

**Politechnika Warszawska
Instytut Techniki Ciepłej, MEiL, ZSL**

SEMINARIUM INSTYTUTOWE

**Problem pomiaru szybkozmiennych temperatur w
aplikacjach silnikowych – badania eksperymentalne**

Dr inż. Jan Kindracki

Warszawa, 17 grudzień 2013

Pomiary temperatury - wprowadzenie

Temperatura ciała jest parametrem stanu cieplnego, charakteryzującym zdolność jego przekazywania innym ciałom. Parametru tego nie można zmierzyć bezpośrednio i wyrazić jej w jednostkach absolutnych. Pomiar temperatury ciała można wykonać jedynie metodą pośrednią, tj. przez obserwację zmian wybranej właściwości fizycznej czynnika pomiarowego zwanego ciałem termodynamicznym lub substancją termodynamiczną.

Pomiar kontaktowy:

- **Termopary** (typu K, B, E, S, ...) – wytwarzanie napięcia na styku dwóch metali znajdujących się w różnych temperaturach
- Czujniki rezystancyjne (np.: Pt-100, Pt-200) – zmiana oporu elektrycznego
- Termometr cieczowy – zmiana objętości cieczy, gazu lub długości ciała stałego
- Farba zmieniająca kolor – zmiany barwy
- Termometr diodowy – zmiana parametrów złącza półprzewodnikowego

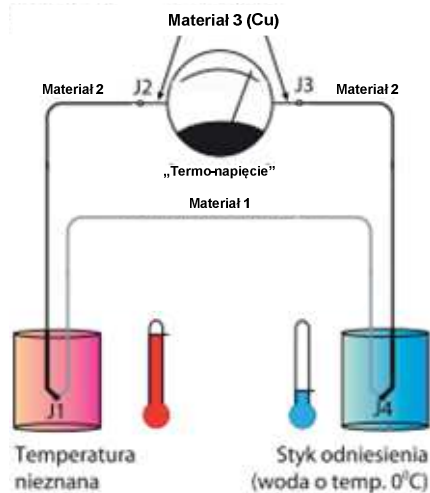
Pomiar bezkontaktowy:

- Pirometr (radiacyjny, fotoelektryczny, dwubarwny – zmiana długości fali promieniowana)

Pomiar temperatury termoparą – czyli jak to się robi

Zasada działania termopary

(rysunek na podstawie http://www.podkontrola.pl/download/akademia_automatyki_nr3-2009.pdf)

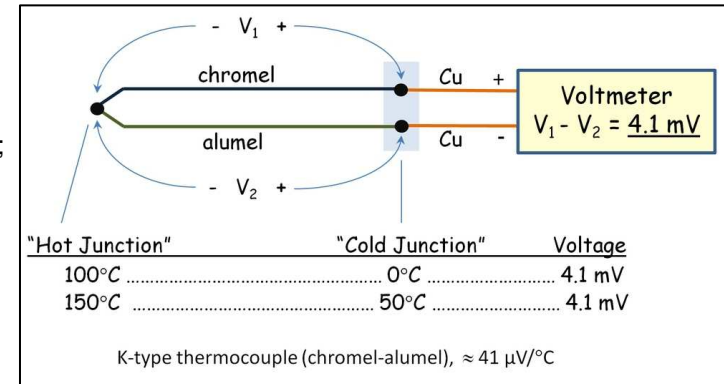


Zalety termopar:

- Prostota działania,
- Niezawodność;
- Niska cena (za wyjątkiem termopar z metali szlachetnych lub ziem rzadkich);
- Łatwość montażu na stanowisku pomiarowym;
- Typowa dokładność $\pm 1 \div 2^\circ\text{C}$ (wystarczająca w przemyśle)

Wady termopar:

- Niskie napięcie pomiarowe ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$);
- Przy zastosowaniu układów wzmacniających i poprawiających jakość sygnału – mała częstotliwość pomiaru;
- Wymagają styku odniesienia

