało znaczne zmniejszenie wartości EI_N ($1,53 \cdot 10^{15}$ 1/kg) w porównaniu do Jet A-1 ($3,44 \cdot 10^{15}$ 1/kg).



Rysunek 9. Charakterystyka wskaźnika liczby (a) i masy (b) cząstek stałych w zależności od siły ciągu silnika [rys. 1 i 2 w A.4]

Charakterystykę wskaźnika masy cząstek stałych (EI_M) przedstawiono na rys. 9b. W zakresie siły ciągu od 10% do 50% wartości maksymalnej zastosowanie mieszanin paliw HEFA-SPK spowodowało zmniejszenie wartości EI_M w porównaniu z paliwem Jet A-1. Przy średnich obciążeniach silnika (50–80%) wartości EI_M dla mieszaniny HEFA30% były nieznacznie wyższe niż dla Jet A-1, natomiast dla mieszaniny HEFA50% – niższe. W przypadku silnika zasilanego paliwem konwencjonalnym zaobserwowano zwiększenie wartości EI_M przy małych obciążeniach – od 90 mg/kg paliwa przy 10% do 141 mg/kg przy 30% – po czym następowało wyraźne zmniejszenie do 3,7 mg/kg przy maksymalnej sile ciągu. Dla mieszanin paliw alternatywnych maksymalne wartości EI_M wynosiły odpowiednio 109 mg/kg dla HEFA30% oraz 115 mg/kg dla HEFA50% przy obciążeniu silnika równym 40%, po czym zmniejszały się do 5 i 4 mg/kg odpowiednio przy 100% siły ciągu.

Na rys. 10 przedstawiono charakterystyki wskaźników liczby i objętości cząstek stałych w funkcji ich średnicy, uzyskane dla różnych nastaw siły ciągu silnika GTM 400. W całym zakresie pracy silnika oraz dla wszystkich analizowanych paliw dominującą frakcją stanowią cząstki powstające w procesie nukleacji. Dla większości punktów pomiarowych stwierdzono, że rozkłady wymiarowe liczby cząstek stałych przyjmują kształt logarytmiczno-normalny.



Rysunek 10. Charakterystyka wskaźnika liczby (EI_N) i objętości (EI_V) cząstek stałych w zależności od ich średnicy dla silnika zasilanego paliwami: Jet A-1 (a, b), HEFA30% (c, d) i HEFA50% (e, f) [rys. 3 w A.4]

Charakterystyki wskaźnika liczby cząstek stałych wskazują, że dla małych i średnich obciążeń silnika, większość emitowanych cząstek stałych mieści się w zakresie od 8 nm do 42 nm dla paliwa Jet A-1 i od 8 nm do 40 nm dla HEFA30% i HEFA50%. Dla 10% maksymalnej siły ciągu zaobserwowano wyraźne różnice w rozkładzie wymiarowym cząstek stałych między paliwem Jet A-1 a paliwem HEFA-SPK. W zakresie 10–50% maksymalnej siły ciągu średnica charakterystyczna dla paliwa Jet A-1 wynosiła ok 15 nm, natomiast dla mieszanin HEFA30% i HEFA50% odpowiednio 10 nm przy 10% oraz 19 nm przy 20–50% obciążenia silnika. Zwiększenie siły ciągu do wartości dużych i maksymalnej powodowało przesunięcie średnicy charakterystycznej rozkładu wymiarowego w kierunku mniejszych wartości oraz zmniejszenie liczby emitowanych cząstek stałych. W większości

punktów pomiarowych odnotowano zmniejszenie emisji liczby cząstek stałych wraz ze zwiększeniem siły ciągu dla wszystkich testowanych paliw. Dodatek paliwa HEFA-SPK do Jet A-1 skutkował istotnym ograniczeniem liczby cząstek stałych w całym zakresie pracy silnika.

Charakterystyki wskaźnika objętości cząstek stałych (EI_V) w funkcji ich średnicy dla wszystkich testowanych paliw wykazały jedynie niewielkie zmiany w zakresie cząstek stałych o średnicach przekraczających 100 nm. Cząstki te miały bardzo mały wpływ na całkowitą ich objętość, co wynika z ich małej liczby mimo stosunkowo dużych rozmiarów. W konsekwencji, przy pominięciu cząstek stałych o średnicy powyżej 100 nm, rozkład wskaźnika objętości cząstek stałych w zależności od średnicy ma charakter jednomodalny dla wszystkich badanych paliw. Charakterystyczna średnica cząstek stałych mieściła się w zakresie od 10 nm do 52 nm we wszystkich punktach pomiarowych. Począwszy od 70% siły ciągu, zwiększenie siły ciągu silnika powodowało istotne zmniejszenie wartości EI_V dla wszystkich analizowanych paliw.

Przeprowadzone analizy wykazały, że dodatek paliwa HEFA-SPK powoduje zmniejszenie emisji cząstek stałych w niemal całym zakresie pracy silnika. W celu porównania zmian między wskaźnikiem liczby cząstek stałych (EI_N) a wskaźnikiem masy cząstek stałych (EI_M), obliczono ich względne zmiany procentowe w odniesieniu do paliwa Jet A-1. Dodatkowo wyznaczono średnie wartości obu wskaźników dla poszczególnych rodzajów paliw w całym zakresie siły ciągu. Uzyskane wyniki zestawiono w tab. 2 i 3.

Tabela 2. Względna zmiana wskaźnika liczby cząstek stałych w stosunku do paliwa Jet A-1 [tab. 4 w A.4]

	10% F	20% F	30% F	40% F	50% F	60% F	70% F	80% F	90% F	100% F	Średnia
Jet A-1	$2,0 \cdot 10^{16}$	$2,0 \cdot 10^{16}$	$2,1E \cdot 10^{16}$	$2,1 \cdot 10^{16}$	$1,9 \cdot 10^{16}$	$1,8 \cdot 10^{16}$	$1,4 \cdot 10^{16}$	$1,0 \cdot 10^{16}$	$4,4 \cdot 10^{15}$	$3,4 \cdot 10^{15}$	-
HEFA30%	-27%	-17%	-13%	-10%	-6%	-3%	+1%	0%	-3%	-24%	-10%
HEFA50%	-32%	-14%	-14%	-13%	-11%	-14%	-14%	-20%	-28%	-56%	-22%

Tabela 3. Względna zmiana wskaźnika masy cząstek stałych w stosunku do paliwa Jet A-1 [tab. 5 w A.4]

	10% F	20% F	30% F	40% F	50% F	60% F	70% F	80% F	90% F	100% F	Średnia
Jet A-1	90,47	108,18	141,31	138,10	108,12	73,33	39,60	19,20	5,74	3,85	-
HEFA30%	-53%	-39%	-31%	-21%	0%	+5%	+19%	+12%	+5%	+23%	-8%
HEFA50%	-59%	-36%	-29%	-17%	-5%	-7%	-12%	-23%	+8%	+7%	-17%

Średnie zmniejszenie wartości wskaźnika liczby cząstek stałych (EI_N) dla paliwa z 30% udziałem HEFA-SPK wyniosło około 10% w porównaniu z Jet A-1, natomiast dla paliwa z 50% udziałem HEFA-SPK – około 22%. Największe zmniejszenie wartości EI_N odnotowano dla paliwa HEFA50% przy maksymalnej sile ciągu, gdzie liczba emitowanych cząstek stałych była mniejsza o około 56% w porównaniu z paliwem konwencjonalnym.

W przypadku wskaźnika masy cząstek stałych (EI_M), średnie zmniejszenie wartości dla paliwa HEFA30% wyniosło około 8%, a dla paliwa HEFA50% – około 17% w porównaniu z Jet A-1 w całym zakresie pracy silnika. W przypadku obciążenia silnika równym 60% wartości maksymalnej i wyższym, paliwo HEFA30% powodowało niewielkie zwiększenie wartości EI_M względem Jet A-1, natomiast przy mniejszych wartościach obciążenia (poniżej 50% maksymalnej siły ciągu) obserwowano wyraźne jego zmniejszenie. Emisja cząstek stałych z silnika zasilanego paliwem HEFA50% była niższa niż dla Jet A-1 w niemal całym zakresie pracy silnika – od 59% do 5% – z wyjątkiem 90% i 100% maksymalnej siły ciągu, przy których wartości EI_M były odpowiednio o 7% i 8% wyższe.

Przeprowadzone badania miały na celu kompleksową analizę wpływu zrównoważonych paliw lotniczych na emisję cząstek stałych z silnika odrzutowego. Analizy wyników pomiarów pozwoliły sformułować następujące wnioski o wpływie paliwa *ATJ-SPK* i *HEFA-SPK* na emisję cząstek stałych:

- zastosowanie paliwa *ATJ-SPK* 50% zmniejszyło stężenie masy cząstek stałych o około 50% w porównaniu z paliwem konwencjonalnym Jet A-1,
- zastosowanie paliwa *ATJ-SPK* 30% zmniejszyło wartość wskaźnika liczby cząstek stałych o około 50% w porównaniu do Jet A-1,
- dodatek paliwa *ATJ-SPK* do Jet A-1 nie wpłynął znacząco na rozmiary cząstek stałych, w związku z czym rozkłady wymiarowe cząstek stałych były zbliżone,
- dodatek paliwa *HEFA-SPK* zmniejszył emisję cząstek stałych w niemal całym zakresie pracy silnika, w porównaniu do Jet A-1,
- średnie zmniejszenie wartości wskaźnika liczby cząstek stałych dla *HEFA-SPK* 50% wynosiło 22%, a wskaźnika masy cząstek stałych – około 17% względem Jet A-1.

