



**Politechnika Warszawska
Instytut Techniki Ciepłej, MEiL,
Zakład Silników Lotniczych**



SEMINARIUM INSTYTUTOWE

**Badania eksperymentalne mikronapędów raketowych
w zastosowaniach satelitarnych**

Dr inż. Jan Kindracki

Warszawa, 19 styczeń 2016

ZESPÓŁ BADAWCZY

- Prof. dr hab. inż. Piotr Wolański
- Dr inż. Jan Kindracki
- Dr inż. Łukasz Mężyk
- Mgr inż. Łukasz Boruc
- Mgr inż. Przemysław Paszkiewicz



Studenci wykonujący prace badawcze (przejęciowe, inżynierskie, magisterskie, eksperymentalne, numeryczne bądź projektowe) w ramach przedstawianych prac:

Karolina Tur, Dorota Ziezula, Szczepańska Sylwia, Roszkiewicz Kamila, Riabtsun Artur, Arkadiusz Górak, Katarzyna Ciechowska, Paweł Nowakowski, Marcin Teofilowicz

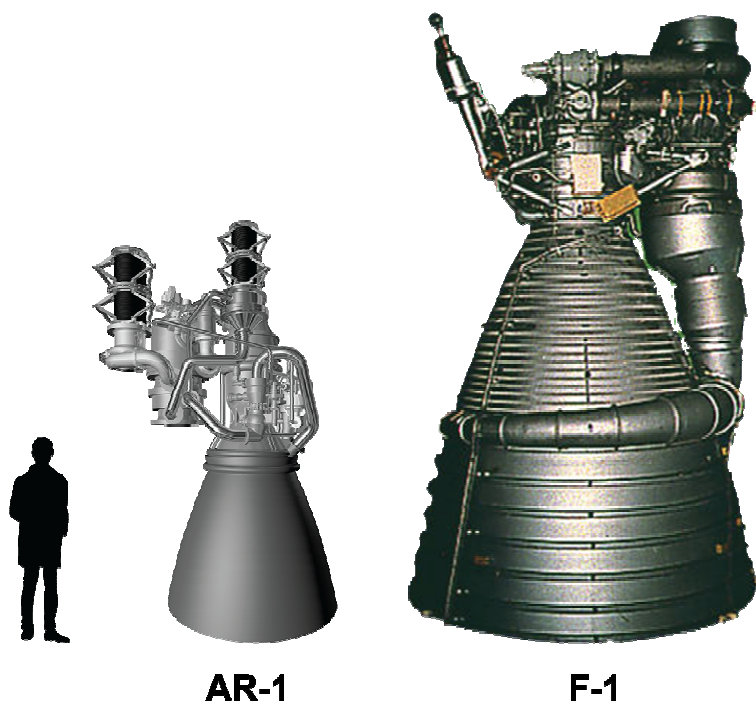


Wprowadzenie do tematyki

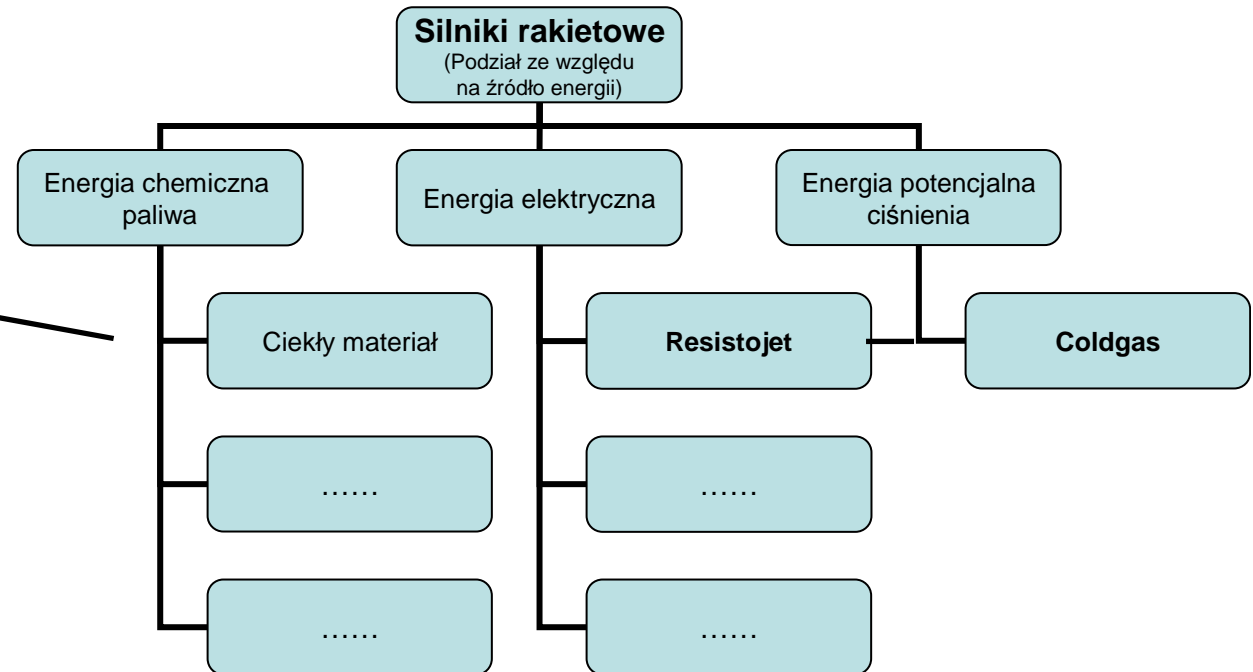
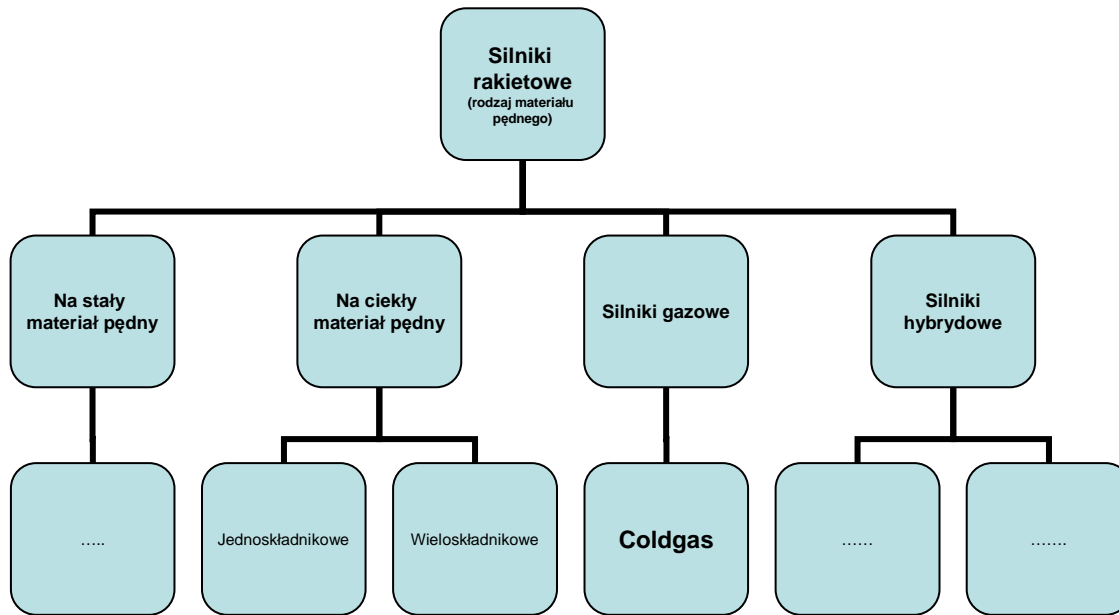
Silnik raketowy – jest to rodzaj silnika odrzutowego wykorzystujący substancję roboczą znajdującą się na pokładzie napędanego pojazdu (w zbiornikach). Substancją roboczą mogą być spaliny pochodzące ze spalania paliwa – silniki cieplne, gaz ogrzewany / przyśpieszany z wykorzystaniem energii elektrycznej – raketowe silniki elektryczne lub rozprężany gaz z wykorzystaniem energii potencjalnej sprężonego gazu – silniki typu „coldgas”.

Przytoczony opis substancji nie wyczerpuje definicji dla wszystkich silników raketowych!!