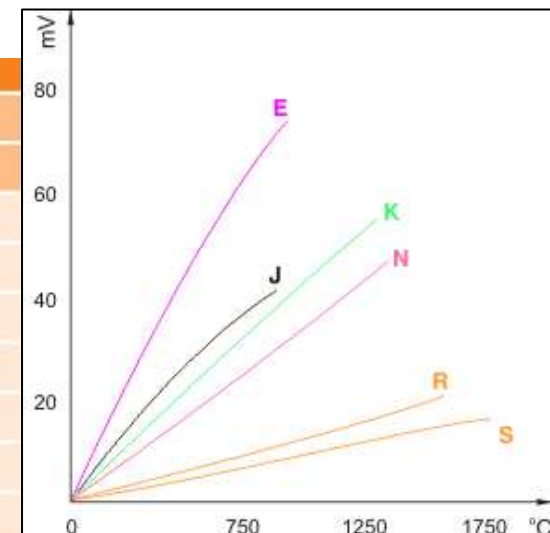


Źródło obrazka: <http://www.elektroda.pl/rtvforum/topic2335853.html>

Opis zakresów stosowalności i dokładności termopar

Źródło: http://www.podkontrola.pl/download/akademia_automatyki_nr3-2009.pdf

Typ termoelementu	Klasa 1		Klasa 2		Klasa 3	
	Zakres stosowania °C	Tolerancja °C	Zakres stosowania °C	Tolerancja °C	Zakres stosowania °C	Tolerancja °C
T Cu-CuNi	od -40 do +125 od +125 do +350	$\pm 0,5$ od -40 $\pm 0,004/t$	do +133 ± 1 od +133 do +350	od -67 $\pm 0,0075/t$	do +40 ± 1 od -200 do -67	$\pm 0,015/t$
E NiCr-CuNi	od -40 do +375 od +375 do +800	$\pm 1,5$ od -40 $\pm 0,004/t$	do +333 $\pm 2,5$ od +333 do +900	od -167 $\pm 0,0075/t$	do +40 $\pm 2,5$ od -200 do -167	$\pm 0,015/t$
J Fe-CuNi	od -40 do +375 od +375 do +750	$\pm 1,5$ od -40 $\pm 0,004/t$	do +333 $\pm 2,5$ od +333 do +750	$\pm 0,0075/t$		
K NiCr-Ni	od -40 do +375 od +375 do +1000	$\pm 1,5$ od -40 $\pm 0,004/t$	do +333 $\pm 2,5$ od +333 do +1200	od -167 $\pm 0,0075/t$	do +40 ± 2 od -200 do -167	$\pm 0,015/t$
N NiCrSi-NiSi	od -40 do +375 od +375 do +1000	$\pm 1,5$ od -40 $\pm 0,004/t$	do +333 $\pm 2,5$ od +333 do +1200	$\pm 0,0075/t$		
R PtRh13-Pt	od 0 do +1000 od +1100	± 1 od 0 $\pm (1+0,003$	do +600 $\pm 1,5$ od +600 do +1600	$\pm 0,0025/t$		
S PtRh10-Pt	do +1600	$(/t-1100))$				
B PtRh30-PtRh6		od +600	do +1700 od +800 do +1700	$\pm 0,0025 /t$ $\pm 0,005/t$	od +600 do +800	± 4



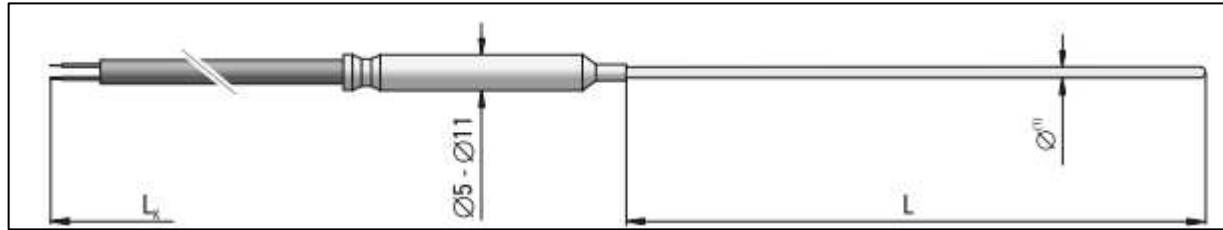
Źródło obrazka: http://www.termoaparatura.com.pl/pl/article/91/Czujniki_termoel_ektryczne___Termopary