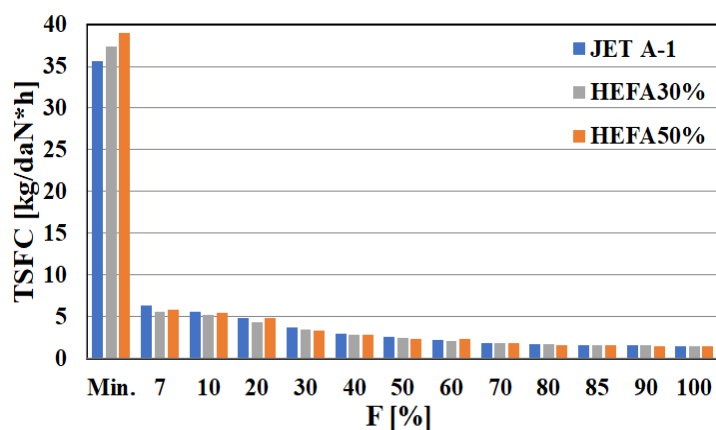
Badania wykazały znaczne ograniczenie występowania cząstek stałych pod względem liczbowym i masowym dzięki zastosowaniu zrównoważonych paliw lotniczych. Zgodnie z literaturą, zmniejszenie emisji cząstek stałych wynika ze składu chemicznego i właściwości fizykochemicznych paliw alternatywnych. Certyfikowane paliwa zrównoważone nie zawierają węglowodorów aromatycznych lub zawierają ich śladowe ilości – poniżej 0,5%. Węglowodory aromatyczne są jednym z głównych prekursorów powstawania cząstek stałych w spalinach silników odrzutowych, więc nawet niewielki udział *SAF* w mieszaniu z paliwem konwencjonalnym skutkuje zmniejszeniem emisji cząstek stałych. Zgodnie z normą *ASTM D7566*, zawartość węglowodorów aromatycznych w mieszaniu paliwa *SAF* i Jet A-1 powinna wynosić od 8% do 25%. Odpowiednia zawartość węglowodorów aromatycznych jest kluczowa ze względów eksploatacyjnych, ponieważ ich obecność wpływa na odpowiednie działanie elastomerów stosowanych w uszczelnieniach silnika. Z tego też względu, obecnie *SAF* nie jest dopuszczone do stosowania w silnikach bez dodatku paliwa konwencjonalnego. Dodanie paliwa *ATJ-SPK* lub *HEFA-SPK* do paliwa konwencjonalnego wpływa bezpośrednio na zmniejszenie zawartości aromatów w paliwie, w wyniku czego emisja cząstek stałych ulega zmniejszeniu, na co wskazują przedstawione wyniki badań. Innym parametrem wpływającym na emisję cząstek stałych jest stosunek wodoru do węgla (*H/C*) w paliwie. Zrównoważone paliwa lotnicze, szczególnie testowane *ATJ-SPK* i *HEFA-SPK*, mają większy stosunek wodoru do węgla niż paliwo Jet A-1. Zdolność do tworzenia się sadzy zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości wodoru w paliwie, zatem zastosowanie paliw alternatywnych w mieszaniu z Jet A-1 skutkowało zmniejszeniem emisji cząstek stałych. Emisja cząstek stałych jest także spowodowana nieefektywnym rozpyleniem i parowaniem paliwa w komorze spalania, na co z kolei wpływa gęstość paliwa i napięcie powierzchniowe. Zatem właściwości fizykochemiczne paliwa mają bezpośredni wpływ na tworzenie się cząstek stałych podczas procesu spalania w silniku odrzutowym. Zmniejszona emisja cząstek stałych (zarówno pod względem liczby jak i masy) w przeprowadzonych badaniach paliw *HEFA-SPK* i *ATJ-SPK*, wskazuje na korzystne parametry fizykochemiczne paliwa z dodatkiem *SAF*, które wpływają na proces spalania i ograniczają tworzenie się cząstek stałych w komorze spalania. Zmniejszona liczba pierwotnych cząstek stałych powstałych w komorze spalania może wpływać także na ograniczenie tworzenia się cząstek stałych wtórnych, jednak ten obszar wymaga dalszych badań eksperymentalnych.

3.2. Parametry silnikowe – publikacja A.5

W publikacji A.5 przedstawiono wyniki badań parametrów pracy silnika odrzutowego GTM 400 zasilanego mieszaninami paliwa Jet A-1 i HEFA-SPK o zróżnicowanym udziale zrównoważonego paliwa lotniczego. Celem badań było określenie wpływu dodatku paliwa alternatywnego do paliwa konwencjonalnego na charakterystyki eksploatacyjne jednostki napędowej, w tym wartości siły ciągu, temperatury gazów wylotowych oraz zużycia paliwa.

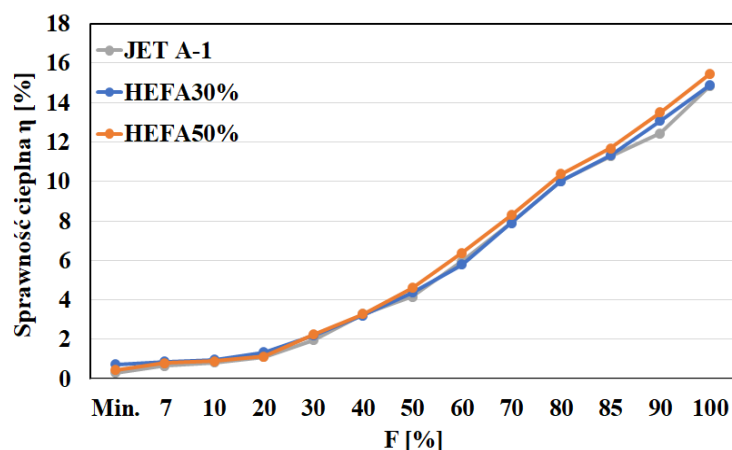
Metodyka badań: badania zostały przeprowadzone na stanowisku silnikowym GTM 400, generującym siłę ciągu w zakresie od 15 N do 400 N. Badaniom poddano mieszaniny paliw Jet A-1 i HEFA-SPK w udziałach objętościowych równych 30% (HEFA30%) i 50% (HEFA50%). Paliwem referencyjnym było konwencjonalne paliwo lotnicze Jet A-1. Surowcem używanym do produkcji tego konkretnego paliwa HEFA-SPK był głównie zużyty olej spożywczy. Pomiary przeprowadzono w 12 punktach pracy: 7, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 85, 90 i 100% maksymalnej siły ciągu (F). Punkty pomiarowe obejmowały między innymi nastawy silnika ujęte w cyklu *LTO* (*Landing and Take off*). W trakcie badań rejestrowano następujące parametry: ciąg statyczny [N], przepływ paliwa FF [ml/min], ciśnienie za sprężarką p_2 [hPa], temperaturę gazów za komorą spalania T_3 [°C], masowe natężenie przepływu powietrza TMF [kg/s], prędkość obrotową RPM [1/min], temperaturę gazów przed turbiną TIT [°C] i temperaturę gazów wylotowych EGT [°C]. Na podstawie zarejestrowanych parametrów wyznaczono jednostkowe zużycie paliwa, ciąg jednostkowy, moc silnika i sprawność cieplną silnika. Szczegółowa metodyka badań została przedstawiona w publikacji A.5.

Jednostkowe zużycie paliwa $TSFC$ (*Thrust-specific Fuel Consumption*) wyznaczone dla poszczególnych punktów pracy silnika przedstawiono na rys. 11. Podczas pracy silnika przy minimalnym obciążeniu, najmniejszą wartość $TSFC$ zaobserwowano dla paliwa Jet A-1, która była o około 8% mniejsza niż w przypadku HEFA50% i o 3% mniejsza niż HEFA30%. W pozostałych punktach pracy, jednostkowe zużycie paliwa było nieznacznie większe w przypadku wykorzystania paliwa Jet A-1.



Rysunek 11. Charakterystyka jednostkowego zużycia paliwa w zależności od obciążenia silnika [rys. 2 w A.5]

Wartości sprawności cieplnej wyznaczone dla poszczególnych punktów pracy silnika zasilanego w trzech wariantach paliwowych przedstawiono na rys. 12. Stwierdzono, że sprawność cieplna we wszystkich badanych punktach pracy silnika (z wyjątkiem obciążenia silnika do 20% F) była nieznacznie większa w przypadku paliwa HEFA50% (o 0,1–0,4%) w porównaniu z pozostałymi paliwami. Niewielkie różnice w sprawności cieplnej świadczą o podobnym przebiegu procesu spalania wszystkich badanych paliw. Dowodzi to, że stosowanie mieszaniny paliwa konwencjonalnego i HEFA-SPK nie pogarsza parametrów eksploatacyjnych silnika. Dalsza szczegółowa analiza pozostałych parametrów eksploatacyjnych silnika została opisana w publikacji A.5.