Silnik raketowy wg słownika Collinsa: „a reaction engine in which a fuel and oxidizer are burnt in a combustion chamber, the products of combustion expanding through a nozzle and producing thrust”



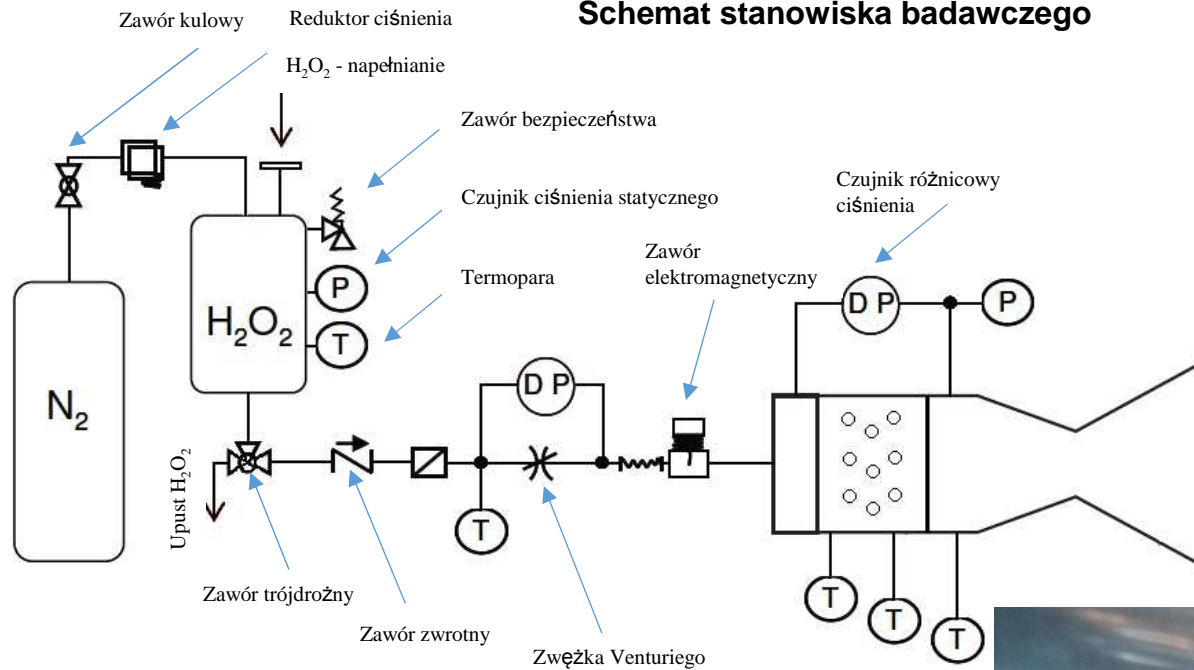
Gdzie szukać naszych napędów?



**Badania eksperymentalne silnika
wykorzystującego katalityczny rozkład
stężonego nadtlenku wodoru (+98% H_2O_2)**

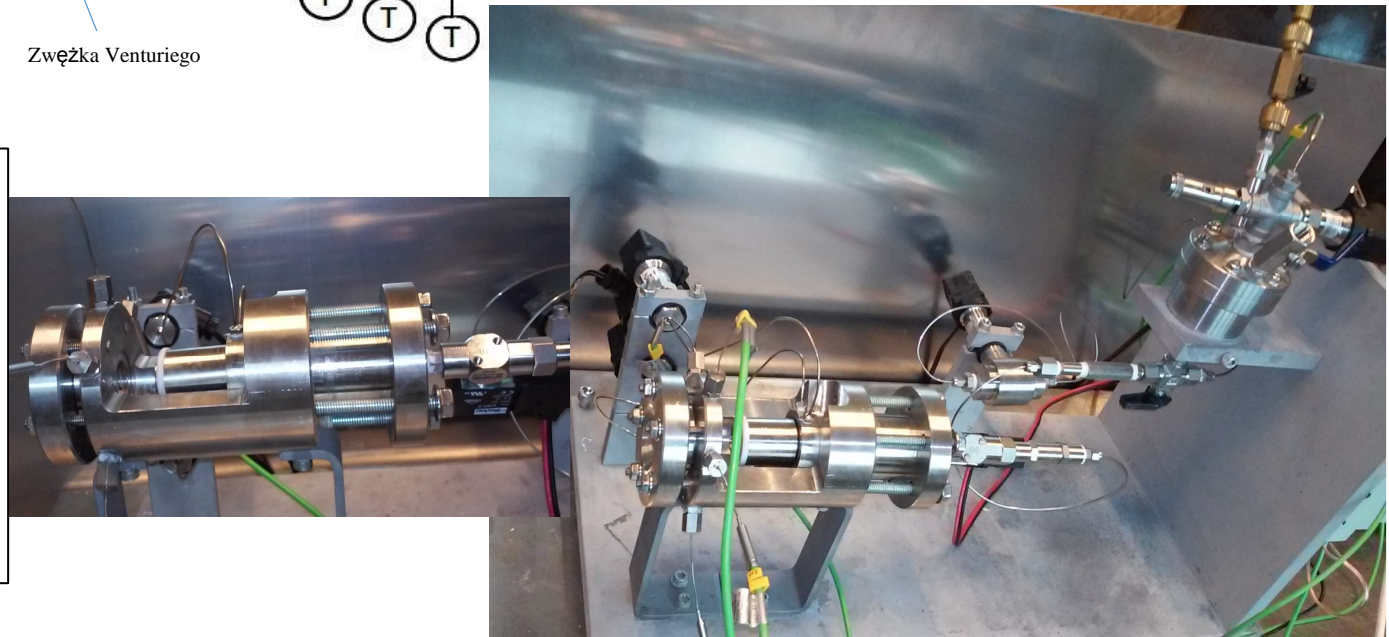
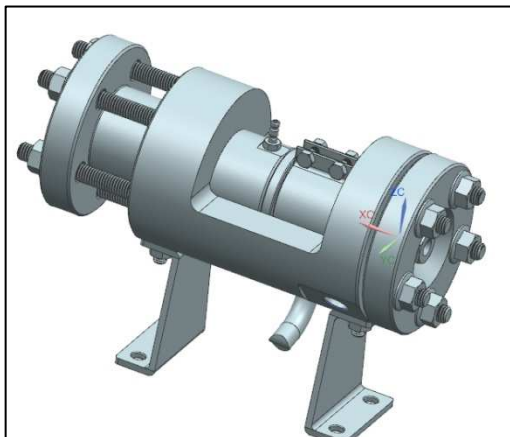
Stanowisko badawcze do badania komory katalitycznej

Schemat stanowiska badawczego



- konstrukcja komory katalitycznej pozwalać będzie na zmianę średnicy oraz jej długości;
- pomiar przepływu na wykalibrowanej zwężce pomiarowej własnej konstrukcji;
- zainstalowana grzałka pozwoli na wstępne podgrzanie komory co zmniejszyć powinno problem tzw. „zimnego startu”;
- wtryskiwacz zapewni odpowiednią dawkę nadtlenu wodoru do komory (problem z zakupem odpowiednio małego i szybkiego wtryskiwacza, inna droga to wykonanie własnego projektu)
- eksperymenty należy planować rozważnie ze względu na cenę nadtlenu wodoru

Model komory katalitycznej



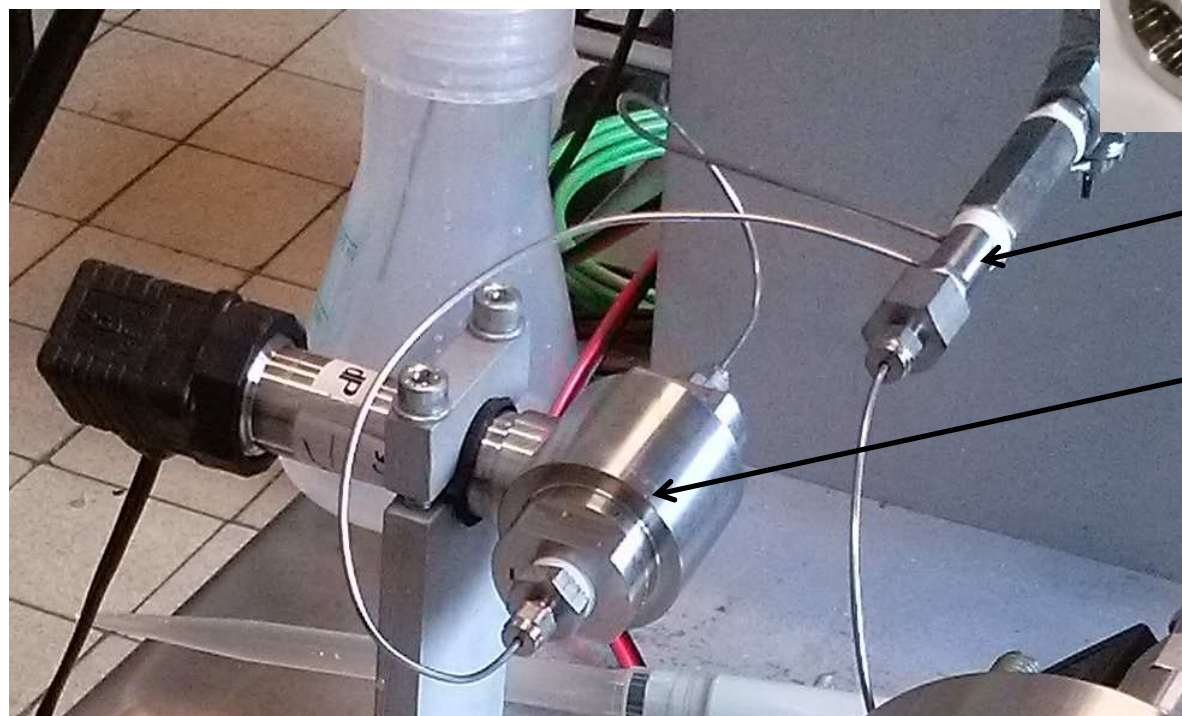
Metodologia badań

I etap – skalowanie zwężki

- ❑ Przeprowadzono **306 prób** polegających na przepuszczaniu wody i nadtlenku przez instalację oraz precyzyjnym pomiarze masy czynnika;
- ❑ Efektem testów jest wyznaczenie współczynników skalujących zależności teoretyczne wydatku masowego medium;

