POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI
INSTYTUT ENERGETYKI CIEPLNEJ



Autoreferat rozprawy doktorskiej

Experimental Research of Dual-Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle

---

mgr inż. Wiktor Hoffmann

Promotor: dr hab. inż. Magda Joachimiak, prof.PP
Promotor pomocniczy: dr inż. Bartosz Ziegler

Poznań, 2026

1. Przedmiot, cel i zakres rozprawy

Przedmiotem badań omawianych w rozprawie jest dwuprzewężeniowa dysza typu Dual-Throat Nozzle (DTN), stosowana jako koncepcja nie-mechanicznego sterowania wektorem ciągu silnika odrzutowego. W badanym układzie odchylenie kierunku wektora ciągu uzyskuje się poprzez doprowadzenie strumienia wtórnego do pierwszego przewężeżenia (przekroju krystycznego) dyszy. Wtrysk wtórny zmienia rozkład ciśnienia w obszarze wnęki pomiędzy dwoma przewężeniami i powoduje zmianę kierunku wektora ciągu.

Pierwszym celem rozprawy było **określenie stałej czasowej odpowiedzi dynamicznej osiowo-symetrycznej dyszy DTN na podstawie badań eksperymentalnych**. Drugim celem rozprawy było **Zbadanie eksperymentalne częstotliwości i amplitudy ciśnienia na ściance dyszy DTN, podczas pracy ze stałymi parametrami czynnika w przekrojach wlotowych**.

Prace badawcze, prowadzące do zrealizowania wyżej wymienionych celów obejmowały:

- analizę literatury dotyczącą metod wektorowania ciągu i dysz DTN,
- przeprowadzenie niestacjonarnej analizy CFD badanej geometrii (Rysunek 1),
- zaprojektowanie i wykonanie modułowego modelu-sekcji testowej dyszy DTN,
- zaprojektowanie i zbudowanie torów pomiarowych o wysokiej częstotliwości próbkowania,
- przeprowadzenie badań w krótkotrwałym przepływie generowanym przez tubę Ludwiega,
- rejestrację ciśnień na ściance dyszy i parametrów w przekrojach wlotowych,
- opracowanie metody dopasowania wyników do modelu odpowiedzi pierwszego rzędu,
- wyznaczenie czasu opóźnienia t_0 i stałej czasowej τ,
- wyznaczenie rozkładu ciśnienia na ściankach przed i po uruchomieniu wtrysku wtórnego,
- wykonanie analizy częstotliwościowej sygnałów ciśnienia metodą FFT oraz określenie amplitud,
- porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami CFD.

2. Ścieżka publikacyjna prowadząca do rozprawy

Temat rozprawy rozwijał się w trzech etapach publikacyjnych, przedstawionych w tabeli 1. Pierwszy etap dotyczył stanowiska badawczego. Publikacja *Transoniczny tunel aerodynamiczny w konfiguracji tuby Ludwiega* opisywała koncepcję tunelu, zasadę działania tuby Ludwiega i możliwe zastosowania stanowiska do badań przepływów transonicznych, w tym przepływów dyszowych i przepływów w kanałach międzyłopatkowych.

Drugi etap dotyczył opisu zaobserwowanych w pierwszych eksperymentach niestacjonarności przepływu w dyszach DTN. Publikacja *Analiza problemu stateczności przepływu w dyszach typu Dual-Throat* wskazywała na występowanie pulsacji ciśnienia i potrzebę analizy niestacjonarnej, zarówno w kontekście eksperymentu jak i analiz numerycznych.

Trzeci etap stanowił artykuł *Experimental study of the dynamic response of a Dual-Throat fluidic thrust vectoring nozzle*. Praca ta bezpośrednio dotyczyła wyznaczania odpowiedzi dynamicznej dyszy DTN na aktywację wtrysku wtórnego. Opisano w niej pomiary ciśnienia na ścianach, wygładzanie filtrem Savitzky'ego-Golaya, dopasowanie modelu pierwszego rzędu z opóźnieniem oraz analizę sygnałów w dziedzinie częstotliwości.