Rysunek 12. Charakterystyka sprawności cieplnej w zależności od obciążenia silnika [rys. 5 w A.5]

Przeprowadzone badania miały na celu ocenę wpływu zrównoważonego paliwa lotniczego na parametry eksploatacyjne silnika. Uzyskane wyniki porównano z dostępną literaturą. Szczegółowa analiza zebranych danych przedstawionych w publikacji A.5 pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- zastosowanie paliwa *HEFA-SPK* spowodowało poprawę jednostkowego zużycia paliwa o około 3% w całym zakresie pracy silnika,
- stwierdzono zwiększenie ciągu właściwego o 2–9%, w zależności od punktu pracy silnika zasilanego mieszanką paliw *HEFA-SPK*,
- temperatura spalin w różnych punktach pracy silnika pozostała zbliżona niezależnie od rodzaju stosowanego paliwa,
- ciąg statyczny zwiększył się o 2,7%–11,2% dla silnika zasilanego paliwem *HEFA-SPK*.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że stosowanie zrównoważonych paliw lotniczych nie wpływa znacząco na poprawę parametrów eksploatacyjnych silnika, a utrzymuje je na podobnym poziomie do paliwa konwencjonalnego. Potwierdza to możliwość stosowania paliwa Jet A-1 z paliwami SAF w odpowiednich proporcjach określonych w normie ASTM D7566, bez konieczności zmian konstrukcyjnych silnika. Certyfikowane zrównoważone paliwa lotnicze w połączeniu z paliwem konwencjonalnym są paliwami typu *drop-in*, co potwierdziły również przeprowadzone badania i analizy parametrów eksploatacyjnych silnika.

4. MODELOWANIE PARAMETRÓW EMISJI CZĄSTEK STAŁYCH – publikacja A.6

4.1. Metodyka opracowania modeli emisji cząstek stałych

Publikacja A.6 dotyczy modelowania parametrów emisji cząstek stałych, w oparciu o wartości parametrów fizykochemicznych paliwa i parametry eksploatacyjne silnika. Modele opracowano na podstawie danych uzyskanych podczas własnych testów na laboratoryjnym silniku odrzutowym GTM 400, zasilanym mieszankami paliwa HEFA-SPK i Jet A-1 [A.4 i A.5]. Badanymi paliwami były mieszanki zawierające paliwo HEFA-SPK i Jet A-1 w różnych proporcjach odpowiednio: 10%, 20%, 30%, 40%, i 50% udziału paliwa HEFA-SPK w mieszaninie z naftą lotniczą. Dla każdej z mieszanek paliwowych wyznaczono parametry fizykochemiczne, takie jak: gęstość, zawartość wodoru i węgla, napięcie powierzchniowe, przewodność, lepkość kinematyczną, temperaturę zapłonu i temperaturę destylacji 50% paliwa.

Wybrany podejściem modelowania jest regresja liniowa wieloraka krokowa wsteczna. Wpływ właściwości paliwa i parametrów pracy silnika można opisać następująco:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon, \quad (2)$$

gdzie:

Y – zmienna objaśniana,

$x_1, x_2, \dots, x_k$ – zmienne objaśniające,

ε – składnik losowy.

Regresję liniową wieloraką można opisać następująco:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon, \quad (3)$$

gdzie:

β_0 – stała wartość,

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ – parametry strukturalne modelu.

Kryteria modelowania dla regresji liniowej wielorakiej są ukierunkowane na maksymalizację wartości współczynnika determinacji (R^2) przy jednoczesnym zapewnieniu, że każdy uwzględniony parametr utrzymuje poziom istotności poniżej 5%, co stanowi wartość $p < 0,05$. Wybrana regresja liniowa wieloraka jest regresją krokową wsteczną, którą osiąga się poprzez włączenie testowania istotności statystycznej, w którym zmienne objaśniające są usuwane po każdej iteracji. Modelowanie rozpoczyna się od wszystkich możliwych zmiennych w modelu, a następnie zmienne o wartości p większej niż ustalona są usuwane z modelu. Po usunięciu zmiennych nieistotnych, istotność statystyczna jest ponownie testowana po każdej odrzuconej zmiennej. Proces jest kontynuowany do chwili, gdy wszystkie wybrane zmienne staną się statystycznie istotne.

Wszystkie zmienne objaśniające i zmienne objaśniane zostały poddane standaryzacji, aby lepiej porównać parametry strukturalne i wpływ parametrów wejściowych na zmienną objaśnianą. W procesie walidacji modelu, wartości zmiennych objaśniających wprowadzane są po przeprowadzeniu standaryzacji. Po podstawieniu w modelu wartości bezwymiarowych dla danej zmiennej objaśniającej (jako wynik przeprowadzonej standaryzacji danego parametru), możliwe jest obliczenie zmiennej objaśnianej. Otrzymany wynik również jest w postaci bezwymiarowej i konieczne jest przeprowadzenie re-standaryzacji, wykorzystując podane przy danym modelu wartości średniej i odchylenia standardowego dla modelowanego wskaźnika. Wynik końcowy, otrzymany po procesie re-standaryzacji otrzymywany jest w jednostce wskazanej przy danym wskaźniku emisji. Re-standaryzację można przeprowadzić w następujący sposób:

$$X = Z\sigma + \mu, \quad (4)$$

gdzie:

X – wartość rzeczywista,

Z – wartość standaryzowana,

σ – odchylenie standardowe wartości rzeczywistej,

μ – średnia wartość wartości rzeczywistej.

Parametry fizykochemiczne mieszanin paliwowych oraz parametry eksploatacyjne silnika GTM 400 zasilanego mieszankami HEFA-SPK i Jet A-1 zostały uwzględnione przy konstruowaniu modelu. Do budowy modelu wykorzystano 80% dostępnych danych, natomiast pozostałe 20% losowo wybranych danych przeznaczono na jego walidację. Każdy opracowany model analizowano pod kątem wykorzystania 18 parametrów (tab. 4) jako zmiennych objaśniających. Dla wszystkich zmiennych obliczono współczynniki inflacji wariancji *VIF* (*Variance Inflation Factor*), umożliwiające ocenę współliniowości pomiędzy zmiennymi wejściowymi. Ostatecznie w modelach uwzględniono parametry o wartości *VIF* poniżej 5: masowe natężenie przepływu powietrza (*TMF*), temperaturę spalin za komorą spalania (T_3), gęstość paliwa (ρ), napięcie powierzchniowe (γ) oraz temperaturę zapłonu (*FP*). Po uzyskaniu modeli, w których wszystkie współczynniki regresji cechowały się istotnością statystyczną ($p < 0,05$), a wartość testu F–Snedecora dla całego modelu również spełniała ten warunek, przeprowadzono analizę normalności rozkładu reszt z wykorzystaniem testu Shapiro–Wilka. W przypadkach, gdy nie było podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu, realizowano etap walidacji modelu. Do walidacji zastosowano punkty pomiarowe nieuwzględnione w procesie jego budowy (20% danych).

Tabela 4. Analizowane zmienne objaśniające wykorzystane do opracowania modeli parametrów emisji cząstek stałych [tab. 3 w A.6]

Parametr	Symbol	Parametr	Symbol
Temperatura powietrza za sprężarką [°C]	T_2	Przepływ paliwa [ml/min]	<i>FF</i>
Temperatura gazów za komorą spalania [°C]	T_3	Lepkość kinematyczna [mm ² /s]	ν
Ciśnienie za sprężarką [hPa]	p_2	Gęstość paliwa [g/L]	ρ
Temperatura otoczenia [°C]	<i>AIRt</i>	Temperatura zapłonu [°C]	<i>FP</i>
Temperatura gazów przed turbiną [°C]	<i>TIT</i>	Napięcie powierzchniowe [mN/m]	γ
Temperatura spalin na dyszy wylotowej [°C]	<i>EGT</i>	Konduktywność [pS/m]	σ_k
Masowe natężenie przepływu powietrza [kg/s]	<i>TMF</i>	Temp. destylacji 50% [°C]	<i>T50</i>
Siła ciągu [%]	<i>F</i>	Zawartość wodoru [%]	<i>H</i>
Prędkość obrotowa [1/min]	<i>RPM</i>	Zawartość węgla [%]	<i>C</i>

Końcowe modele opracowano dla: natężenia liczby cząstek stałych (E_{PN}) [1/s], natężenia masy cząstek stałych (E_{PM}) [g/h], wskaźnika liczby cząstek stałych (W_{PN}) [1/kg] oraz wskaźnika masy cząstek stałych (W_{PM}) [mg/kg]. Dodatkowo opracowano modele opisujące parametry rozkładu wymiarowego cząstek stałych, tj. średnią średnicę geometryczną *GMD* (*Geometric Mean Diameter*) oraz geometryczne odchylenie standardowe *GSD* (*Geometric Standard Deviation*).

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum n \ln D}{N} \right], \quad (5)$$

$$GSD = \exp \left[\frac{\sum n [\ln D - \ln GMD]^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

gdzie:

n – stężenie liczbowe cząstek stałych o określonej średnicy,

N – stężenie całkowite,

D – średnica cząstki stałej.

Oznaczenia n i N są właściwe dla stężenia liczbowego, a przy stężeniu masowym zastępują je odpowiednio m i M .

4.2. Wyniki modelowania

4.2.1. Modele wskaźników emisji cząstek stałych

Parametry modelu natężenia liczby cząstek stałych E_{PN} [1/s] przedstawiono w tab. 5. Współczynnik determinacji R^2 wynosi 0,924, a błąd standardowy oszacowania – 0,265. Na podstawie statystyki F, przy poziomie istotności $p < 0,05$, potwierdzono istotność modelu i jego dobre dopasowanie do danych eksperymentalnych. Średnia wartość wskaźnika E_{PN} wyznaczona empirycznie na stanowisku pomiarowym wynosi $8,1 \cdot 10^{13}$ 1/s, natomiast odchylenie standardowe – $2,7 \cdot 10^{13}$. Wynik testu Shapiro–Wilka ($W = 0,981$; $p = 0,624$) wskazuje na brak podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu reszt, co oznacza, że model spełnia założenia poprawności statystycznej i może być stosowany zarówno do prognozowania, jak i analizy wpływu zmiennych wejściowych na liczbę cząstek stałych.