II etap – gorące testy

III etap – pomiary ciągu podczas gorących testów

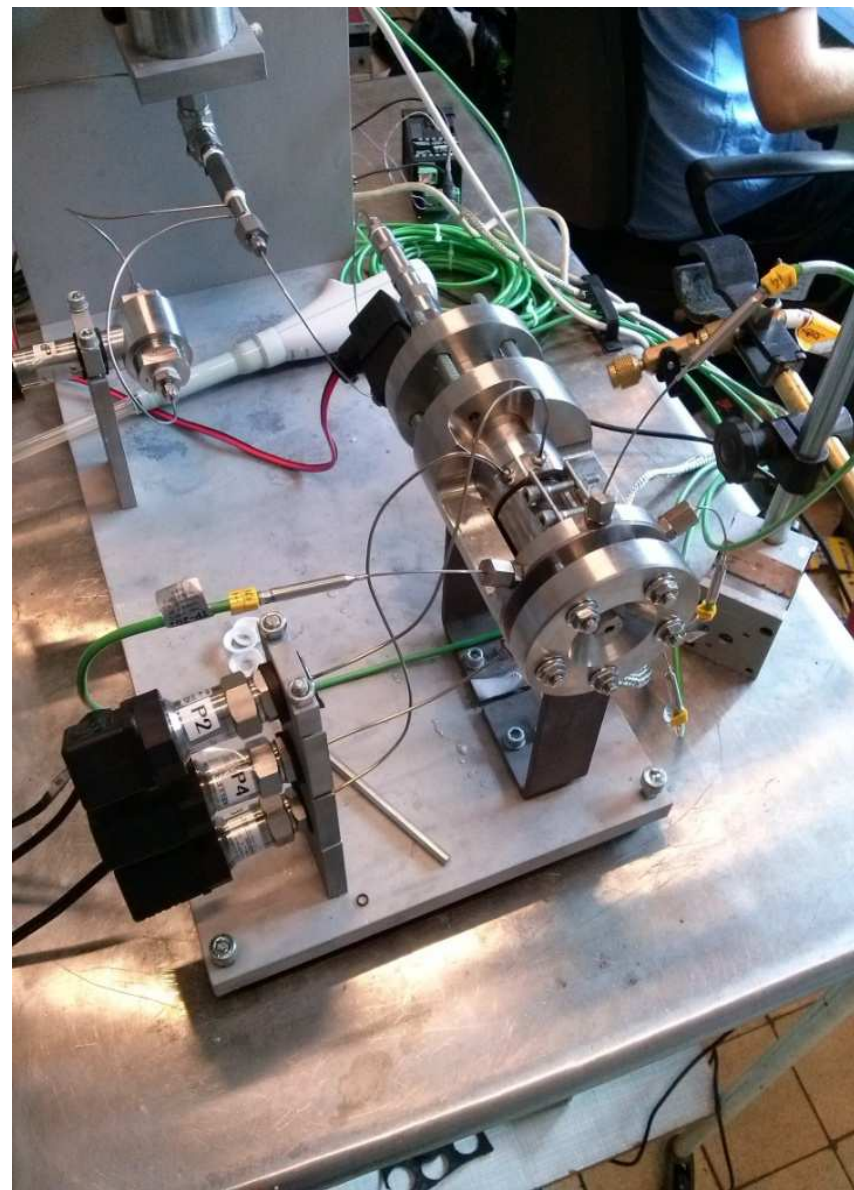
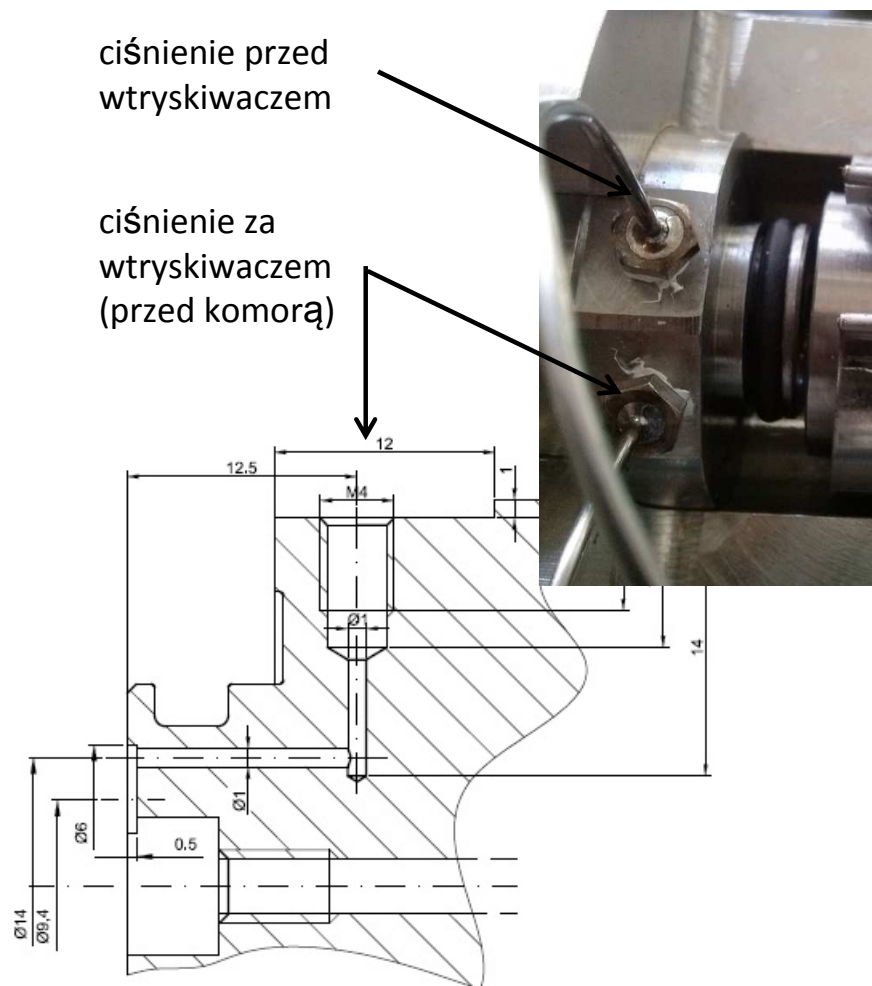


Pomiarowa zwężka
Venturego

Różnicowy
czujnik ciśnienia

Modyfikacje stanowiska

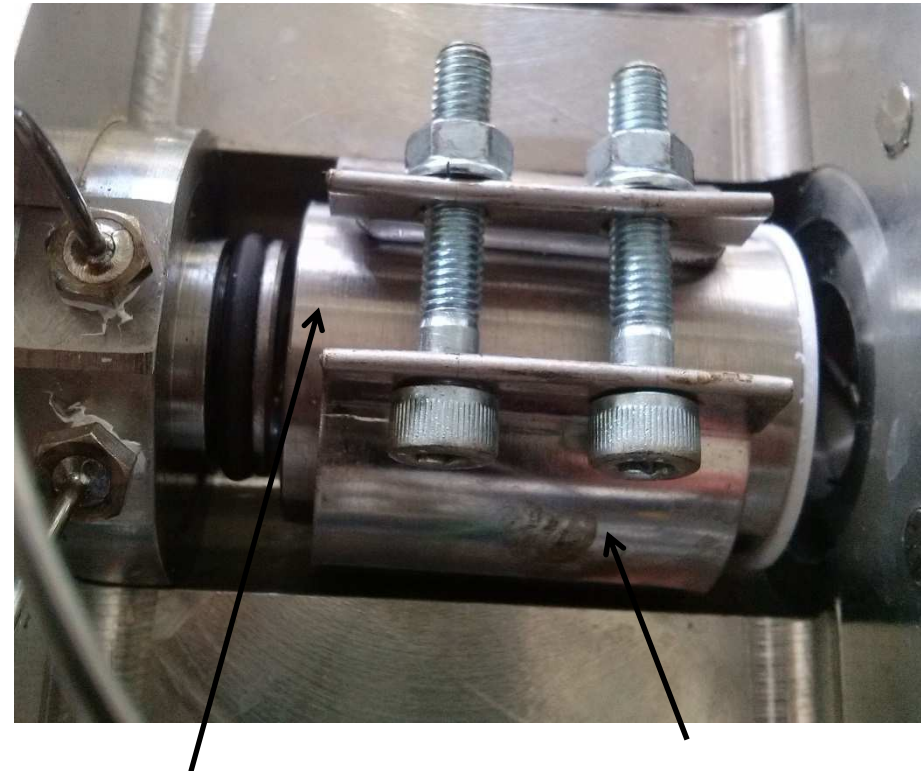
- Zastosowanie trzech dodatkowych termopar za komorą katalityczną
- Port ciśnieniowy umożliwiający pomiar ciśnienia za wtryskiwaczem kawitacyjnym