Rozprawa doktorska porządkuje i rozszerza powyższą ścieżkę. Obejmuje pełny przegląd literatury, analizę numeryczną, opis stanowiska, opis układu pomiarowego, procedurę obróbki danych oraz zestaw wyników eksperymentalnych dotyczących odpowiedzi dynamicznej i niestacjonarności przepływu w dyszy DTN.

Tabela 1: Ścieżka publikacyjna

Etap	Publikacja	Rola w przygotowaniu rozprawy
I	*Transoniczny tunel aerodynamiczny w konfiguracji tuby Ludwiega*	opis stanowiska krótkotrwałego i jego zastosowania do badań przepływów dyszowych
II	*Analiza problemu stateczności przepływu w dyszach typu Dual-Throat*	identyfikacja problemu pulsacji ciśnienia i niestacjonarności przepływu w DTN
III	*Experimental study of the dynamic response of a dual throat fluidic thrust vectoring nozzle*	eksperymentalne wyznaczenie parametrów odpowiedzi dynamicznej DTN

3. Metodyka badań

Badania wykonano w krótkotrwałym przepływie powietrza w tunelu typu tuba Ludwiega (Rysunek 2 i 3). Przepływ główny był generowany przez rozprężanie powietrza z części ciśnieniowej stanowiska. Wtrysk wtórny był doprowadzany z osobnego układu sprężonego powietrza. Sekwencję pomiarową zrealizowano tak, aby najpierw ustalić przepływ główny, a następnie, po określonym czasie, uruchomić wtrysk wtórny.

Model badawczy obejmował geometrię dyszy DTN z dwoma przewężeniami o identycznym polu przekroju, wnęką pomiędzy nimi oraz szczeliną wtrysku wtórnego. Pomiar ciśnienia wykonano w punktach rozmieszczonych na górnej i dolnej ściance dyszy (Rysunek 4). Rejestrowano również ciśnienia w torach zasilania oraz sygnały niezbędne do wyznaczenia strumieni masy. Dane pomiarowe zapisano z częstotliwością *51.2 kS/s/ch* umożliwiającą analizę przebiegu przejściowego i składowych częstotliwościowych.

Do identyfikacji czasu odpowiedzi dynamicznej wykorzystano model inercyjny pierwszego rzędu z opóźnieniem. Parametrami modelu były czas opóźnienia t_0 oraz stała czasowa τ. Model stosowano wyłącznie do opisu średniej odpowiedzi przejściowej pomiędzy stanem przed wtryskiem a stanem po wtrysku. Składowe niestacjonarne wartości ciśnień analizowano oddzielnie metodą FFT.

4. Wyniki eksperymentalne

Szczegółowo przeanalizowany przypadek pracy odpowiadał warunkom rozprężu $NPR = 2,8$ i udziale wtrysku wtórnego $MFR = 3\%$. Dla badanego przypadku masowy strumień przepływu głównego wynosił $\dot{m}_p = 0,445$ kg/s, a masowy strumień przepływu wtórnego $\dot{m}_s = 0,014$ kg/s. Oczekiwany kąt wektorowania, wynikający z danych odniesienia dla podobnej geometrii, wynosił około 15°.

Dla sygnału strumienia wtórnego wyznaczono czas opóźnienia $t_0 = 0,01638$ s i stałą czasową $\tau = 0{,}00176$ s. Dla sygnałów ciśnienia na ściankach dyszy czasy opóźnienia mieściły się w zakresie od $0,01640$ do $0,01832$ s, a stałe czasowe od $0,00079$ do $0,00244$ s. Największa wiarygodna wartość stałej czasowej wyniosła $\tau = 0,00244$ s, co odpowiadało wartości bezwymiarowej $\tau^* \approx 11$.