Największy wpływ na wartość natężenia liczby cząstek stałych wykazuje temperatura za komorą spalania T_3 , której zwiększenie o jedno odchylenie standardowe powoduje zmniejszenie natężenia liczby cząstek stałych o 1,22645 odchylenia standardowego. Drugim istotnym parametrem jest masowe natężenie przepływu powietrza TMF , dla którego zwiększenie o jedno odchylenie standardowe skutkuje zwiększeniem natężenia liczby cząstek stałych E_{PN} o 0,5609 odchylenia standardowego. Zwiększenie temperatury zapłonu FP o jedno odchylenie standardowe prowadzi do obniżenia natężenia liczby cząstek stałych E_{PN} o 0,27369 odchylenia standardowego, natomiast zwiększenie gęstości paliwa ρ o jedno odchylenie standardowe, powoduje niewielkie zwiększenie natężenia liczby cząstek stałych – o 0,09266 odchylenia standardowego.

Tabela 5. Wyniki modelowania natężenia liczby cząstek stałych E_{PN} [tab. 7 w A.6]

Zmienna	Współczynnik	Błąd standardowy	Statystyka t	p-value	VIF
TMF	0,56090	0,054	10,332	0,000	1,978
T_3	-1,22645	0,056	-21,968	0,000	2,097
FP	-0,27369	0,042	-6,442	0,000	1,107
ρ	0,09266	0,039	2,391	0,021	1,023

Zmienne w modelu są wprowadzane po standaryzacji i mają postać bezwymiarową. Model standaryzowanego E_{PN} przyjmuje postać:

$$E_{PN} [-] = 0,56090 \cdot TMF - 1,22645 \cdot T_3 - 0,27369 \cdot FP + 0,09266 \cdot \rho \pm 0,265. \quad (7)$$

Po obliczeniu modelu standaryzowanego należy przeprowadzić re-standaryzację uzyskanego wyniku. Re-standaryzacja uzyskanego wyniku dla E_{PN} przyjmuje postać:

$$E_{PN} \left[\frac{1}{s} \right] = E_{PN} [-] \cdot 2,7 \cdot 10^{13} + 8,1 \cdot 10^{13}. \quad (8)$$

Dla wskaźnika liczby cząstek stałych W_{PN} [1/kg], wyniki modelu przedstawiono w tab. 6. Współczynnik determinacji R^2 dla tego modelu wynosi 0,76, a błąd standardowy wynosi 0,158. Na podstawie statystyki F, przy poziomie istotności $p < 0,05$, potwierdzono istotność modelu i jego dobre dopasowanie do danych eksperymentalnych. Wartość średnia wyznaczona empirycznie na stanowisku pomiarowym dla W_{PN} wynosi $1,4 \cdot 10^{16}$ 1/kg, a odchylenie standardowe wynosi $6,2 \cdot 10^{15}$.

Dla testu Shapiro-Wilka (0,980) wartość p-value wynosi 0,582, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu reszt.

Największy wpływ na wskaźnik liczby cząstek stałych W_{PN} ma temperatura gazów za komorą spalania T_3 , której wzrost o 1 odchylenie standardowe zmniejsza wartość wskaźnika liczby cząstek stałych W_{PN} o 0,64699 odchylenia standardowego. Również zwiększenie całkowitego masowego przepływu powietrza TMF i temperatury zapłonu FP o 1 odchylenie standardowe, zmniejsza wskaźnik liczby cząstek stałych W_{PN} odpowiednio o 0,43692 i 0,20541 odchylenia standardowego.

Tabela 6. Wyniki modelowania wskaźnika liczby cząstek stałych W_{PN} [tab. 8 w A.6]

Zmienna	Współczynnik	Błąd standardowy	Statystyka t	p-value	VIF
TMF	-0,43692	0,032	-13,566	0,000	1,962
T_3	-0,64699	0,033	-19,654	0,000	2,054
FP	-0,20541	0,025	-8,115	0,000	1,107

Zmienne w modelu są wprowadzane po standaryzacji i mają postać bezwymiarową. Model standaryzowanego W_{PN} przyjmuje postać:

$$W_{PN}[-] = -0,43692 \cdot TMF - 0,64699 \cdot T_3 - 0,20541 \cdot FP \pm 0,158. \quad (9)$$

Re-standaryzacja uzyskanego wyniku dla W_{PN} :

$$W_{PN} \left[\frac{1}{kg} \right] = W_{PN} [-] \cdot 6,2 \cdot 10^{15} + 1,4 \cdot 10^{16}. \quad (10)$$

Dla natężenia emisji cząstek stałych E_{PM} [g/h] wyniki modelu przedstawiono w tab. 7. Współczynnik determinacji R^2 dla tego modelu jest równy 0,64, a błąd standardowy wynosi 0,594. Na podstawie statystyki F, przy poziomie istotności $p < 0,05$, potwierdzono istotność modelu i jego dobre dopasowanie do danych eksperymentalnych. Wartość średnia wyznaczona empirycznie na stanowisku pomiarowym dla E_{PM} wynosi 1,179 g/h, a odchylenie standardowe wynosi 0,774. Dla testu Shapiro-Wilka (0,956) wartość p wynosi 0,07, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu reszt.

Największy wpływ na natężenie emisji cząstek stałych E_{PM} ma, podobnie jak w przypadku natężenia liczby cząstek stałych, temperatura gazów za komorą spalania T_3 , której zwiększenie o 1 odchylenie standardowe zmniejsza natężenie emisji cząstek stałych E_{PM} o 0,79027 odchylenia standardowego. Zwiększenie wartości napięcia powierzchniowego γ o 1 odchylenie standardowe zmniejsza natężenie emisji cząstek stałych E_{PM} o 0,19804 odchylenia standardowego.

Tabela 7. Wyniki modelowania natężenia emisji cząstek stałych E_{PM} [tab. 9 w A.6]

Zmienna	Współczynnik	Błąd standardowy	Statystyka t	p-value	VIF
T_3	-0,79027	0,087	-9,036	0,000	1,029
γ	-0,19804	0,092	-2,159	0,036	1,029

Zmienne w modelu są wprowadzane po standaryzacji i mają postać bezwymiarową. Model standaryzowanego E_{PM} przyjmuje postać:

$$E_{PM}[-] = -0,79027 \cdot T_3 - 0,19804 \cdot \gamma \pm 0,594. \quad (11)$$

Re-standaryzacja uzyskanego wyniku dla E_{PM} :

$$E_{PM} \left[\frac{g}{h} \right] = E_{PM} [-] \cdot 0,774 + 1,179. \quad (12)$$

Dla wskaźnika masy cząstek stałych W_{PM} [mg/kg] wyniki modelu przedstawiono w tab. 8. Współczynnik determinacji R^2 jest równy 0,842, a błąd standardowy dla modelu wynosi 0,411. Na podstawie statystyki F, przy poziomie istotności $p < 0,05$, potwierdzono istotność modelu i jego

dobrze dopasowanie do danych eksperymentalnych. Wartość średnia wyznaczona empirycznie na stanowisku pomiarowym dla W_{PM} wynosi 64,30 mg/kg, a odchylenie standardowe wynosi 43,56. Dla testu Shapiro-Wilka (0,978) wartość p wynosi 0,483, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu reszt.

Największy wpływ na wskaźnik masy cząstek stałych W_{PM} ma temperatura za komorą spalania T_3 , której zwiększenie o 1 odchylenie standardowe zmniejsza wskaźnik masy cząstek stałych W_{PM} o 0,71454 odchylenia standardowego. Również zwiększenie o 1 odchylenie standardowe temperatury zapłonu FP i masowego natężenia przepływu powietrza TMF zmniejsza wskaźnik masy cząstek stałych W_{PM} odpowiednio o 0,24587 i 0,28223 odchylenia standardowego.

Tabela 8. Wyniki modelowania wskaźnika masy cząstek stałych W_{PM} [tab. 10 w A.6]

Zmienna	Współczynnik	Błąd standardowy	Statystyka t	p-value	VIF
TMF	-0,28223	0,084	-3,377	0,002	1,962
T_3	-0,71454	0,085	-8,364	0,000	2,054
FP	-0,24587	0,066	-3,743	0,001	1,106

Zmienne w modelu są wprowadzane po standaryzacji i mają postać bezwymiarową. Model standaryzowanego W_{PM} przyjmuje postać:

$$W_{PM}[-] = -0,28223 \cdot TMF - 0,71454 \cdot T_3 - 0,24587 \cdot FP \pm 0,411. \quad (13)$$

Re-standaryzacja uzyskanego wyniku dla W_{PM} :

$$W_{PM} \left[\frac{mg}{kg} \right] = W_{PM} [-] \cdot 43,56 + 64,30. \quad (14)$$

4.2.2. Modele parametrów rozkładu wymiarowego cząstek stałych

Aby opisać rozkład wielkości cząstek stałych dla stężenia liczbowego i masowego, obliczono średnią średnicę geometryczną i geometryczne odchylenie standardowe. Parametry modelu dla średniej średnicy geometrycznej dla stężenia liczbowego cząstek stałych ($GMDn$ [nm]) przedstawiono w tab. 9. Współczynnik determinacji R^2 jest równy 0,941 a błąd standardowy dla modelu wynosi 0,251. Na podstawie statystyki F, przy poziomie istotności $p < 0,05$, potwierdzono istotność modelu i jego dobre dopasowanie do danych eksperymentalnych. Wartość średnia wyznaczona empirycznie na stanowisku pomiarowym dla $GMDn$ wynosi 14,33 nm, a odchylenie standardowe wynosi 3,01. Dla testu Shapiro-Wilka (0,986) wartość p wynosi 0,838, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu reszt.