Termopara płaszczowa typu K (producent Czaki) kontra typu E (Shock Wave)

Laboratory RWTH Aachen University)

Termopara typu K (Czaki)

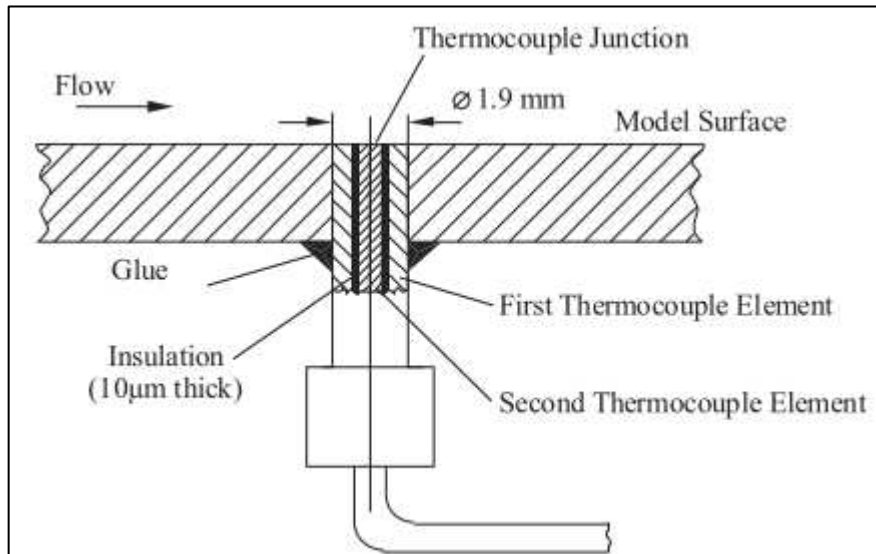
Źródło: http://www.czaki.pl/czaki2/plik/typ-201-202-203-204-205-206-czujniki-universalne-wykonane-z-termoelementow_nn3126.pdf



Widok rzeczywistej termopary typu E

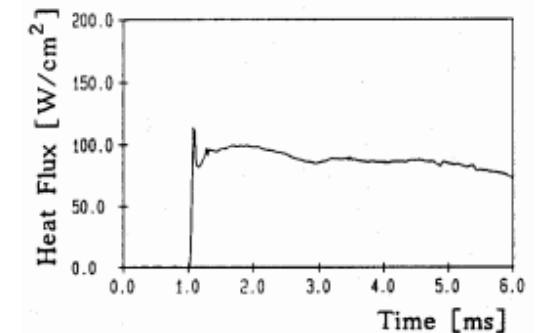
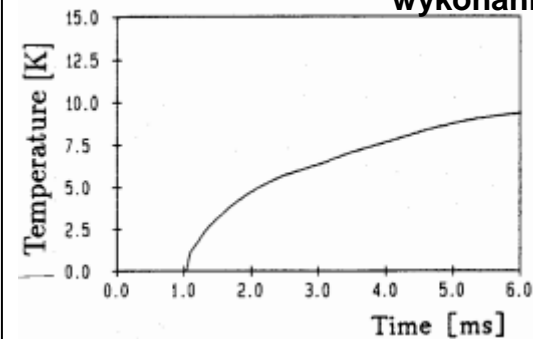


Budowa termopary typu E w wykonaniu SWL



Źródło obrazków: <http://www.swl.rwth-aachen.de/en/industry-solutions/thermocouples/>