Różnice czasów opóźnienia narastania strumienia wtórnego i odpowiedzią ciśnienia były rzędu milisekund. Wynik ten oznacza, że w analizowanym przypadku odpowiedź ciśnienia na ściankach dyszy była związana przede wszystkim z dynamiką zaworu i napełniania układu strumienia wtórnego. Nie wykazano dodatkowego opóźnienia, większego od skali czasowej układu doprowadzenia strumienia wtórnego.

Wtrysk wtórny spowodował zmianę rozkładu ciśnienia na ściankach dyszy. Największe zmiany zarejestrowano na górnej ściance, w punktach położonych w obszarze oddziaływania wtrysku i wnęki. Zmiana rozkładu ciśnienia była zgodna z mechanizmem pracy DTN, w którym wtrysk wtórny powoduje

asymetryczną przebudowę pola przepływu w obszarze przewężeń.

Analiza FFT wykazała obecność pulsacji ciśnienia zarówno przed, jak i po uruchomieniu wtrysku wtórnego. Przed wtryskiem dominujące częstotliwości występowały głównie w zakresie około 1100–1300 Hz, a amplitudy wynosiły około $0,026$–$0,055$ bar. Po uruchomieniu wtrysku dominujące częstotliwości mieściły się w przybliżeniu w zakresie 800–1400 Hz, a amplitudy wynosiły około $0,017$–$0,040$ bar. Oznacza to, że badany przepływ nie był w pełni stacjonarny. Pulsacje nie zostały potraktowane jako składnik modelu pierwszego rzędu, lecz jako osobny składnik sygnału wymagający analizy częstotliwościowej.

Porównanie z analizą CFD wykorzystano do sprawdzenia rozkładu ciśnienia i interpretacji mechanizmu wektorowania. Wyniki eksperymentalne i CFD były zgodne co do ogólnego trendu zmian ciśnienia na ściankach. Różnice lokalne wynikały z ograniczeń modelowania przepływu w złożonej, niestacjonarnej geometrii DTN oraz z ograniczeń pomiaru ciśnienia przez kanały pomiarowe.

5. Oryginalny wkład rozprawy

Oryginalny wkład rozprawy obejmuje następujące elementy:

- przygotowanie stanowiska i metodyki pomiarowej do badań krótkotrwałej odpowiedzi dynamicznej dyszy DTN,
- wykonanie modułowego modelu dyszy DTN przystosowanego do pomiaru ciśnień ściennych i zasilania strumieniem wtórnym,
- opracowanie procedury przetwarzania danych dla krótkotrwałych pomiarów ciśnienia z uwzględnieniem składowej średniej i pulsacyjnej,
- eksperymentalne wyznaczenie czasu opóźnienia i stałej czasowej osiowosymetrycznej dyszy DTN podczas aktywacji wtrysku wtórnego,
- potwierdzenie, że średnia odpowiedź przejściowa ciśnienia na ściankach może być aproksymowana modelem pierwszego rzędu z opóźnieniem,
- wykazanie obecności mierzalnych pulsacji ciśnienia w stanie przed wtryskiem oraz po uruchomieniu wtrysku wtórnego,
- porównanie eksperymentalnej redystrybucji ciśnienia z wynikami CFD dla tej samej geometrii.

Wynik $\tau^* \approx 11$ może być użyty do wstępnego skalowania czasu odpowiedzi geometrycznie podobnych dysz. W rozprawie pokazano przykład, w którym dla długości wnęki $l = 1$ m i temperatury odniesienia $T = 1000$ K oszacowana stała czasowa wynosi około 0,02 s.

6. Wnioski

W pracy wykazano możliwość eksperymentalnego wyznaczenia odpowiedzi dynamicznej osiowosymetrycznej dyszy DTN w krótkotrwałym przepływie generowanym w tubie Ludwiega. Zastosowana procedura pozwoliła wyznaczyć czas opóźnienia i stałą czasową odpowiedzi średniej oraz oddzielnie przeanalizować pulsacje ciśnienia.