Największy wpływ na średnią średnicę geometryczną stężenia liczbowego $GMDn$ ma temperatura gazów za komorą spalania T_3 , której zwiększenie o 1 odchylenie standardowe zmniejsza $GMDn$ o 0,79589 odchylenia standardowego. Zwiększenie masowego natężenia przepływu powietrza TMF i temperatury zapłonu FP , zmniejsza średnią średnicę geometryczną $GMDn$ odpowiednio o 0,25631 i 0,15736 odchylenia standardowego.

Tabela 9. Wyniki modelowania średniej średnicy geometrycznej dla stężenia liczbowego cząstek stałych $GMDn$ [tab. 11 w A.6]

Zmienna	Współczynnik	Błąd standardowy	Statystyka t	p-value	VIF
TMF	-0,25631	0,051	-5,015	0,000	2,054
T_3	-0,79589	0,052	-15,235	0,000	1,962
FP	-0,15736	0,040	-3,917	0,000	1,107

Zmienne w modelu są wprowadzane po standaryzacji i mają postać bezwymiarową. Model standaryzowanego $GMDn$ przyjmuje postać:

$$GMDn [-] = -0,25631 \cdot TMF - 0,79589 \cdot T_3 - 0,15736 \cdot FP \pm 0,251. \quad (15)$$

Re-standaryzacja uzyskanego wyniku dla $GMDn$:

$$GMDn [nm] = GMDn [-] \cdot 3,01 + 14,33. \quad (16)$$

Dla geometrycznego odchylenia standardowego dla stężenia liczbowego cząstek stałych ($GSDn$ [nm]) wyniki modelu przedstawiono w tab. 10. Parametry tego modelu to: współczynnik determinacji R^2 równy 0,951 a błąd standardowy wynosi 0,238. Na podstawie statystyki F, przy poziomie istotności $p < 0,05$, potwierdzono istotność modelu i jego dobre dopasowanie do danych eksperymentalnych. Wartość średnia wyznaczona empirycznie na stanowisku pomiarowym dla $GSDn$ wynosi 1,411, a odchylenie standardowe wynosi 0,065. Dla testu Shapiro-Wilka (0,965) wartość p wynosi 0,168, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu reszt.

Największy wpływ na geometryczne odchylenie standardowe stężenia liczbowego $GSDn$ ma temperatura gazów za komorą spalania T_3 , której zwiększenie o 1 odchylenie standardowe zmniejsza $GSDn$ o 0,72348 odchylenia standardowego, a zwiększenie o 1 odchylenia standardowego masowego natężenia przepływu powietrza TMF i temperatury zapłonu FP , również zmniejsza geometryczne odchylenie standardowe stężenia liczbowego $GSDn$ o 0,39232 i 0,13504 odchylenia standardowego.

Tabela 10. Wyniki modelowania geometrycznego odchylenia standardowego dla stężenia liczbowego cząstek stałych $GSDn$ [tab. 12 w A.6]

Zmienna	Współczynnik	Błąd standardowy	Statystyka t	p-value	VIF
TMF	-0,39232	0,048	-8,108	0,000	2,054
T_3	-0,72348	0,049	14,629	0,000	1,962
FP	-0,13504	0,038	-3,551	0,001	1,107

Zmienne w modelu są wprowadzane po standaryzacji i mają postać bezwymiarową. Model standaryzowanego $GSDn$ przyjmuje postać:

$$GSDn [-] = -0,39232 \cdot TMF - 0,72348 \cdot T_3 - 0,13504 \cdot FP \pm 0,238. \quad (17)$$

Re-standaryzacja uzyskanego wyniku dla $GSDn$:

$$GSDn [nm] = GSDn [-] \cdot 0,065 + 1,411. \quad (18)$$

Dla średniej średnicy geometrycznej dla stężenia masowego cząstek stałych ($GMDm$ [nm]) wyniki modelu przedstawiono w tab. 11. Parametry tego modelu są następujące: współczynnik determinacji R^2 równy 0,635 a błąd standardowy równy 0,479. Na podstawie statystyki F, przy poziomie istotności $p < 0,05$, potwierdzono istotność modelu i jego dobre dopasowanie do danych eksperymentalnych. Wartość średnia wyznaczona empirycznie na stanowisku pomiarowym dla $GMDm$ wynosi 23,542, a odchylenie standardowe wynosi 2,765. Dla testu Shapiro-Wilka (0,962) wartość p wynosi 0,122, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu reszt. W przypadku wcześniej wybranych zmiennych objaśniających, o małej wartości VIF, dla parametru $GMDm$ żadna z wybranych zmiennych nie miała wartości $p < 0,05$. Tak więc do opracowania modelu wzięto pod uwagę inne zmienne objaśniające, w zależności od wartości p-value współczynników. Pomimo, że współczynnik determinacji R^2 i inne testy statystyczne są na zadowalającym poziomie, VIF dla nowych wybranych zmiennych jest duży, co sugeruje, że multikolinearność może być duża i trudno jest prawidłowo zinterpretować uzyskane wyniki. Z tego względu model działa poprawnie tylko w przypadku predykcji $GMDm$.

Tabela 11. Wyniki modelowania średniej średnicy geometrycznej dla stężenia masowego cząstek stałych *GMDm* [tab.13 w A.6]

Zmienna	Współczynnik	Błąd standardowy	Statystyka t	p-value	VIF
T_2	-6,6787	0,840	-7,952	0,000	3,47
FF	7,0266	0,905	7,761	0,000	>10
T_3	-0,7052	0,130	-5,444	0,000	>10

Zmienne w modelu są wprowadzane po standaryzacji i mają postać bezwymiarową. Model standaryzowanego *GMDm* przyjmuje postać:

$$GMDm [-] = -6,6787 \cdot T_2 + 7,0266 \cdot FF - 0,7052 \cdot T_3 \pm 0,479. \quad (19)$$

Re-standaryzacja uzyskanego wyniku dla *GMDm*:

$$GMDm [nm] = GMDm [-] \cdot 2,765 + 23,542. \quad (20)$$

Dla geometrycznego odchylenia standardowego dla stężenia masowego cząstek stałych (*GSDm* [nm]) wyniki modelu przedstawiono w tab. 12. Parametry tego modelu to: współczynnik determinacji R^2 równy 0,884, a błąd standardowy równy 0,356. Na podstawie statystyki F, przy poziomie istotności $p < 0,05$, potwierdzono istotność modelu i jego dobre dopasowanie do danych eksperymentalnych. Wartość średnia wyznaczona empirycznie na stanowisku pomiarowym dla *GSDm* wynosi 1,868, a odchylenie standardowe 0,57. Dla testu Shapiro-Wilka (0,954) wartość p wynosi 0,059, więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu reszt.

Największy wpływ na geometryczne odchylenie standardowe *GSDm* ma temperatura gazów za komorą spalania T_3 , której zwiększenie o 1 odchylenie standardowe zwiększa *GSDm* o 0,75891 odchylenia standardowego. Zwiększenie o 1 odchylenie standardowe masowego natężenia przepływu powietrza *TMF* i napięcia powierzchniowego γ zwiększa geometryczne odchylenie standardowe *GSDm* o 0,27038 i 0,12455 odchylenia standardowego.

Tabela 12. Wyniki modelowania geometrycznego odchylenia standardowego dla stężenia masowego cząstek stałych *GSDm* [tab.14 w A.6]

Zmienna	Współczynnik	Błąd standardowy	Statystyka t	p-value	VIF
<i>TMF</i>	0,27038	0,072	3,769	0,000	1,979
T_3	0,75891	0,073	10,444	0,000	1,925
γ	0,12455	0,056	2,226	0,031	1,066

Zmienne w modelu są wprowadzane po standaryzacji i mają postać bezwymiarową. Model standaryzowanego *GSDm* przyjmuje postać:

$$GSDm [-] = 0,27038 \cdot TMF + 0,75891 \cdot T_3 + 0,12455 \cdot \gamma \pm 0,356. \quad (21)$$