Badania – gorące testy

II etap – gorące testy

- Przeprowadzono blisko **150 prób**;
- Rozłożono 2dm³ (~2,9kg) 98% HTP;
- badania nad wpływem temperatury początkowej łoża na wartości parametrów charakteryzujących silnik;
- wartości badanych temperatur: pokojowa ok. 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300°C;
- dla każdej wartości temperatury przynajmniej 5 prób;
- sekwencja czasowa pojedynczej próby: 15min wygrzewania w temperaturze docelowej – próba – 15min chłodzenia w strumieniu sprężonego powietrza;
- **Aktualnie posiadamy 4 łoża o różnych wymiarach.**



Łoże katalityczne

Opaskowa grzałka o mocy 200W



Kryza oraz dysza silnika o ciągu 5N

„Monopropelant H₂O₂” – przykładowe wyniki

Próba łoża dla projektowanego ciągu 5N:

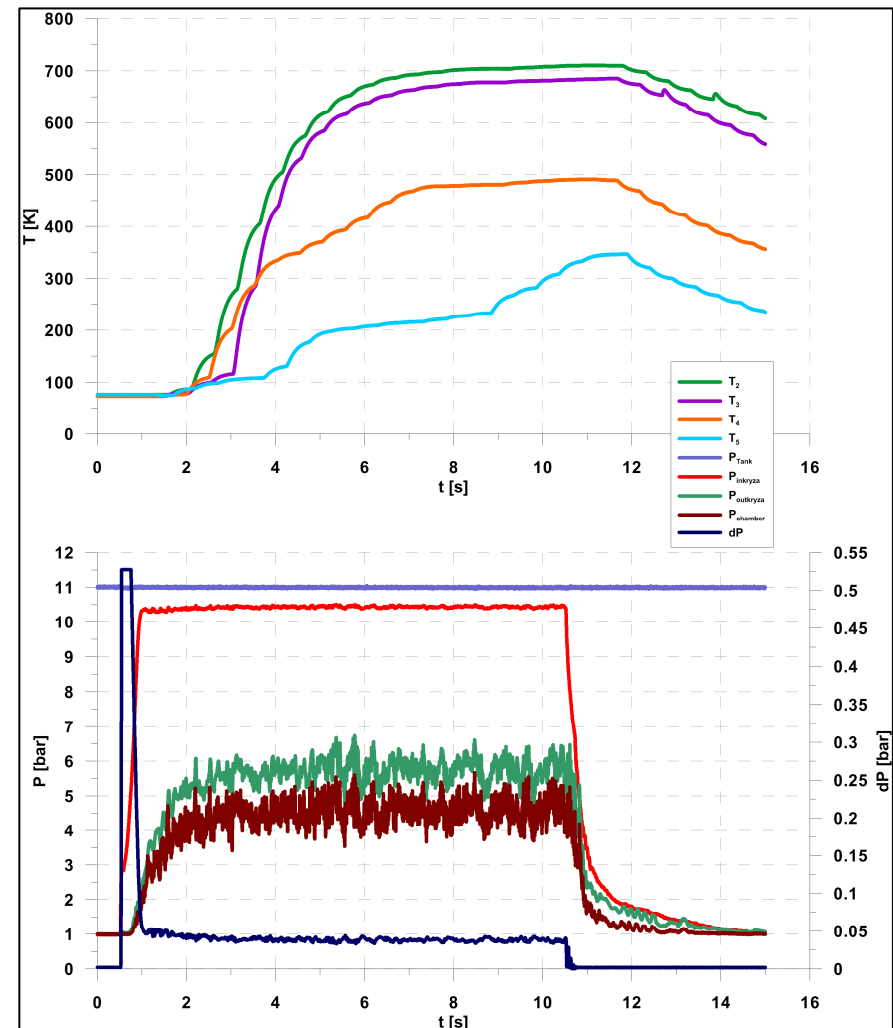
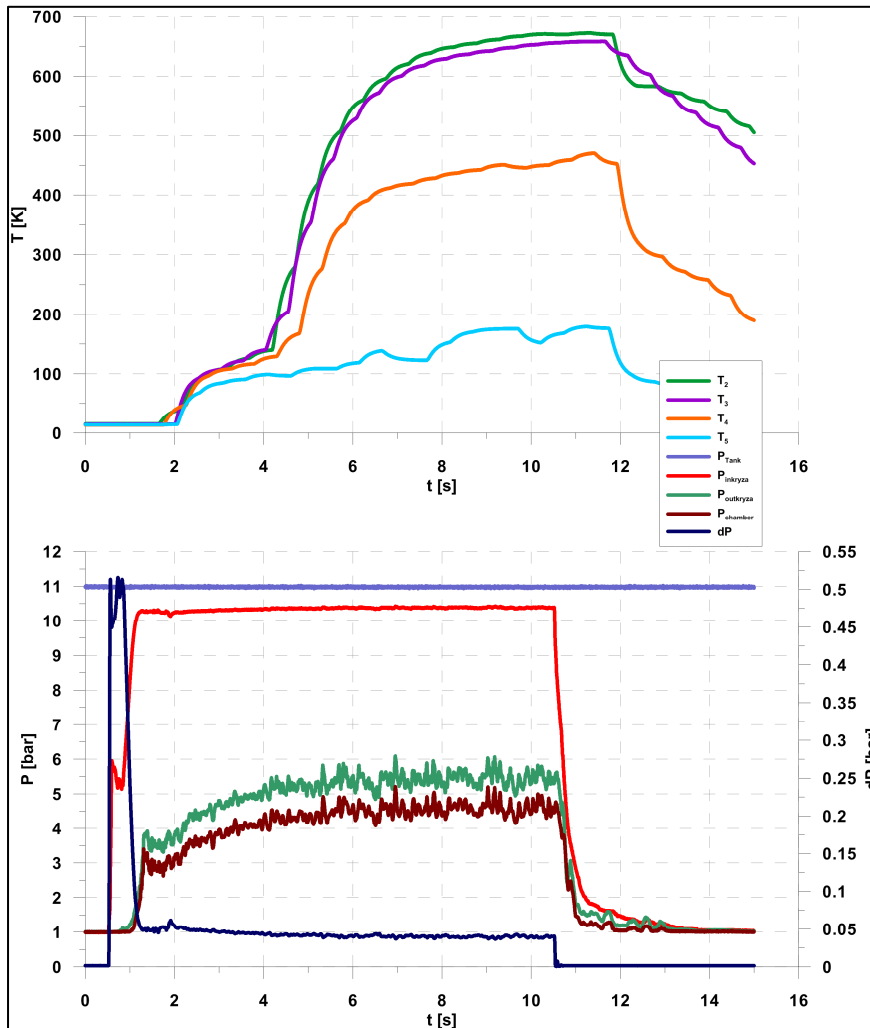
- Średnica łoża
- Długość łoża:
- Temperatura początkowa: 20°C
- Ciśnienie w komorze –
- Czas trwania próby: 10s

$$T_{\text{teoria}}=888\text{K}$$

$$I_{\text{sp}_{\text{sl}}}=1077\text{m/s}$$

Próba łoża dla projektowanego ciągu 5N:

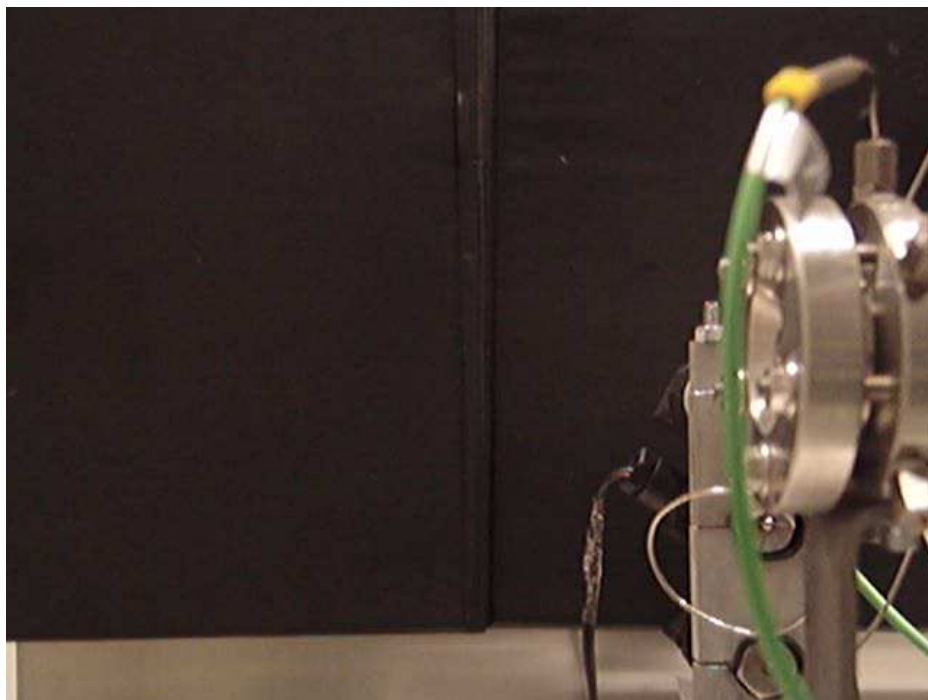
- Średnica łoża:
- Długość łoża: 2
- Temperatura początkowa: 250°C
- Ciśnienie w komorze
- Czas trwania próby: 10s