W badanym przypadku czas odpowiedzi ciśnienia na ściankach był rzędu milisekund i był porównywalny z czasem narastania strumienia wtórnego. Wynik ten wskazuje, że dla badanej konfiguracji ograniczeniem odpowiedzi układu był przede wszystkim układ zasilania wtrysku wtórnego, a nie wykrywalne dodatkowe opóźnienie wewnętrznej odpowiedzi aerodynamicznej dyszy.

Uruchomienie wtrysku wtórnego spowodowało mierzalną redystrybucję ciśnienia na ściankach, zgodną z mechanizmem wektorowania w dyszy DTN. Jednocześnie analiza FFT wykazała, że przepływ zawierał składowe pulsacyjne przed i po aktywacji wtrysku. Dlatego przy ocenie pracy DTN należy uwzględniać zarówno wartości średnie, jak i niestacjonarne składniki sygnału.

Dalsze badania powinny obejmować szerszy zakres NPR, MFR i wariantów geometrii. Wskazane jest jednoczesne mierzenie ciśnienia na ściankach, sił oraz kąta wektorowania, aby bezpośrednio powiązać przebieg ciśnienia z odpowiedzią mechaniczną układu.

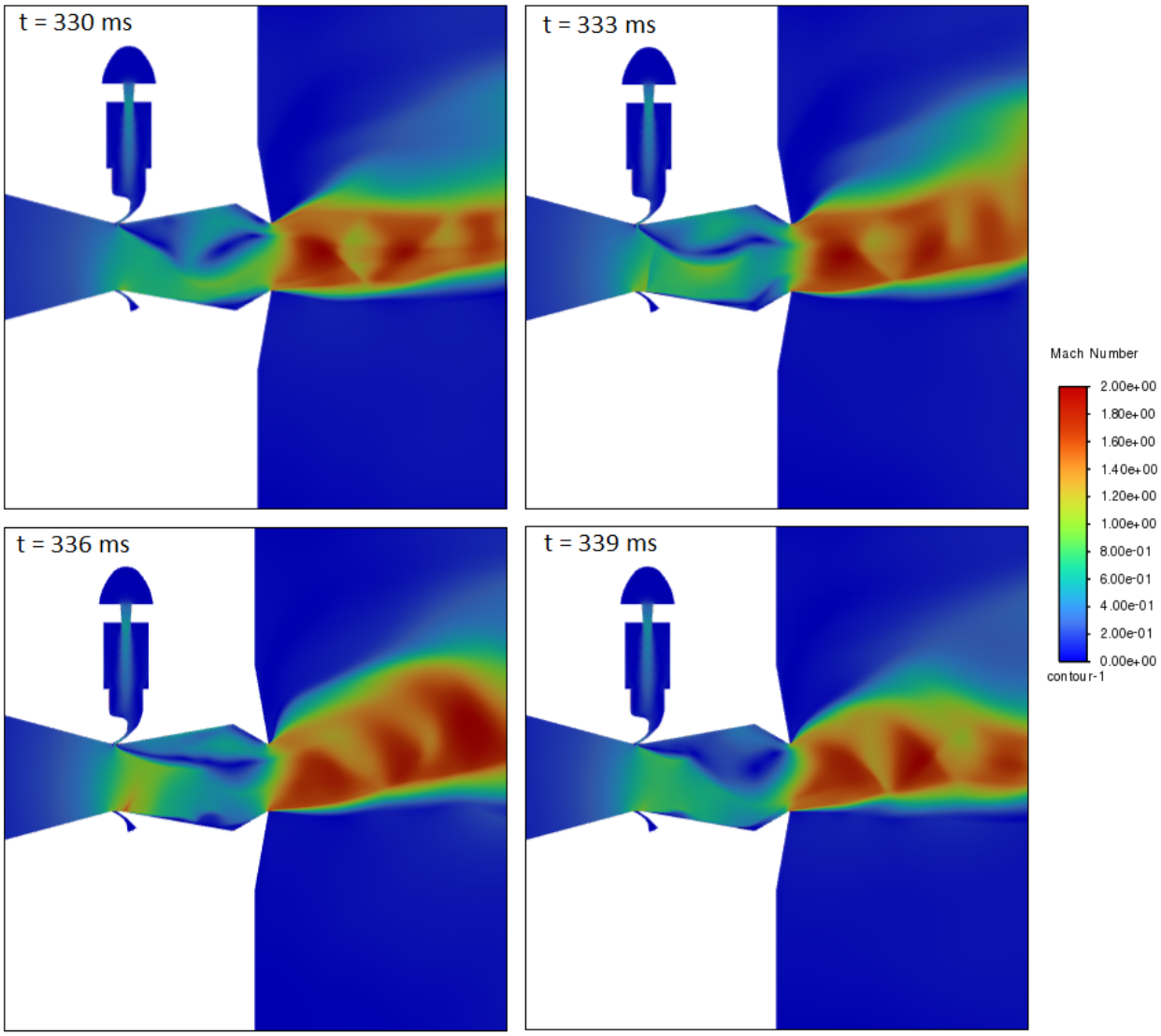
7. Wykaz publikacji autora

Tabela (2) obejmuje pozycje z profilu SIN Politechniki Poznańskiej oraz publikację przyjętą w *Advances in Science and Technology Research Journal*. Dane bibliograficzne i punktację należy traktować zgodnie ze stanem bazy w dniu przygotowania autoreferatu. Pozycja przyjęta do druku wymaga uzupełnienia po pojawieniu się w SIN.

Tabela 2: Wykaz publikacji autora

Lp.	Rok	Publikacja	Miejsce publikacji	Punkty
1	2019	P. Poszwa, P. Brzęk, W. Hoffmann, *Analiza zjawiska samoistnego wyboczenia wyprasek cienkościennych z tworzyw sztucznych.*	*Mechanik*, nr 1, s. 7–9.	5
2	2020	W. Hoffmann, *Transoniczny tunel aerodynamiczny w konfiguracji tuby Ludwiega.*	W: *Nauka dla obronności i środowiska. Tom 1*, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, s. 179–184.	–