Re-standaryzacja uzyskanego wyniku dla *GSDm*:

$$GSDm [nm] = GSDm [-] \cdot 0,57 + 1,868. \quad (22)$$

4.3. Walidacja opracowanych modeli emisji cząstek stałych

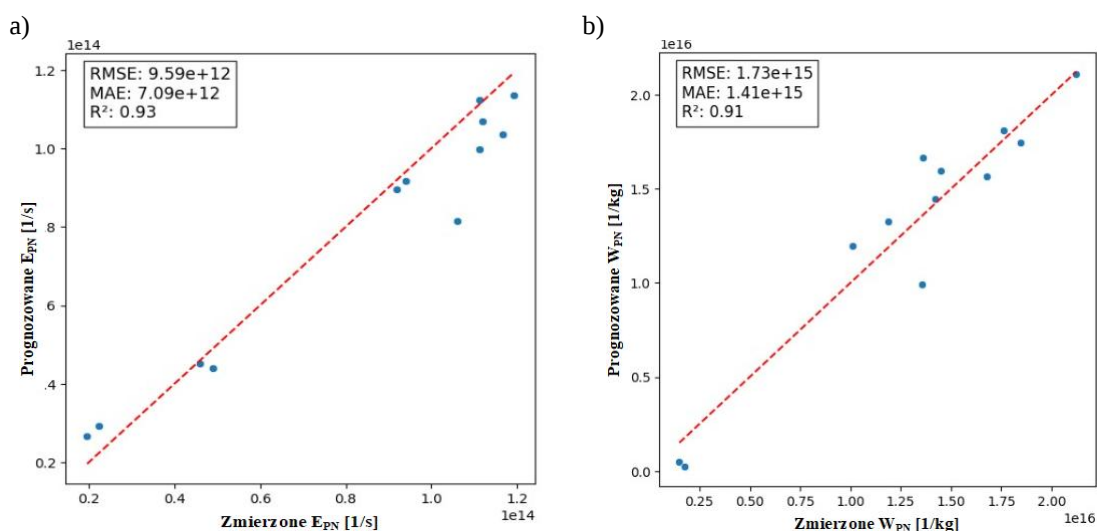
Opracowane modele, oparte na charakterystyce pracy silnika GTM 400 zasilanego sześcioma mieszankami paliwowymi, umożliwiają identyfikację kluczowych parametrów fizykochemicznych paliwa oraz parametrów eksploatacyjnych silnika wpływających na parametry emisji cząstek stałych. Parametry statystyczne uzyskanych modeli zestawiono w tab. 13, w której przedstawiono również wyniki walidacji modeli: średni błąd kwadratowy *RMSE* (*Root Mean Square Error*), określający

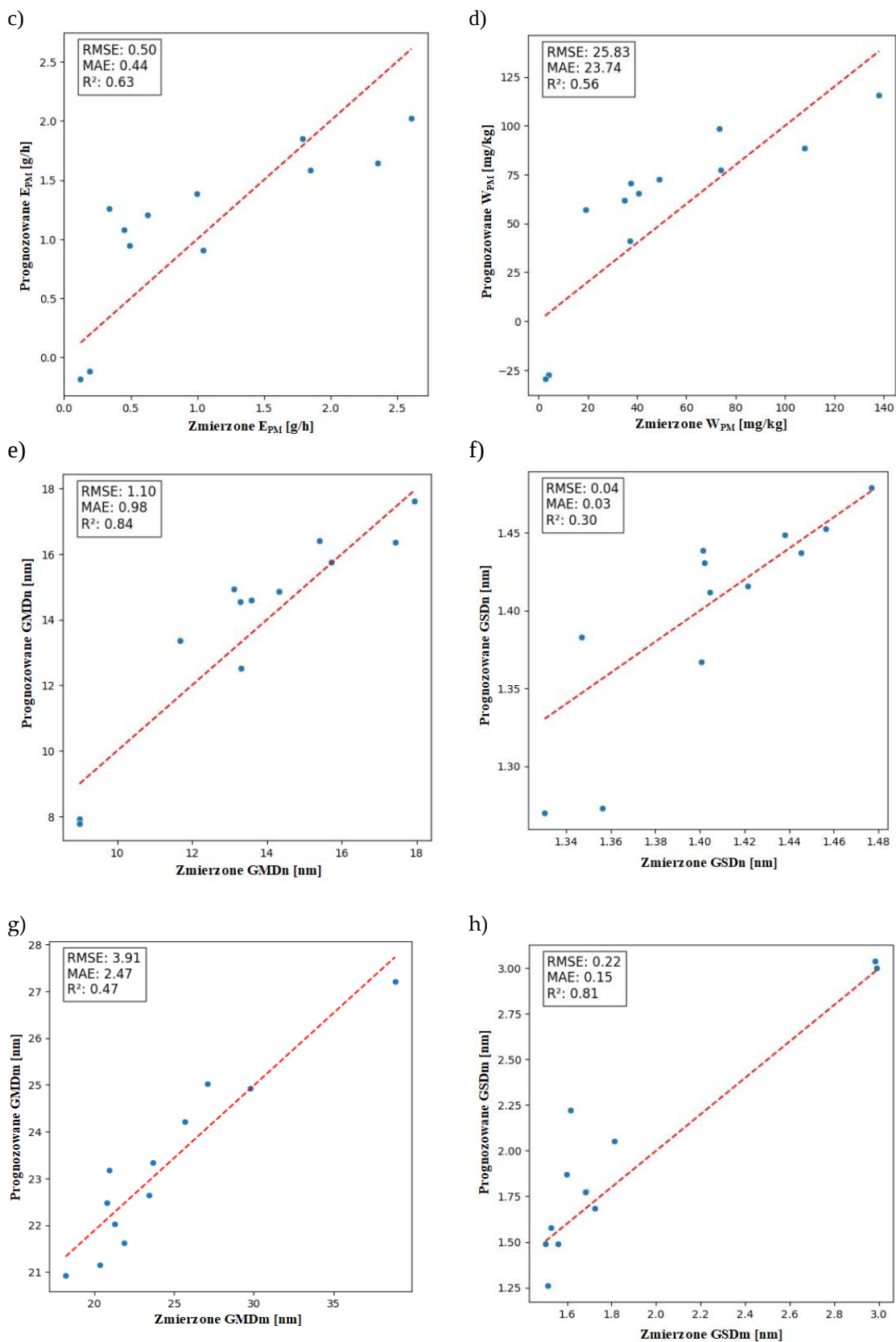
średnią oczekiwaną różnicę pomiędzy wartościami przewidywanymi a rzeczywistymi, oraz współczynnik determinacji R^2 , określający proporcję wariancji zmiennej objaśnianej wyjaśnianą przez model na podstawie zmiennych objaśniających.

Tabela 13. Parametry opracowanych modeli emisji cząstek stałych oraz wartości parametrów walidacji modeli [tab. 15 w A.6]

	E_{PN}	W_{PN}	E_{PM}	W_{PM}	$GMDn$	$GSDn$	$GMDm$	$GSDm$
Model bazujący na 80% danych								
R^2	0,924	0,976	0,641	0,842	0,941	0,951	0,635	0,884
Istotność F	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Liczba zmiennych objaśniających	4	3	2	3	3	3	3	3
Walidacja na 20% danych								
R^2	0,93	0,91	0,63	0,56	0,84	0,30	0,47	0,81
RMSE	$9,59 \cdot 10^{12}$	$1,73 \cdot 10^{15}$	0,50	25,83	1,10	0,03	3,91	0,22

W celu porównania zmierzonych i prognozowanych parametrów emisji sporządzono wykresy przedstawione na rys. 13. Na wykresach przedstawiono również parametry walidacji modeli: RMSE, R^2 oraz średni błąd bezwzględny MAE (*Mean Absolute Error*), będący średnią wartością błędu bezwzględnego między wartościami prognozowanymi a zmierzonymi. Dla czterech opracowanych modeli (E_{PN} , W_{PN} , $GMDn$ i $GSDm$) współczynnik determinacji R^2 dla walidacji jest duży i zbliżony do 1, ale dla E_{PM} , W_{PM} , $GSDn$ i $GMDm$ dopasowanie jest mniejsze. Może to sugerować, że model liniowy używany w tym badaniu nie jest odpowiedni dla tych konkretnych parametrów, szczególnie dla wskaźników emisji dotyczących masy cząstek stałych. Parametrami modelowania, które sugerują nieliniową zależność między zmiennymi, są na przykład rozkład reszt, który w tych konkretnych przypadkach nie jest losowo rozproszony wokół zera, ale jest ułożony w określonych wzorcach, co może sugerować nieliniowość modelu [15]. Pozostałe parametry są dobrze opisane przez modele liniowe z bardzo dobrym dopasowaniem między wartościami zmierzonymi i przewidywanymi. Jednym z ograniczeń zastosowanej metody modelowania może być liczba parametrów wejściowych, która może mieć wpływ na dopasowanie opracowanych modeli do danych walidacyjnych.





Rysunek 13. Wykresy zmierzonych i prognozowanych parametrów emisji: (a) E_{PN} , (b) W_{PN} , (c) E_{PM} , (d) W_{PM} , (e) $GMDn$, (f) $GSDn$, (g) $GMDm$ i (h) $GSDm$ [rys. 2 w A.6]

5. WNIOSKI I KIERUNKI DALSZYCH PRAC

5.1. Podsumowanie

Praca dotyczy kompleksowej analizy zrównoważonych paliw lotniczych oraz modelowania parametrów emisji cząstek stałych emitowanych przez silniki lotnicze na podstawie parametrów pracy silnika i parametrów fizykochemicznych paliwa. W pierwszym etapie pracy dokonano analizy zrównoważonych paliw lotniczych pod względem stosowanych surowców, procesów produkcji, procesu certyfikacji, oceny cyklu życia paliw oraz emisji cząstek stałych z silników zasilanych paliwami zrównoważonymi. W ramach pracy dokonano również pomiarów emisji cząstek stałych z silnika GTM 120 i DGEN 380 zasilanych różnymi mieszankami paliwa Jet A-1 i *ATJ-SPK* oraz z silnika GTM 400 zasilanego mieszankami paliwa Jet A-1 i *HEFA-SPK*. Przeprowadzone badania pozwoliły dokonać analizy parametrów emisji cząstek stałych w zależności od nastawy silnika, a także od udziału paliwa alternatywnego w mieszaninie z paliwem konwencjonalnym.