„Monopropelant H_2O_2 ” – dobry kontra nieudany eksperyment

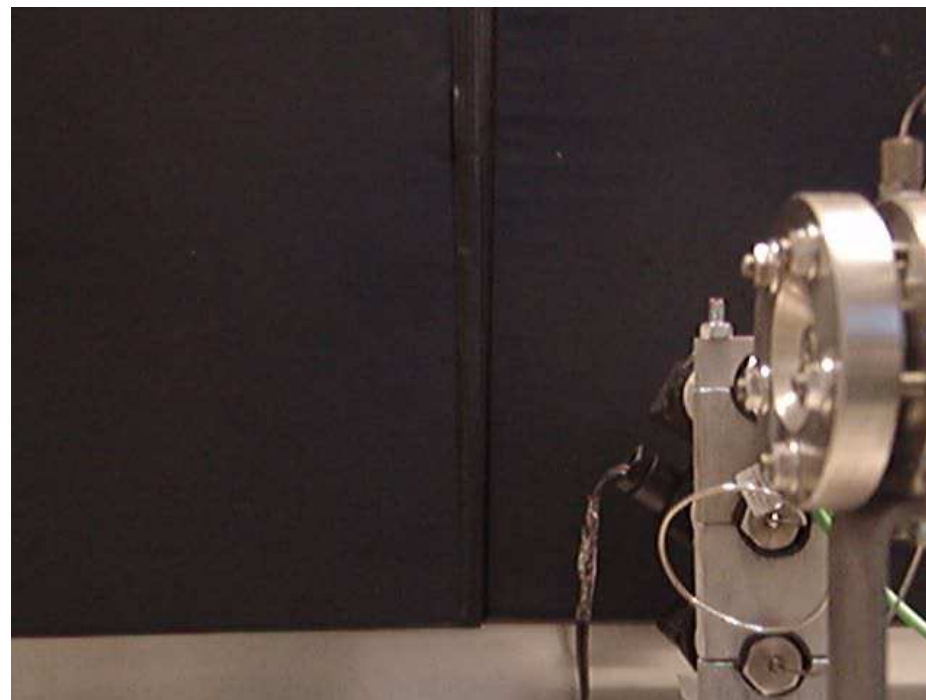
Poprawny

(pełny rozkład)



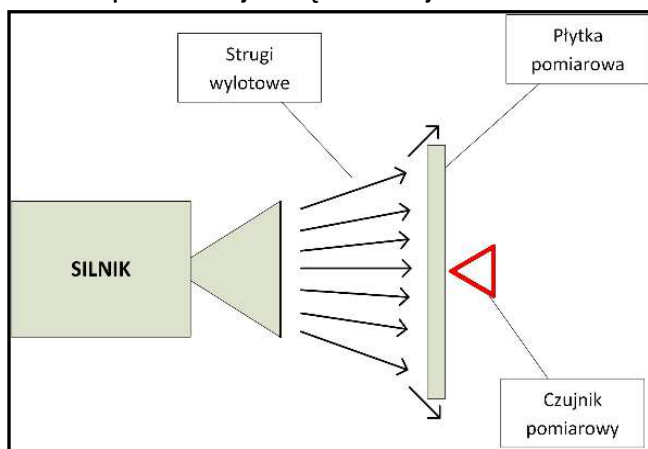
Nieudany

(łożo katalityczne nie pracuje poprawnie – nie do końca rozkładając nadtlenek wodoru)



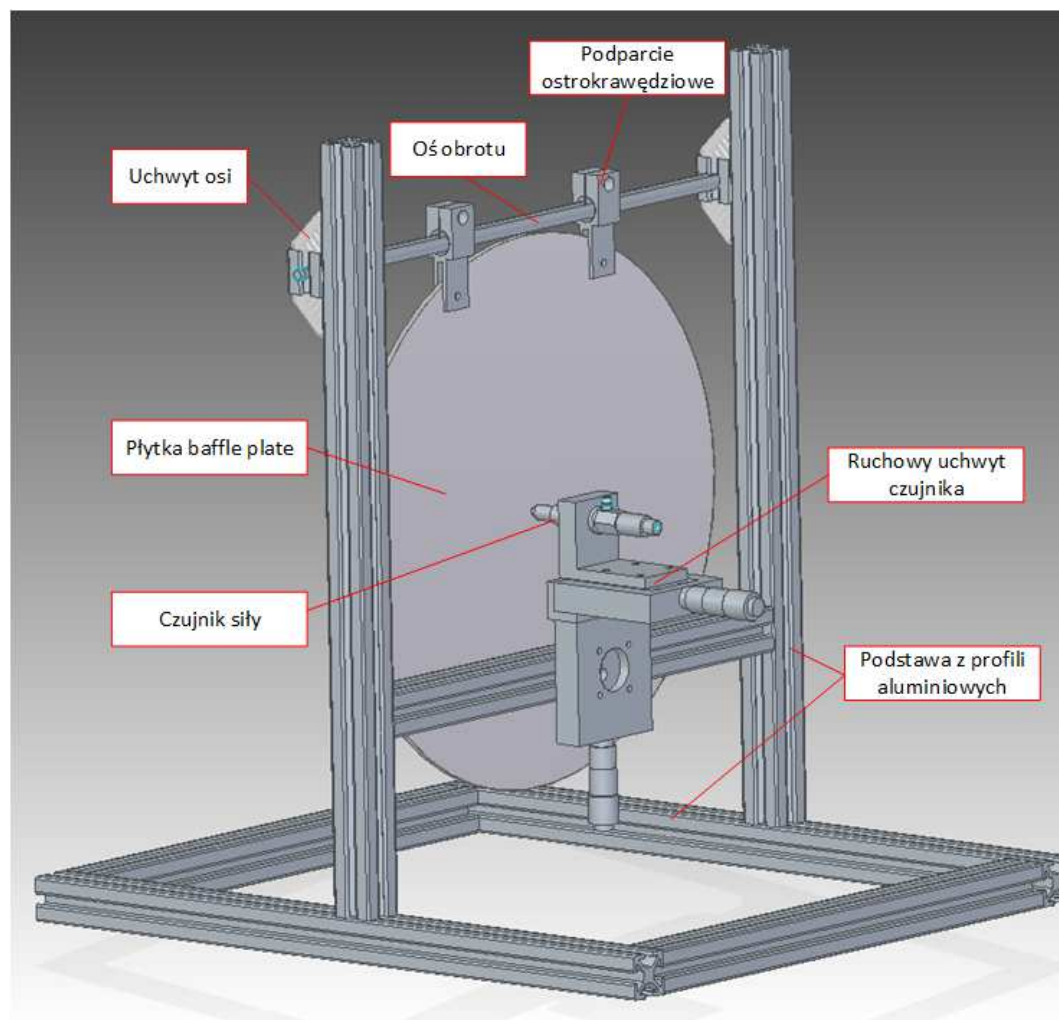
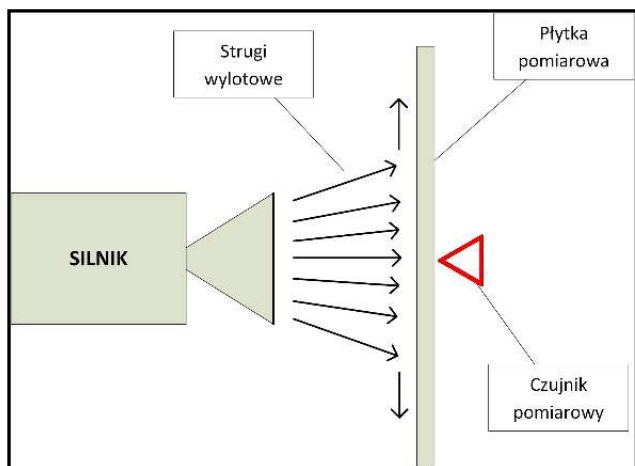
Pomiar ciągu – dwie metody