3	2020	W. Hoffmann, M. Żokowski, *Optymalizacja aeroakustyki śmigła z wykorzystaniem algorytmów genetycznych.*	W: *Nauka dla obronności i środowiska. Tom 1*, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, s. 185–199.	20
4	2020	M. Ciałkowski, N. D. Botkin, J. Kołodziej, A. Frąckowiak, W. Hoffmann, *Regularization of an Inverse Problem by Controlling the Stiffness of the Graphs of Approximate Solutions.*	*CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2783, s. 41–56.	5
5	2022	W. Hoffmann, *Wpływ emisji rakiet nośnych na atmosferę ziemską.*	W: *Nauka dla obronności. Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej. Tom 1*, Wydawnictwo ITWL, s. 247–256.	20
6	2024	W. Hoffmann, B. Ciupek, M. Ciałkowski, B. Ziegler, *Analiza wytrzymałości lufy w miejscu wykonania otworów pomiarowych termoelementów dla rozwiązywania zagadnień odwrotnych przewodnictwa cieplnego.*	W: *Nauka dla obronności. Perspektywy logistyki wojskowej i cywilnej w kontekście zapewnienia odporności energetycznej siłom zbrojnym. Tom 3*, Wydawnictwo ITWL, s. 11–22.	20
7	2024	W. Hoffmann, A. Wróblewska, *Analiza problemu stateczności przepływu w dyszach typu dual-throat.*	W: *Nauka dla obronności. Perspektywy logistyki wojskowej i cywilnej w kontekście zapewnienia odporności energetycznej siłom zbrojnym. Tom 3*, Wydawnictwo ITWL, s. 23–29.	20
8	2025	W. Hoffmann, M. Joachimiak, *Surface Air-Cooled Oil Coolers (SACOCs) in Turbofan Engines: A Comprehensive Review of Design, Performance, and Optimization.*	*Energies*, vol. 18, iss. 15, 4052-1–4052-13.	140
9	2026	W. Hoffmann, M. Joachimiak, *Experimental study of the dynamic response of a dual throat fluidic thrust vectoring nozzle.*	*Advances in Science and Technology Research Journal*, artykuł przyjęty / online first.	(100)