Przykładowe charakterystyki dla termopary typu E w wykonaniu SWL

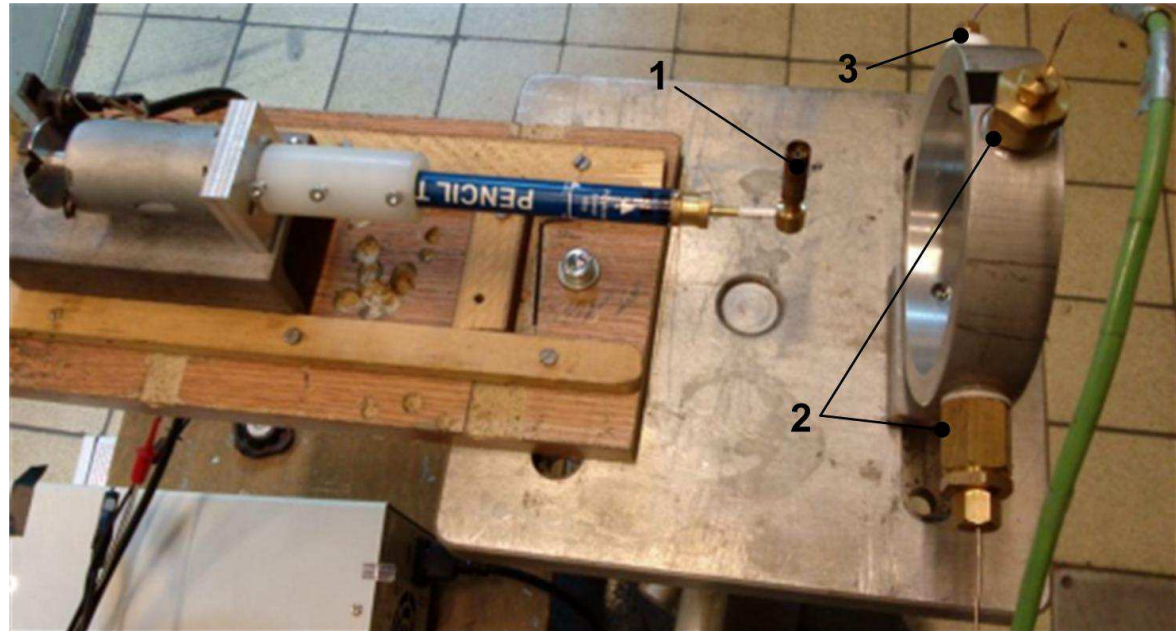


Stanowisko badawcze nr 1

a)



b)



c)