Druga część pracy obejmowała badania i analizę emisji cząstek stałych i parametrów rozkładu wymiarowego cząstek stałych oraz parametrów eksploatacyjnych silnika odrzutowego zasilanego różnymi mieszankami paliwa Jet A-1 i *HEFA-SPK*. Uzyskane parametry posłużyły do opracowania modeli emisji cząstek stałych i parametrów rozkładu wymiarowego cząstek stałych emitowanych przez silnik odrzutowy GTM 400.

Ostatni etap pracy obejmował proces modelowania emisji cząstek stałych w zależności od właściwości fizykochemicznych paliwa i parametrów eksploatacyjnych silnika. W procesie modelowania wykorzystano regresję liniową wieloraką krokową wsteczną. Opracowane modele zostały poddane walidacji z wykorzystaniem 20% danych, które nie zostały użyte w procesie modelowania. Przeprowadzone analizy pozwoliły określić wpływ poszczególnych parametrów eksploatacyjnych silnika i fizykochemicznych paliwa na parametry emisji cząstek stałych oraz na oszacowanie wartości modelowanych parametrów emisji, bez konieczności wykonywania pomiarów. Opracowane modele obejmowały także parametry rozkładu wymiarowego cząstek stałych dla stężenia liczbowego i masowego, takie jak średnia średnica geometryczna i geometryczne odchylenie standardowe. Modele zostały opracowane w oparciu o 6 różnych mieszanek paliwa Jet A-1 i *HEFA-SPK* zasilających silnik GTM 400. W związku z czym, opracowane modele są prawidłowe jedynie dla konkretnej jednostki napędowej.

Wykonane prace wyróżniają się kompleksowym podejściem do zagadnienia zrównoważonych paliw lotniczych, ze szczególnym uwzględnieniem emisji cząstek stałych z silników zasilanych tymi paliwami. W ramach pracy połączono przegląd literaturowy dotyczący produkcji i stosowania zrównoważonych paliw lotniczych, badania emisyjne cząstek stałych, badania parametrów eksploatacyjnych silnika zasilanego paliwem zrównoważonym oraz modelowanie parametrów emisji cząstek stałych w zależności od właściwości fizykochemicznych paliwa i parametrów eksploatacyjnych silnika. Sformułowane wnioski powstałe na podstawie przeprowadzonych badań odnoszą się do procesów dotyczących laboratoryjnych silników odrzutowych zasilanych paliwami zrównoważonymi, dlatego uogólnione mogą odnosić się do eksploatacji innych paliw zrównoważonych na silnikach pełnowymiarowych.

5.2. Wnioski końcowe

Certyfikowane zrównoważone paliwa lotnicze są bezpieczne w eksploatacji w silnikach lotniczych i nie wymagają zmian konstrukcyjnych jednostki napędowej czy infrastruktury paliwowej. Ważnym aspektem stosowania paliw zrównoważonych, jest również znaczne zmniejszenie emisji cząstek stałych w porównaniu do paliw konwencjonalnych, zarówno pod względem liczbowym jak i masowym, co zostało udowodnione empirycznie w przedstawionych publikacjach.

W ramach niniejszej pracy, zrównoważone paliwa lotnicze zostały przebadane pod względem wpływu na parametry eksploatacyjne silnika oraz parametry emisyjne cząstek stałych, w porównaniu do paliw konwencjonalnych. W znacznej części punktów pomiarowych, zrównoważone paliwa lotnicze charakteryzują się mniejszą emisją cząstek stałych i pozwalają osiągnąć wymierne korzyści ekologiczne. Zrealizowane badania pozwalają scharakteryzować i określić dalszy rozwój zrównoważonych paliw lotniczych w aspekcie ograniczania wpływu lotnictwa na środowisko. Dalszy rozwój zrównoważonych paliw lotniczych powinien się opierać m.in. na optymalizacji składu chemicznego paliwa i jego właściwości fizykochemicznych, w taki sposób, by przy zachowaniu odpowiednich parametrów silnikowych, w jak największym stopniu zmniejszyć emisję cząstek stałych.

Najważniejsze wnioski zebrane na podstawie przeprowadzonych badań podzielono na:

- ogólne,
- szczegółowe,
- metodyczne.

Wnioski ogólne

Zrealizowano cel i zakres pracy, a na podstawie analizy całości pracy sformułowano wnioski ogólne:

- stosowanie paliwa *HEFA-SPK* oraz *ATJ-SPK* w silniku odrzutowym ogranicza stężenie cząstek stałych pod względem liczbowym i masowym, w porównaniu do paliwa konwencjonalnego,
- możliwe jest modelowanie wskaźników emisji cząstek stałych w zależności od właściwości fizykochemicznych paliwa i parametrów eksploatacyjnych silnika,
- opracowane modele pozwalają określić jak zmieniają się parametry emisji cząstek stałych w zależności od konkretnych parametrów fizykochemicznych paliwa i parametrów eksploatacyjnych silnika.

Wnioski szczegółowe

Na podstawie badań emisji cząstek stałych silnika odrzutowego zasilanego paliwem zrównoważonym, stwierdzono, że:

- wraz ze zwiększaniem udziału paliwa *ATJ-SPK* w mieszaninie z paliwem Jet A-1 zasilającego silnik GTM 120, zakres cząstek stałych, które dominowały w rozkładzie wymiarowym zmieniał się w kierunku mniejszych średnic cząstek stałych,
- wartość wskaźnika liczby cząstek stałych dla paliw zasilających silnik DGEN 380 była najmniejsza dla mieszaniny zawierającej najwięcej dodatku *ATJ-SPK* (30%) spośród badanych paliw,
- zastosowanie paliwa *ATJ-SPK* w silniku DGEN 380 spowodowało ograniczenie emisji cząstek stałych w całym badanym zakresie pracy silnika,
- dodatek paliwa *ATJ-SPK* do paliwa Jet A-1 spalane w silniku DGEN 380 nie wpłynął znacząco na średnice cząstek stałych, w związku z czym wszystkie rozkłady wymiarowe cząstek stałych miały zbliżony kształt,

- zastosowanie paliwa *HEFA-SPK* w silniku GTM 400, spowodowało ograniczenie emisji cząstek stałych w niemal całym zakresie pracy silnika, w porównaniu do paliwa Jet A-1,
- średnie zmniejszenie wartości wskaźnika liczby cząstek stałych dla paliwa z 30% udziałem *HEFA-SPK* wynosiło około 10%, a z 50% udziałem *HEFA-SPK* – około 22%, w porównaniu do Jet A-1,
- przy maksymalnej sile ciągu silnika GTM 400, największe zmniejszenie wartości wskaźnika liczby cząstek stałych, wynoszące około 56% względem Jet A-1, uzyskano zasilając silnik mieszaniną paliwa Jet A-1 z 50% udziałem *HEFA-SPK*,
- średnie zmniejszenie wartości wskaźnika masy cząstek stałych dla paliwa z 30% udziałem *HEFA-SPK* wynosiło około 8%, natomiast z 50% udziałem paliwa *HEFA-SPK* – około 17%, w porównaniu do paliwa Jet A-1,
- na podstawie analizy wartości parametrów pracy silnika odrzutowego zasilanego paliwem zrównoważonym, stwierdzono, że zastosowanie paliwa *HEFA-SPK* w silniku GTM 400 nie wpływa znacząco na parametry eksploatacyjne silnika, wykazując zbliżone wartości do paliwa konwencjonalnego. Świadczy to o kompatybilności mieszaniny paliwa *HEFA-SPK* i Jet A-1 z silnikiem odrzutowym.

Na podstawie opracowanych modeli stwierdzono, że:

- opracowane modele pozwalają określić jak zmienia się emisja cząstek stałych w zależności od konkretnych parametrów fizykochemicznych paliwa i eksploatacyjnych silnika,
- największy wpływ na natężenie liczby cząstek stałych i wskaźnik liczby cząstek stałych ma temperatura za komorą spalania oraz masowe natężenie przepływu powietrza, a największy wpływ na natężenie emisji cząstek stałych ma temperatura za komorą spalania oraz napięcie powierzchniowe paliwa. Z kolei największy wpływ na wskaźnik masy cząstek stałych ma ponownie temperatura za komorą spalania i temperatura zapłonu paliwa oraz masowe natężenie przepływu powietrza,
- w przypadku parametrów rozkładu wymiarowego cząstek stałych, największy wpływ na zmianę wartości średniej średnicy geometrycznej i geometrycznego odchylenia standardowego dla stężenia liczbowego ma temperatura gazów za komorą spalania, masowe natężenie przepływu powietrza i temperatura zapłonu paliwa. Z kolei dla średniej średnicy geometrycznej dla stężenia masowego, opracowany model może być stosowany jedynie do predykcji wartości parametru, ze względu na brak podstaw do odrzucenia hipotezy o normalności rozkładu reszt. W przypadku geometrycznego odchylenia standardowego dla stężenia masowego cząstek stałych, największy wpływ na wartość modelowanego parametru ma temperatura za komorą spalania,
- dla czterech opracowanych modeli współczynnik determinacji R^2 dla walidacji jest większy niż 0,8, co świadczy o dobrym dopasowaniu modeli, a dla pozostałych modeli współczynnik ten przyjmuje mniejsze wartości, co może wskazywać na konieczność modelowania tych parametrów innymi metodami.