1. **Klasyczna** – z użyciem czujnika siły (silnik jest mechanicznie zamocowany do elementu, który przekazuje siłę do czujnika) – problemy: należy wyeliminować wszystkie zakłócające siły mogące wpłynąć na pomiar.
2. **Z użyciem „baffle plate”** – z użyciem płytki, która „zbiera” oddziaływanie gazów wylotowych silnika na nią a ta z kolei przekazuje siłę na czujnik



Schemat odpowiedniego doboru wielkości płytki pomiarowej:

- a) rozmiar nieodpowiedni - nie cały pęd strug przekazany płytce;
- b) rozmiar odpowiedni - całkowity pęd strug przekazany płytce i czujnikowi

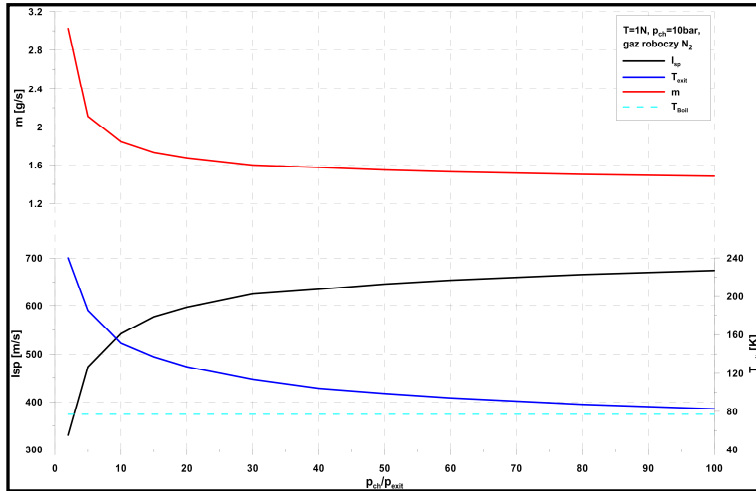


Badania eksperymentalne silnika typu „monopropelant” w zastosowaniu do pozycjonowania platformy robota kosmicznego

- napędy typu coldgas
- napęd typu resistojet

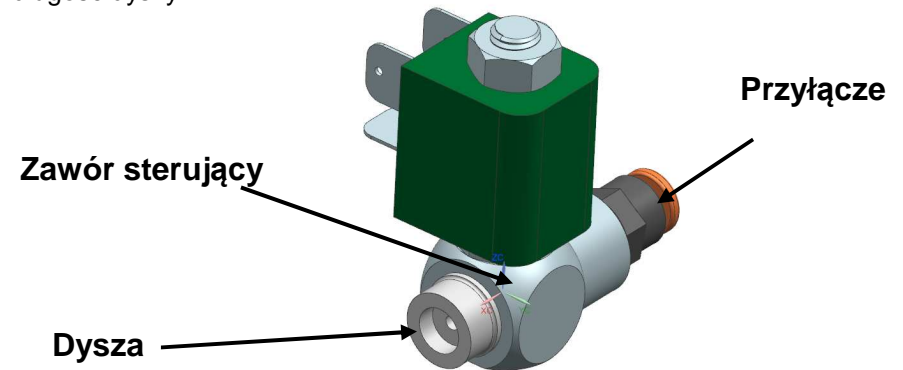
„Coldgas” zasilany gazowym azotem - założenia

Wielkość silnika typu „coldgas” o założonym ciągu można określić analizując możliwości napędowe gazu roboczego

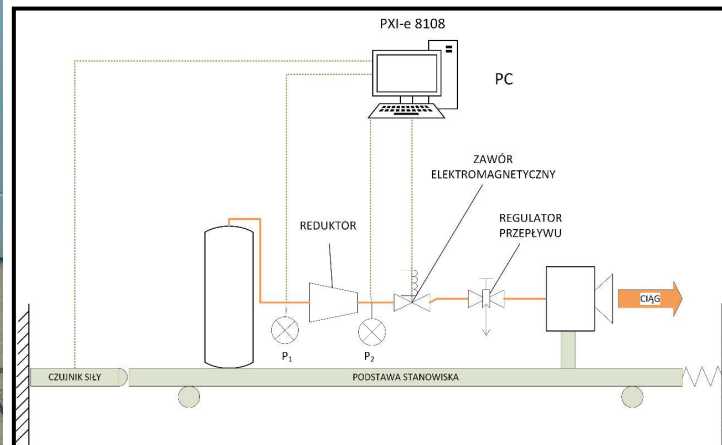


Parametry silnika:

- ciśnienie w komorze – 10bar;
- ciąg silnika – 1N;
- przepływ masowy – 1.85g/s
- impuls właściwy – 541.7m/s;
- średnica krytyczna –
- średnica wylotowa dyszy –
- długość dyszy –



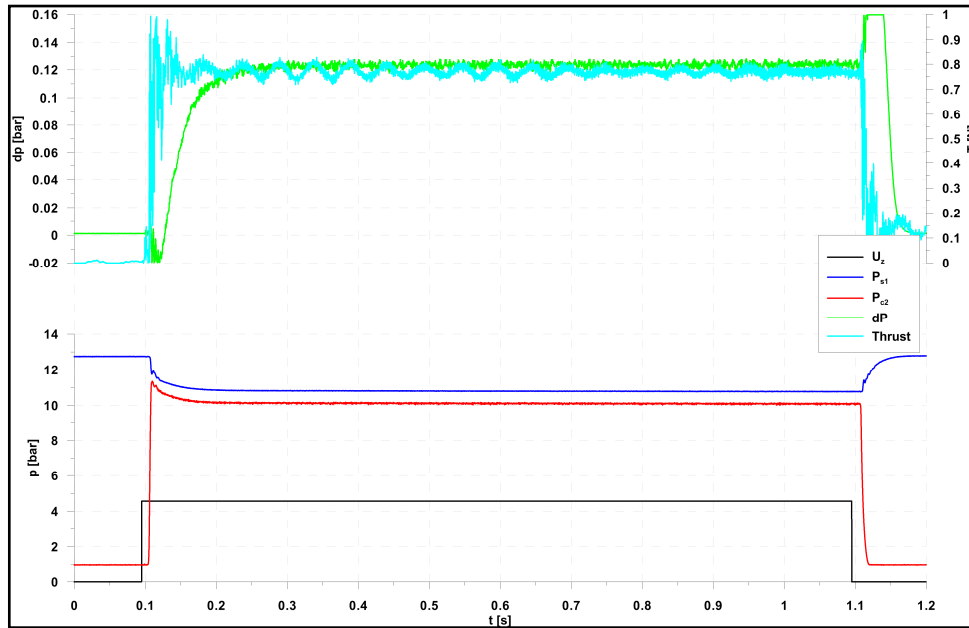
Schemat układu pomiarowego



Elementy systemu pomiarowego:

- pomiar ciśnienia w butli (Keller PAA 23 0÷20bar);
- pomiar ciśnienia w komorze silnika (Keller PAA 23, 0÷20bar);
- pomiar różnicy ciśnień na zwężce (Keller PD23, 0÷200mbar);
- czujnik siły (Kistler 9205, 0÷5N);
- karta pomiarowa NI USB 5263, 16kanałów AI, 1MHz/ch;
- sterowanie procesem - kartą NI