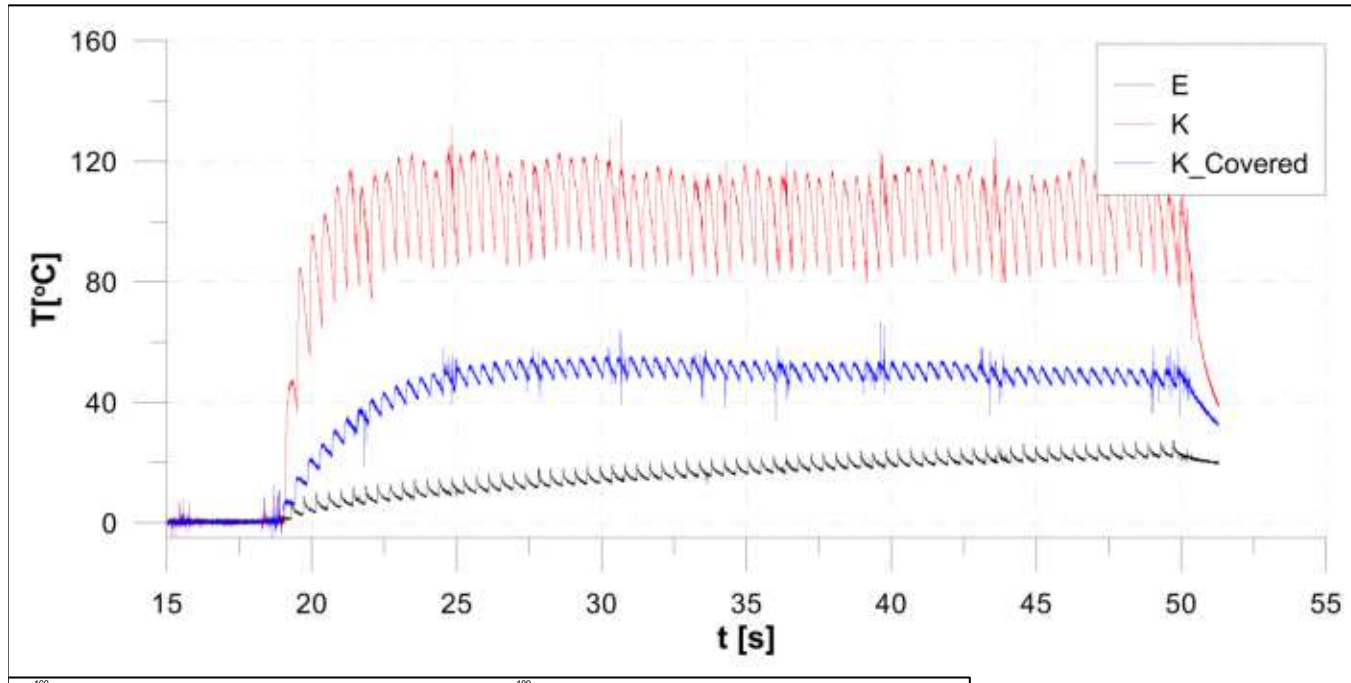


d)

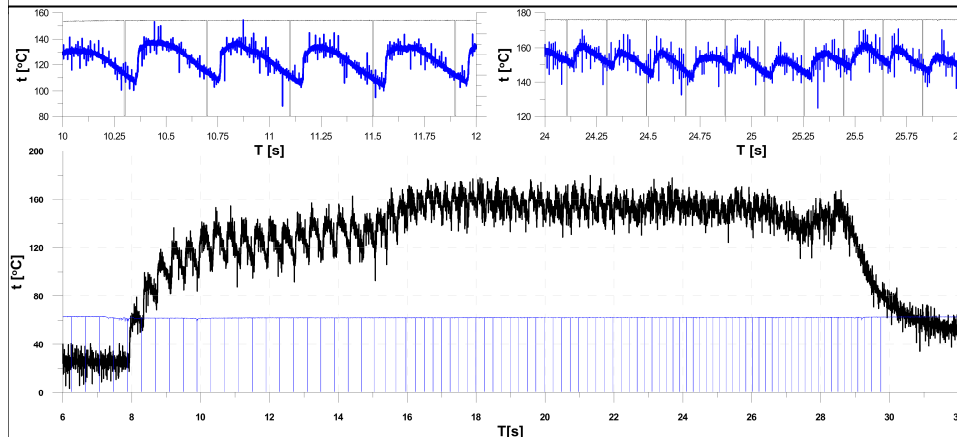


Widok stanowiska badawczego (a, b): 1 – obracający się palnik, 2 – termopara typu K z odkrytą i zakrytą spoiną pomiarową, 3 – termopara „coaxial” typu E; c) widok termopary typu E; d) płaszczowa termopara typu K.

