

# XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2024

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

### Modelowanie komory spalania wielopaliwowego silnika turbinowego do zastosowania w układach hybrydowych

Marcin Dopieralski<sup>1</sup>, Filip Polak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instytut Pojazdów i Transportu, Wojskowa Akademia Techniczna  
email: marcin.dopieralski@student.wat.edu.pl, filip.polak@wat.edu.pl

**STRESZCZENIE:** W niniejszym artykule analizowano możliwość zastosowania wielopaliwowego silnika turbinowego jako źródło pierwotne w układach hybrydowych. Silniki turbinowe, dzięki swojej wysokiej efektywności oraz elastyczności w wykorzystaniu różnych rodzajów paliw, mogą odegrać kluczową rolę w integracji z systemami hybrydowymi, które łączą napęd elektryczny z tradycyjnymi źródłami energii. Zasilanie wielopaliwowe (ang. multipropellant) silników turbinowych odnosi się do zdolności silnika do spalania różnych rodzajów paliw takich jak np. oleje, gazy w tym wodór i gaz ziemny, a nawet mieszaniny tych paliw. Takie silniki są elastyczne pod względem źródeł paliwa, co pozwala na dostosowanie ich do różnych wymagań i warunków dostępności konkretnego rodzaju paliwa. W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących optymalizacji procesów spalania w kontekście różnorodności paliw, takich jak biopaliwa, wodór oraz paliwa syntetyczne, co przyczynia się do zmniejszenia śladu węglowego i emisji zanieczyszczeń. Szczególną uwagę zwrócono na aspekty techniczne, ekonomiczne oraz ekologiczne, które mogą wpłynąć na szerokie zastosowanie tej technologii w przyszłości. Dodatkowo omówiono zalety i wyzwania związane z implementacją tego rodzaju technologii w praktyce.

**SŁOWA KLUCZOWE:** silnik turbinowy, silnik wielopaliwowy, wodór, gaz ziemny

#### 1. Wstęp

Zasilanie wielopaliwowe (ang. multipropellant) silników turbinowych odnosi się do zdolności silnika do spalania różnych rodzajów paliw. Kluczowe aspekty badań porównują wydajność silników turbinowych zasilanych paliwami alternatywnymi w stosunku do paliw konwencjonalnych. Analizowane są parametry takie jak moc, moment obrotowy i sprawność termodynamiczna. Przykładowe testy wykazały, że biopaliwa mogą oferować podobną lub nawet lepszą wydajność w porównaniu do paliw konwencjonalnych, choć niektóre biopaliwa mogą wymagać modyfikacji wtryskiwaczy lub komory spalania. W kwestii ekonomiczności biopaliwa i paliwa syntetyczne mogą być droższe w produkcji, korzyści ekologiczne i potencjalne oszczędności w dłuższej perspektywie czasowej mogą uczynić je opłacalnymi.

Zastosowanie wielopaliwowego silnika turbinowego pozwala na korzystanie z różnych rodzajów paliw w zależności od dostępności, kosztów i wymagań operacyjnych. Silniki turbinowe znajdują szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach dzięki swojej wydajności, niezawodności i zdolności do pracy przy wysokich prędkościach obrotowych. W niektórych przypadkach, zwłaszcza w lotnictwie, zasilanie wielopaliwowe umożliwia przystosowanie silnika do różnych warunków atmosferycznych lub misji, co może być istotne w przypadku operacji wojskowych lub misji specjalistycznych.

#### 2. Problem badawczy

W artykule opisano procesy spalania zachodzące w komorze silników turbinowych. Dobierając m.in.

odpowiedni kształt komory spalania, wielkość dawki paliwa we wtryskiwaczu oraz dodatki chemiczne, można kontrolować proces spalania. Przedstawiono rodzaje spalania: dyfuzyjne oraz laminarne wraz z przykładami występowania. Następnie opisano powstawanie zanieczyszczeń oraz ich rodzaje. Porównano emisję NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, cząstek stałych przez turbiny gazowe oraz silniki tłokowe. Zaproponowano sposoby zmniejszenia emisji gazów min. poprzez przeorganizowanie aerodynamiki komory spalania, zwiększenie objętości strefy płomienia pierwotnego bądź też poprawa atomizacji paliwa.

W dalszej części opisano stanowisko badawcze użyte do badań symulacyjnych i sprecyzowano działanie stanowiska z wyszczególnieniem poszczególnych elementów układu.

W części badawczej pracy w pierwszej kolejności zamodelowano komorę spalania badanego silnika w środowisku symulacyjnym Ansys Fluent. Wyszczególniono tam obliczenie warunków brzegowych oraz przygotowanie modelu na potrzeby analizy. W dalszej części zawarto wyniki badań symulacyjnych przepływu czynnika roboczego przez komorę spalania z uwzględnieniem doboru odpowiedniej siatki objętościowej dla komory oraz symulacji zimnego przepływu powietrza. Na koniec zestawiono wybrane wyniki przeprowadzonej symulacji wraz z ich analizą.

#### 3. Opis badanego układu i metodologia badań

Pierwszym etapem było opracowanie wstępnego projektu stanowiska do badania silników turbinowych opartego na sprężarce promieniowej. Projekt został stworzony tak, aby w przyszłości możliwe było przeprowadzenie analiz przepływów w komorze spalania

oraz badanie stężenia gazowych składników spalin przy zasilaniu różnymi paliwami. Pozwoli to na wybór najlepszego zasilania paliwem na hamowni, a także na możliwość zasilania nimi pełnowymiarowych konstrukcji.