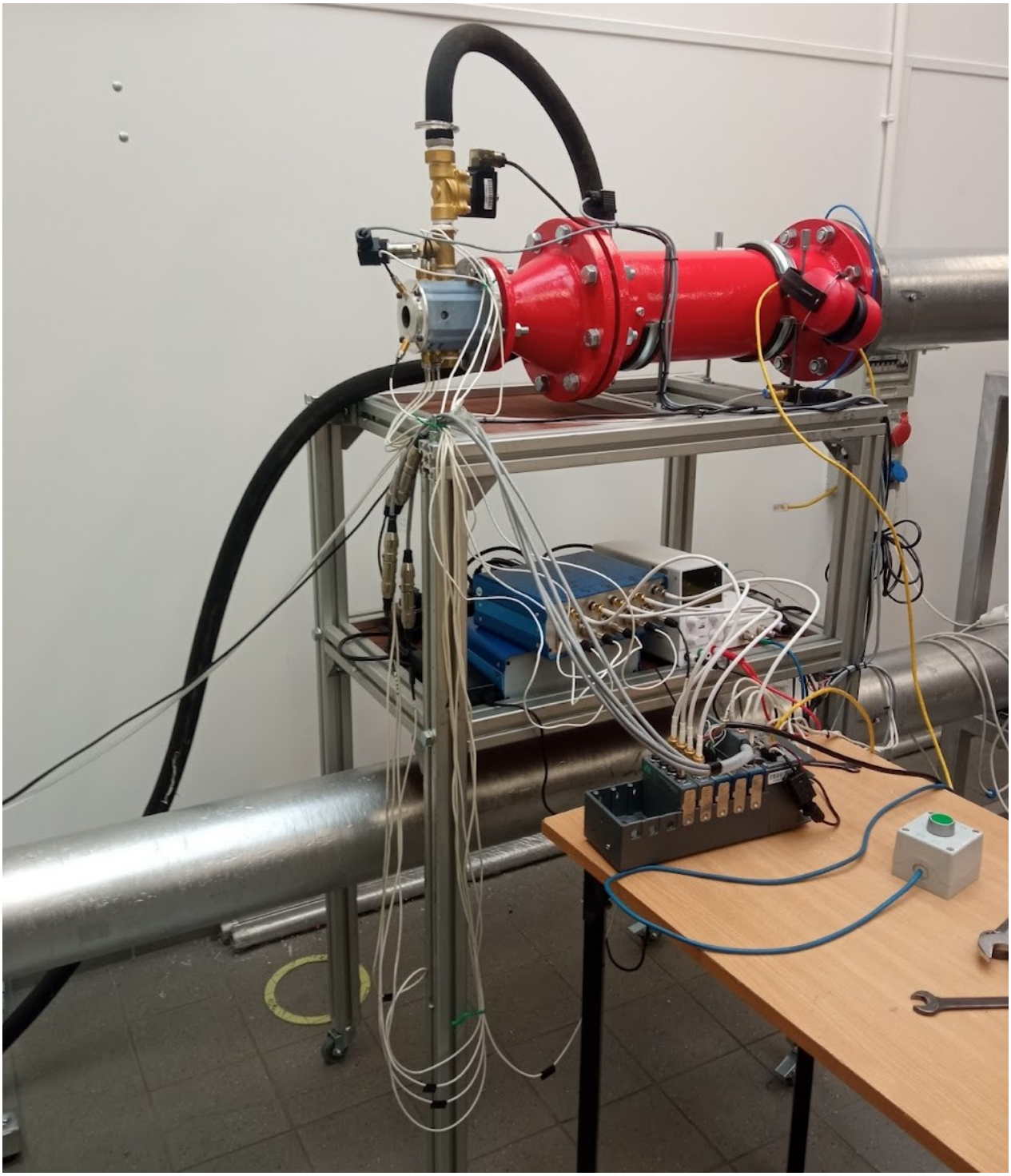
8. Załączniki



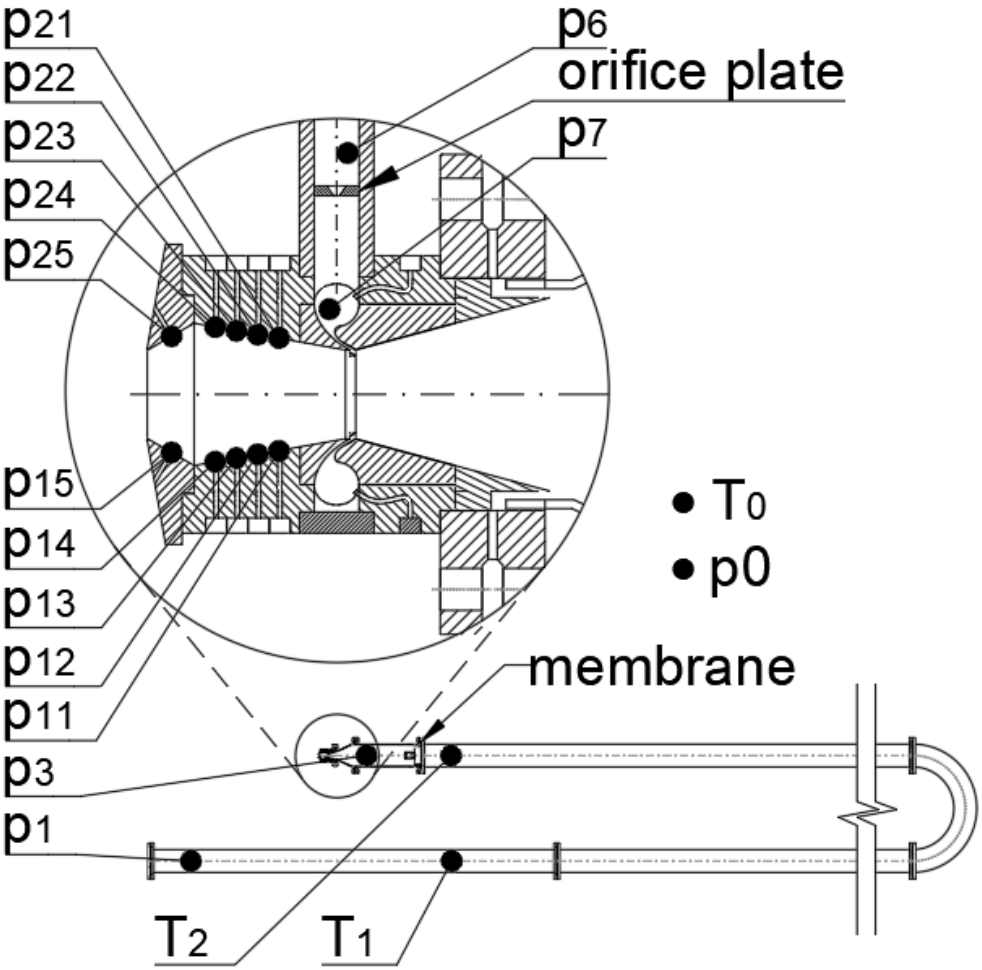
Rysunek 1: Wyniki niestacjonarnej analizy CFD (Liczba Macha).



Rysunek 2: Tuba Ludwiega w Laboratorium napędów lotniczych Instytutu Energetyki Cieplnej.



Rysunek 3: Sekcja testowa.



Rysunek 4: Schemat punktów pomiarowych.