„Coldgas” – przykładowy przebieg eksperymentu

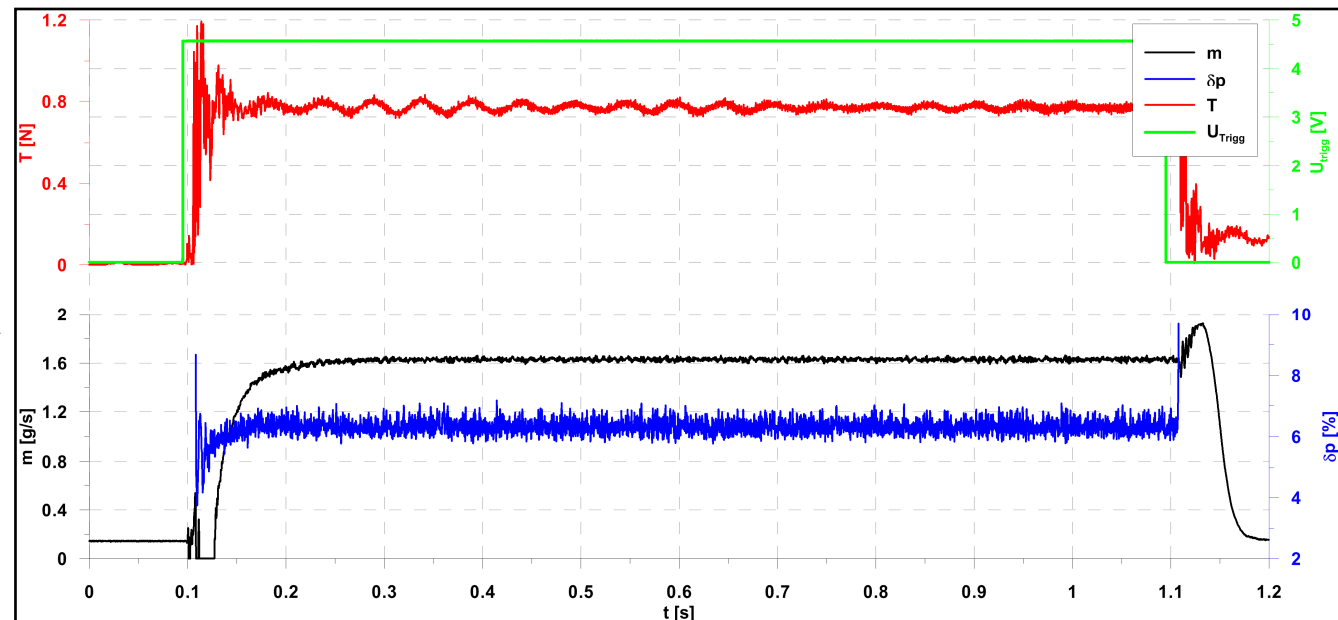


Wykres danych surowych

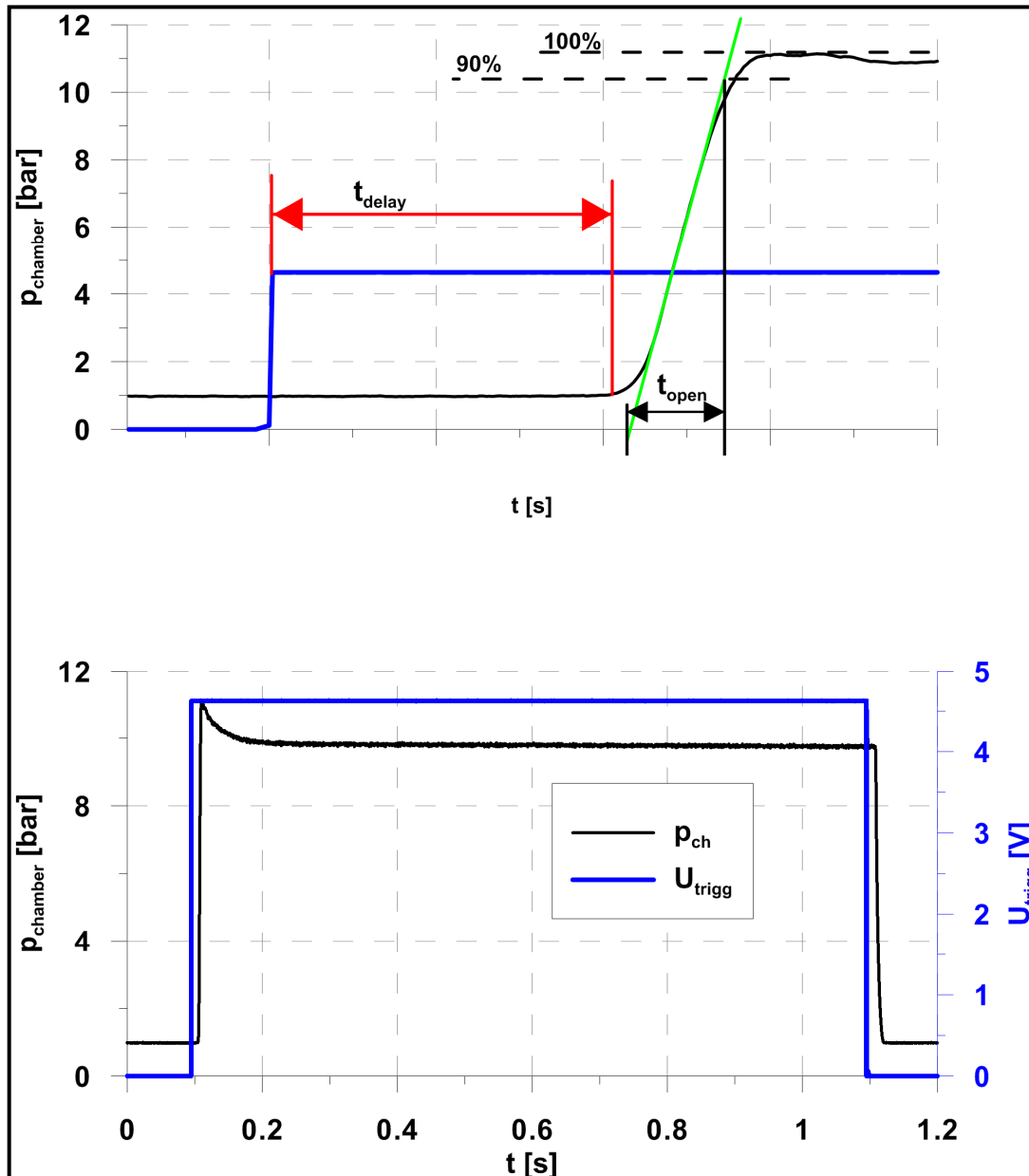
Wartości średnie parametrów silnika:

- ciąg – N;
- impuls właściwy – 481.2m/s (88.8%teoretycznego)
- wydatek masowy – g/s
- ciśnienie w komorze – 10.113bar (101% zakładanego)
- zakładany czas pracy w tym eksperymencie – 1s

Wykres danych zanalizowanych (Analyzed data plot)



„Coldgas” – dynamika silnika



Dynamiczne parametry silnika określone na podstawie badań:

- czas opóźnienia otwarcia (t_{delay})
- czas otwarcia (t_{open90})
- czas opóźnienia zamknięcia ($t_{c-delay}$)
- czas zamknięcia zaworu (t_{close})
- maksymalna częstotliwość działania w trybie PWM
- minimalna szerokość sygnału dla trybu PWM

Pierwsze wyniki eksperymentów pokazują wartości:

$$t_{delay} =$$

$$t_{open90} =$$

$$t_{close} =$$

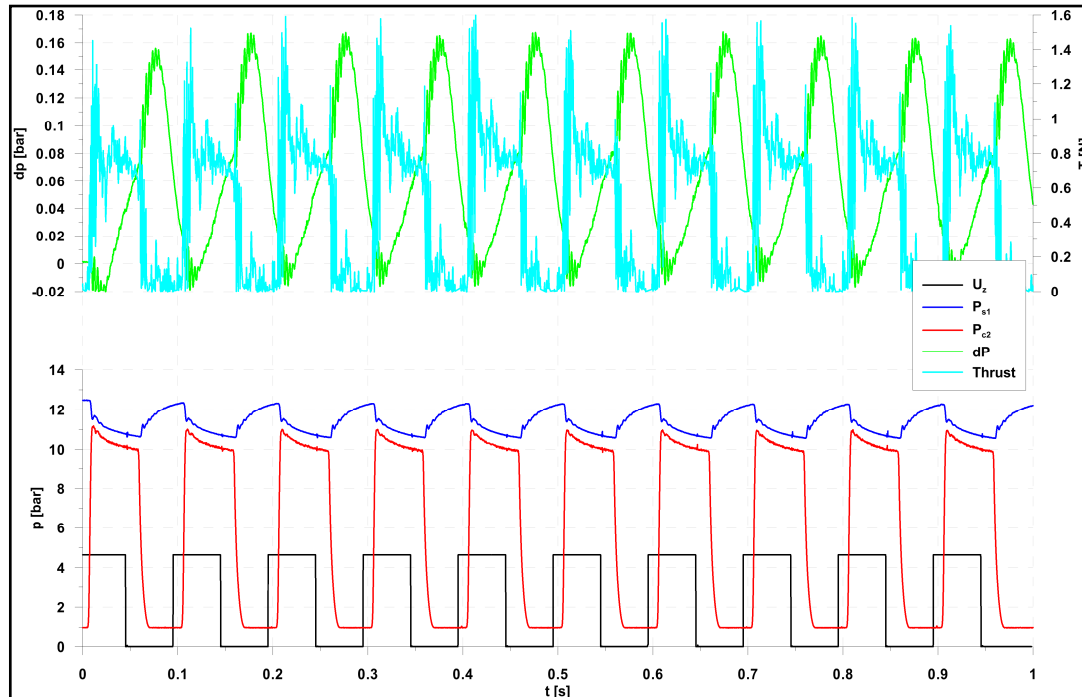


Minimalna szerokość impulsu

> ms

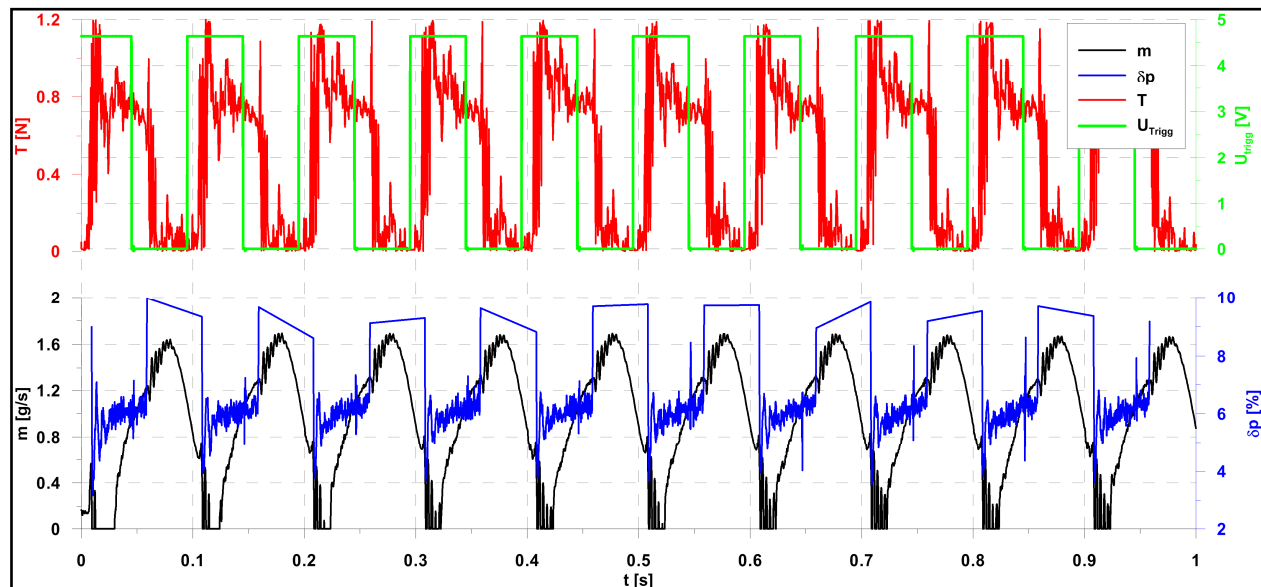
(rzeczywista ok. ms)

„Coldgas” – tryb PWM (Pulse-Width Modulation)

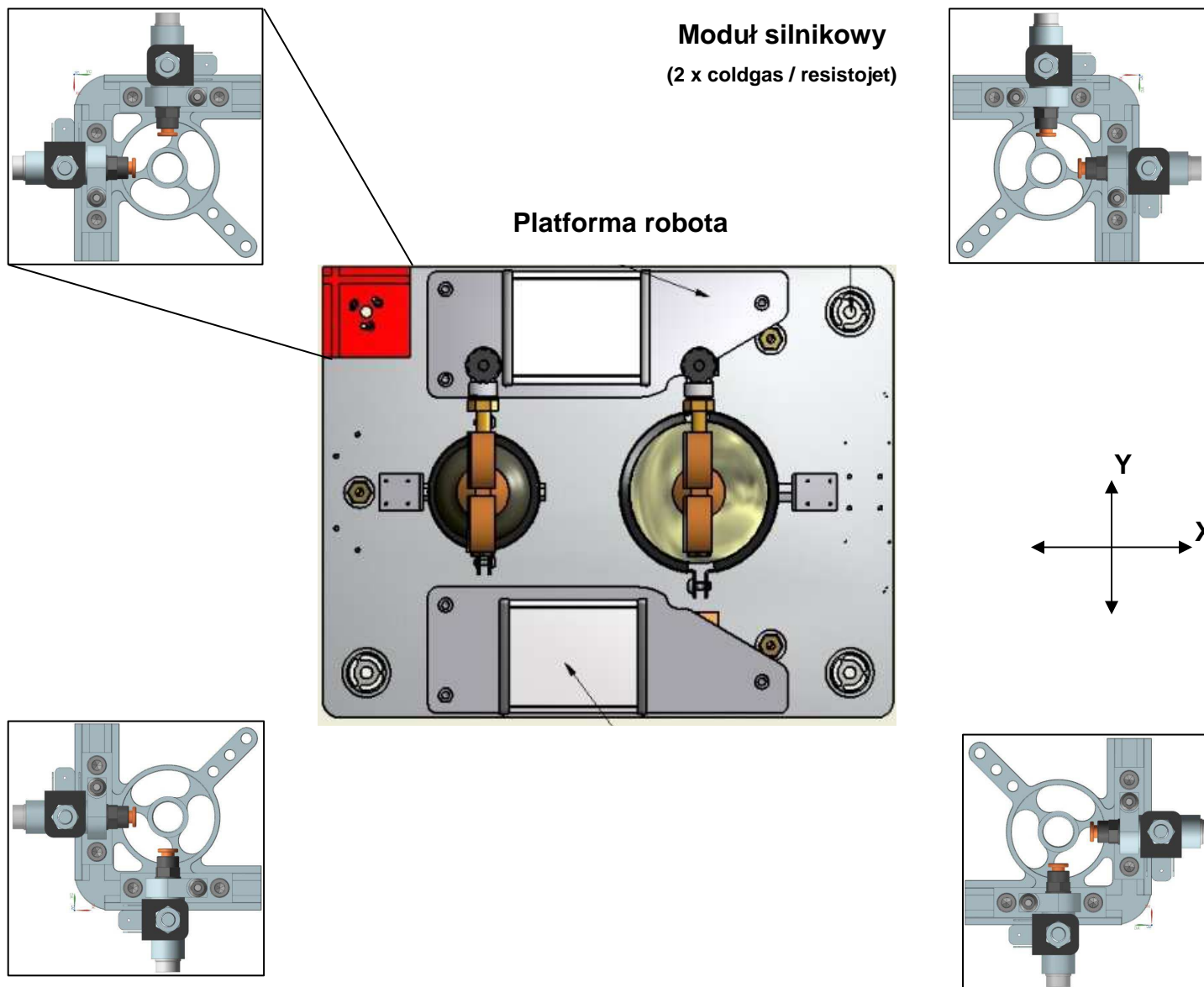


Częstotliwość pracy **10Hz**,
szerokość impulsu **50ms**

Uśrednione wartości zmierzone
(dla 1s działania silnika):

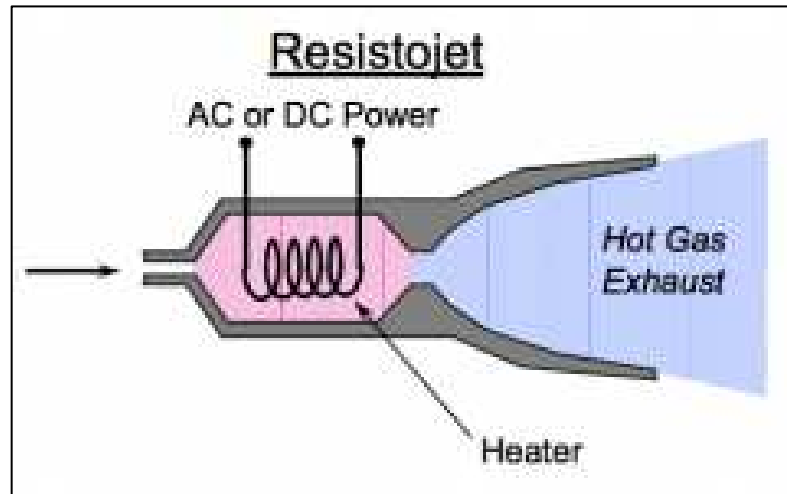


„Coldgas” – zastosowanie projektowanych silników projekt RR Space – budowa modelu robota kosmicznego



Resistojet – pierwsza przymiarka

Docelowym napędem do platformy robotycznej będzie napęd typu resistojet



Zasada pracy

(przepływ przez dyszę + ogrzewanie w komorze grzałką elektryczną – skąd energia?)

Przykładowe wykonanie - jeszcze nie nasze!!



PODSUMOWANIE I WNIOSKI

- Przedstawiono wyniki prac nad dwoma różnymi mikro napędami do zastosowań kosmicznych;
- Praca nad katalitycznym rozkładem nadtlenu wodoru (znanym już od wielu lat a dziś traktowanym jako tzw. „green propellant”) w zastosowaniu do napędów – to głównie opracowanie katalizatora i kompaktowego łoża katalitycznego oraz określenie ciągu w funkcji czasu oraz dynamicznych parametrów silnika;
- Silnik typu „coldgas” – prosty w konstrukcji, skuteczny w działaniu, optymalizacja dynamiki pracy silnika i minimalizacja masy;
- Przedstawiono wykorzystanie sterowania PWM (Pulse-Width Modulation) jako możliwości sterowania wielkością ciągu silnika;
- Praca w konsorcjach nad dużymi projektami, to szansa na konfrontację wiedzy z diametralnie różnych dziedzin i użycie jej w sposób bardziej praktyczny, jednocześnie wymusza pokazanie jej w sposób prosty i zrozumiały.

PODZIĘKOWANIA

Niniejsza praca jest finansowana przez NCBIr w ramach projektów PBS w konkursie nr 2 i nr 3:

- **System nawigacji wzajemnej satelitów na potrzeby ich serwisowania na orbicie oraz lotu w formacji**
- **Opracowanie i walidacja modelu laboratoryjnego robota kosmicznego zawierającego układ silników resistojet**