Pracę rozpoczęto od dyskretyzacji domeny obliczeniowej miedzianego łącznika, który łączy wlot powietrza do komory spalania z wylotem powietrza z dyfuzora sprężarki. Metody numeryczne są silnie zależne rozmiaru i jakości siatki obliczeniowej. Dane wejściowe do obliczeń zebrano w tabeli 1.

Tab. 1 Dane wejściowe badanego modelu

Parametr	Wartość [jednostka]
$\dot{m}$ (masowe natężenie przepływu powietrza przez sprężarkę)	0,11 $\left[\frac{kg}{s}\right]$
$T_2$ (zmierzona temperatura powietrza na wlocie do rury/wylocie ze sprężarki)	448,15 [K]
$p_2$ (ciśnienie powietrza na wlocie do rury/wylocie ze sprężarki)	202600 [Pa]
$R$ (stała gazowa dla powietrza)	287 $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
D (średnica przekroju rury łącznika)	0,034 m

W programie Ansys Fluent Solution zadano warunek brzegowy na wlocie rury – obliczoną prędkość wynoszącą  $76,75 \frac{m}{s}$ . Dodatkowo przyjęto wartość ciśnienia statycznego na poziomie 250 kPa. Do obliczeń przyjęto model turbulencji  $k - \omega$  SST.

W wyniku przeprowadzonej analizy oszacowano straty ciśnienia w wyniku przepływu powietrza przez łącznik. W tym celu wykorzystano zależność

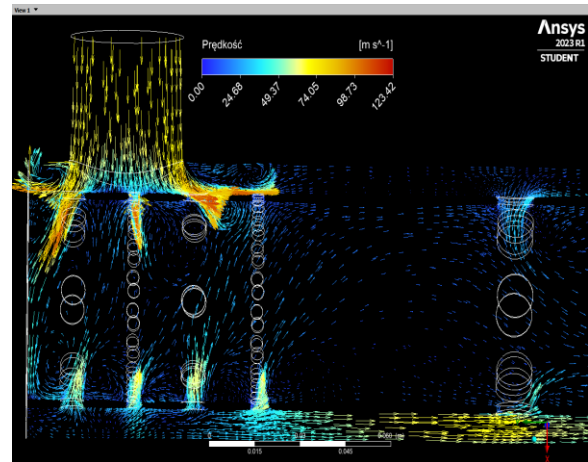
$$\frac{p_{inl} - p_{out}}{p_{inl}} * 100 \% \quad (1)$$

$p_{inl}$  – ciśnienie powietrza na wlocie do komory;

$p_{out}$  – ciśnienie powietrza na wylocie do komory.

#### 4. Wyniki symulacji i analiza

W tej części pracy zaprezentowano wyniki analiz CFD dla przedstawionych wcześniej wybranych ustawień w programie Ansys Fluent. Po zakończeniu analizy wyniki symulacji opracowano w post-procesorze CFD Post. Dla dokładniejszego zobrazowania przepływu przez komorę wykonano rzutowanie wektorów prędkości na płaszczyznę symetrii komory (rys. 1).



Rys. 1. Mapa wektorów prędkości dla badanej komory

Największe wartości uzyskiwane są w otworach od rury żarowej oraz na zwężeniu wylotu z komory. W strefie pierwotnej komory na mapach wektorów prędkości można zauważyć tworzenie niewielkich wirów recyrkulacyjnych w pobliżu obszarów otworów rury. Zwiększa to turbulencję skali mikro przepływu potrzebną do efektywnego procesu mieszania, jednakże zdaniem autora powstałe wiry w wyniku symulacji są niewystarczające do spełniania swojej funkcji. Zwiększenie prędkości oraz odbijanie się strumienia powietrza od małych otworów prowadzi do powstawania przepływu wstecznego, który powoduje recyrkulację powietrza do strefy mieszania.

Można wywnioskować, że przepływ przez otwory rury żarowej nie zależy tylko od ich wielkości i spadku ciśnienia, ale także od geometrii otworów oraz warunków przepływu w ich pobliżu.

#### 5. Podsumowanie

1) Warto zauważyć, że zastosowanie silników wielopaliwowych może wymagać specjalnych konstrukcyjnych i technologicznych rozwiązań, aby umożliwić efektywne spalanie różnych substancji, a także utrzymanie niezbędnych parametrów wydajnościowych.

2) Modelowanie procesów występujących w tego typu silnikach przyczyni się do skrócenia czasu prowadzenia tych badań i w rezultacie przyspieszy prace nad efektywnością tego typu podejścia do zagadnienia wielopaliwowości.

3) Wnioski sugerują, że wielopaliwowe silniki turbinowe mogą znacząco poprawić efektywność energetyczną i ekologiczność systemów hybrydowych, oferując nowe możliwości w kontekście mobilności przyszłości. W kontekście badań nad nowymi technologiami paliwowymi, silniki wielopaliwowe mogą być testowane pod kątem wydajności i efektywności spalania różnych rodzajów paliw, co może prowadzić do innowacji w dziedzinie zasilania.

#### Literatura

- [1] Włodzimierz Balicki, Zbigniew Korczewski, and Stefan Szczeciński, "Główne kierunki rozwoju i zastosowań turbinowych silników spalinowych," 2008.
- [2] Marian Gieras, *Komory spalania silników turbinowych*. Warszawa, 2010.
- [3] A. D. Elżbieta Bulewicz, *Spalanie i Paliwa*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008.
- [4] S. W. Napędach and L. Laboratorium, "'ZPR PWR-Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej' Ćwiczenie 2- Stechiometria spalania."
- [5] Rolls-Royce Ltd., *The jet engine*. Rolls-Royce, 2005.Po