Wyniki badań eksperymentalnych

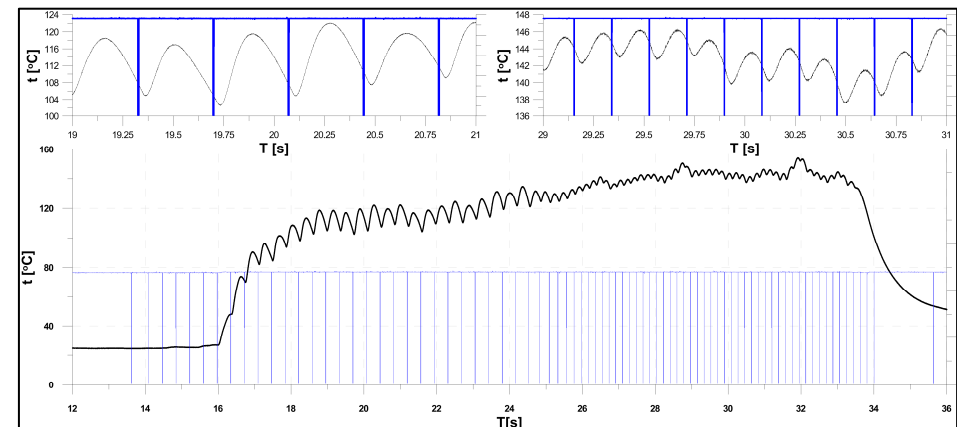


Przebieg zmian temperatur dla trzech różnych termopar: typu K odkrytej i zakrytej oraz termopary typu E dla częstotliwości wymuszenie cieplnego ok. 4Hz.



Przebieg zmian temperatur dla pomiaru termoparą typu K z odkrytymi złączami, bezpośrednio kartą pomiarową dla trzech różnych prędkości obrotowych palnika.

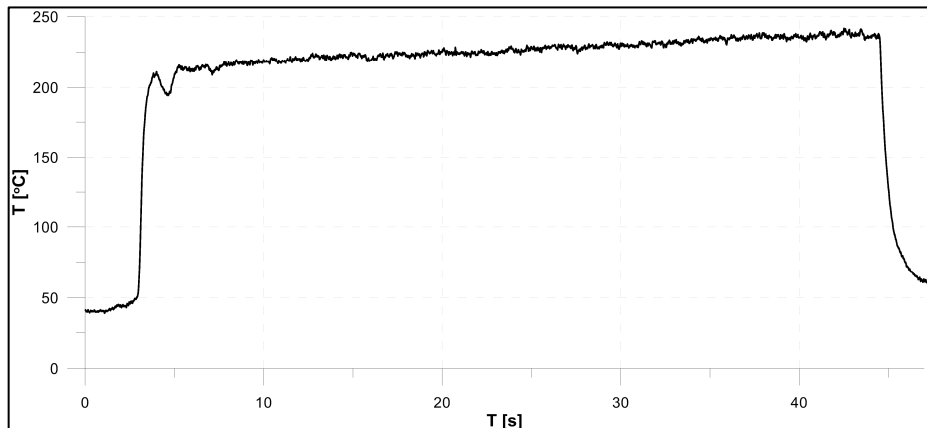
Przebieg zmian temperatur dla pomiaru termoparą typu K z odkrytymi złączami, z wykorzystaniem wzmacniacza dedykowanego do termopar TDC3000 (producent Czaki) dla dwóch różnych prędkości obrotowych palnika.



Modyfikacja stanowiska badawczego

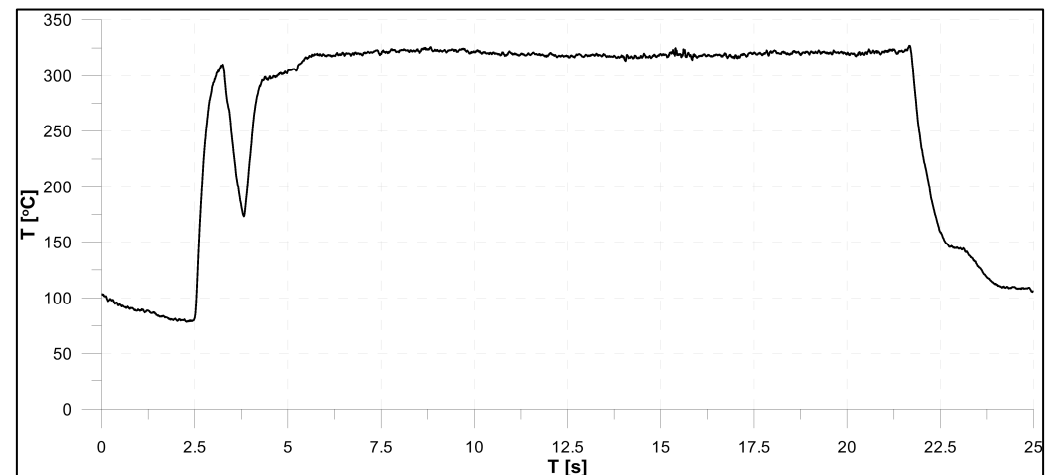
Modyfikacja polegała na zmianie elementu generującego strumień gorących gazów – gorące powietrze z wykorzystaniem grzania strumienia grzałką elektryczną