Wnioski metodyczne

Na podstawie wniosków ogólnych i szczegółowych sformułowano wnioski metodyczne:

- opracowano metodykę modelowania emisji cząstek stałych z silników odrzutowych w zależności od właściwości fizykochemicznych paliwa i parametrów pracy silnika,
- szerszy zestaw parametrów fizykochemicznych paliwa, w szczególności dotyczących zawartości związków aromatycznych, umożliwiłby bardziej precyzyjne modelowanie emisji cząstek stałych.

5.3. Kierunki dalszych prac

Dalsze prace powinny koncentrować się na następujących obszarach:

- a) rozszerzenie modelowania wskaźników emisji cząstek stałych o modele nieliniowe, które mogą pozwolić na dokładniejszy opis badanych zjawisk,
- b) rozszerzenie badań o inne zrównoważone paliwa lotnicze, przez co zwiększy się uniwersalność opracowanych modeli,
- c) rozszerzenie badań o inne jednostki napędowe, co również zwiększy uniwersalność opracowanych modeli,
- d) rozszerzenie modelowania parametrów emisji o inne związki szkodliwe zawarte w spalinach,
- e) precyzyjna analiza innych zrównoważonych paliw lotniczych pod względem emisji cząstek stałych, a także parametrów rozkładu cząstek stałych,
- f) opracowanie modeli wskaźników emisji cząstek stałych i związków gazowych na podstawie właściwości chemicznych paliwa.

ZAŁĄCZNIKI

Załącznik A Publikacje

A.1 Publikacja 1

Kurzawska-Pietrowicz P. i Jasiński R. *A Review of Alternative Aviation Fuels*. *Energies*, 2024, tom 17, numer 16, strony 3890-1-3890-22, (IF: 3,0; MNiSW: 140).
DOI: 10.3390/en17163890

Abstract: One of the most promising mid-term solutions for reducing GHG emissions from the aviation sector is alternative aviation fuels, especially sustainable aviation fuels (SAFs). Regulations imposed by the Fit for 55 package to use 38% of SAFs until 2050 require a comprehensive analysis of SAFs and production pathway development with increased blending limits of alternative fuel. Within this review, a summary of key aspects of alternative aviation fuels is presented. The review contains a description of the certification process and certified production pathways with an analysis of feedstocks used for SAF production. SAF emissions also have been analyzed based on available research. SAFs reduce particulate matter emissions significantly, even by 70%, compared to fossil fuels. The emission of gaseous exhaust compounds, such as carbon monoxide, unburned hydrocarbons and nitrogen oxides, also is discussed. Alternative aviation fuels have a lower LCA compared to conventional aviation fuel and the LCAs of specific feedstocks are presented.

A.2 Publikacja 2

Kurzawska-Pietrowicz P. i Jasiński R. Overview of Sustainable Aviation Fuels with Emission Characteristic and Particles Emission of the Turbine Engine Fueled ATJ Blends with Different Percentages of ATJ Fuel. *Energies*, 2021, tom 14, numer 7, strony 1858-1-1858-18, (IF: 3,252; MNiSW: 140).

DOI: 10.3390/en14071858

Abstract: The following article focuses on sustainable aviation fuels, which include first and second generation biofuels and other non-biomass fuels that meet most of environmental, operational and physicochemical requirements. Several of the requirements for sustainable aviation fuels are discussed in this article. The main focus was on researching the alcohol-to-jet (ATJ) alternative fuel. The tests covered the emission of harmful gaseous compounds with the Semtech DS analyzer, as well as the number and mass concentration of particles of three fuels: reference fuel Jet A-1, a mixture of Jet A-1 and 30% of ATJ fuel, and mixture of Jet A-1 and 50% of ATJ fuel. The number concentration of particles allowed us to calculate, inter alia, the corresponding particle number index and particle mass index. The analysis of the results made it possible to determine the effect of the content of alternative fuel in a mixture with conventional fuel on the emission of harmful exhaust compounds and the concentration of particles. One of the main conclusion is that by using a 50% blend of ATJ and Jet A-1, the total number and mass of particulate matter at high engine loads can be reduced by almost 18% and 53%, respectively, relative to pure Jet A-1 fuel.

A.3 Pubilkacja 3

Jasiński R., **Kurzawska-Pietrowicz P.** i Przysowa R. Characterization of Particle Emissions from a DGEN 380 Small Turbofan Fueled with ATJ Blends. *Energies*, 2021, tom 14, numer 12, strony 3368-1-3368-12, (IF: 3,252; MNiSW: 140).

DOI: 10.3390/en14123368

Abstract: The fine particulate matter (PM) emitted from jet aircraft poses a serious threat to the environment and human health which can be mitigated by using biofuels. This paper aims to quantify PM emissions from a small turbofan fueled with the alcohol to jet (ATJ) synthetic kerosene and its various blends (5%, 20%, and 30% of ATJ) with Jet A-1 fuel. Emissions from a turbofan engine (DGEN 380) with a high bypass ratio, applicable in small private jets, were studied. Among the four fuels tested, the PM-number emission index (EI_N) was the lowest for the ATJ 30% blend. EI_N for ATJ 30% dropped from 1.1×10^{17} to 4.7×10^{16} particles/kg of fuel. Burning alternative fuel blends reduced the particle mass emissions over the entire range of fuel flow by at least 117 mg/kg of fuel. The particles formed in the nucleation mechanism dominate PM emission, which is characteristic of jet engines. Thus, number-based particle size distributions (PSDs) exhibit a single mode log-normal distribution. The highest values of EI_N were found for Jet A-1 neat compared to other fuels. The use of the ATJ additive did not cause significant changes in the size of the particles from nucleation mode. However, a magnitude reduction of nucleation mode was found with the increase in the ATJ ratio.

A.4 Pubilkacja 4

Kurzawska-Pietrowicz P. i Jasiński R. Characterization of Particle Emissions from GTM 400 Fueled with HEFA-SPK Blends. *Energies*, 2025, tom 18, numer 11, strony 2696-1-2696-11, (IF: 3,0; MNiSW: 140).

DOI: 10.3390/en18112696

Abstract: As aviation is a rapidly growing sector, many actions must be taken to significantly reduce the emission of harmful gases such as CO₂, CO, HC, NO_x, and particulate matter (PM). One accessible solution is the use of drop-in sustainable aviation fuels (SAFs), which do not require any changes in the engine or infrastructure construction. The aim of this research was to analyze changes in non-volatile particulate matter (nvPM) emissions for SAF blends compared to Jet A-1 using a miniature jet engine, as there is still limited research on particulate matter emissions from miniature engines, especially for SAFs. This study focuses on non-volatile particle emissions from HEFA-SPK fuel, with comprehensive analyses of particle number and particulate mass-emission indices, as well as number based and volume-based particle-size distribution (PSD). The tests were conducted on the miniature GTM 400 engine, which was specially designed for SAF testing. The tested fuels were 30/70%v and 50/50%v blends of HEFA-SPK/Jet A-1, as well as neat Jet A-1 as a reference fuel. The results showed that the use of 50%v HEFA-SPK can reduce non-volatile particulate mass emissions up to 59% at low engine loads, and non-volatile particle number emissions by up to 56% at maximum thrust, compared to Jet A-1.

A.5 Publikacja 5

Kurzawska-Pietrowicz P., Szrama S., Jasiński R. i Siedlecki M. Evaluation of Jet Engine Performance Parameters Fueled with Sustainable Aviation Fuel. *Combustion Engines*, 2025, in press, strony 3-10, (CiteScore: 1,7; MNiSW: 70).

DOI: 10.19206/CE-208774

Abstract: As sustainable aviation fuels are one of the mid and long term solutions for aviation emissions reduction, this article focuses on jet engine performance with different HEFA-SPK blends. Blends used in the tests were 30% and 50% of HEFA-SPK fuel, and also pure Jet A-1 as a conventional fuel. Experiments were carried out on a miniature jet engine, GTM 400, and the aim was to assess the impact of SAFs on operational parameters. Selected engine performance parameters were calculated and analyzed for the tested blends. One of the results is that the blend of HEFA-SPK led to an average improvement of thrust-specific fuel consumption by about 3%, and an increase of static thrust by 2.7–11.2%.

A.6 Pubilkacja 6

Kurzawska-Pietrowicz P., Jasiński R. i Maciejewska M. Modeling the Impact of Hydroprocessed Ester And Fatty Acids – Synthetic Paraffinic Kerosene Fuel Properties and Engine Performance on Emission Characteristics and Particle Size Distribution. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2025, (IF: 1,3; MNiSW: 100).

DOI: 10.12913/22998624/207916

Abstract: The physicochemical properties of fuels and engine performance parameters have a significant impact on emissions. This study focused on modeling the influence of fuel properties and engine parameters on CO₂, CO, NO_x, and PM emissions, with particular attention to particulate matter emission indices and particle size distribution parameters, such as geometric mean diameter and geometric standard deviation. The models were developed based on the experiments conducted on a miniature jet engine (GTM 400) fueled with HEFA-SPK blends in various proportions. Multi-linear regression with data standardization was used for model development. The models identified which parameters have the greatest impact on specific emission indices and how variations in input parameters affect emission outcomes. Eighteen fuel properties and engine performance parameters were included in the model development, and all eleven resulting models showed good agreement with the measured data and were validated using separate test points. This research bridges a gap in the literature by modeling the impact of HEFA-SPK fuel properties on pollutant emissions in miniature jet engines, with an added focus on particle size distribution parameters. By evaluating alternative fuels, such as HEFA-SPK and their effect on emission characteristics, this study contributes to advancing sustainability in aviation propulsion systems.

Załącznik B Oświadczenia współautorów