W badaniach używano rurki doprowadzającej gorące powietrze o dwóch różnych średnicach: 4 i 9mm

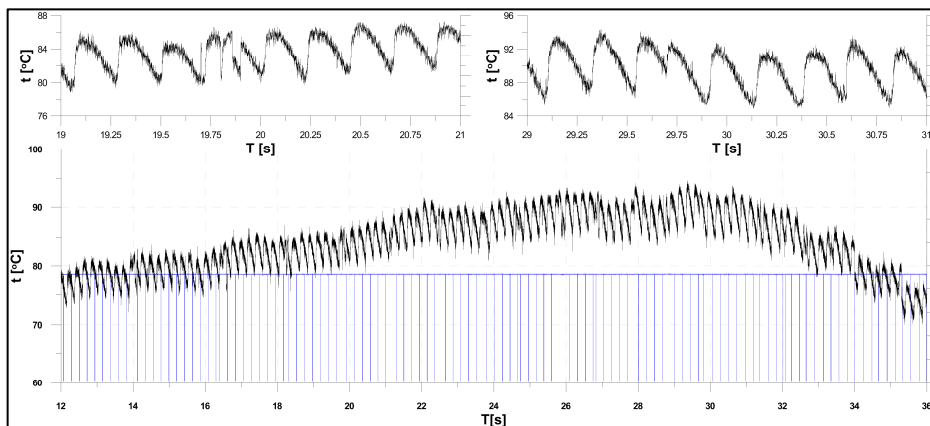


Przebieg mierzonej temperatury powietrza dla nieruchomej rurki z wylotem o średnicy 4mm i temperatury grzałki 400°C.

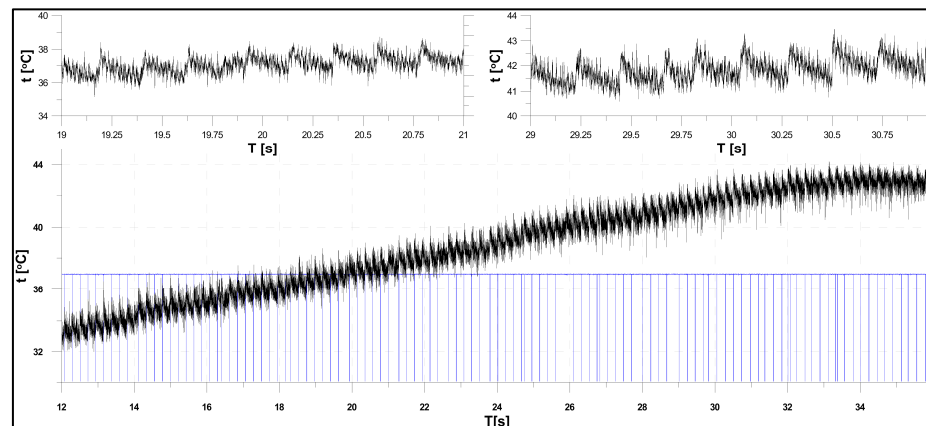
Przebieg mierzonej temperatury powietrza dla nieruchomej rurki z wylotem o średnicy 9mm i temperatury grzałki 400°C



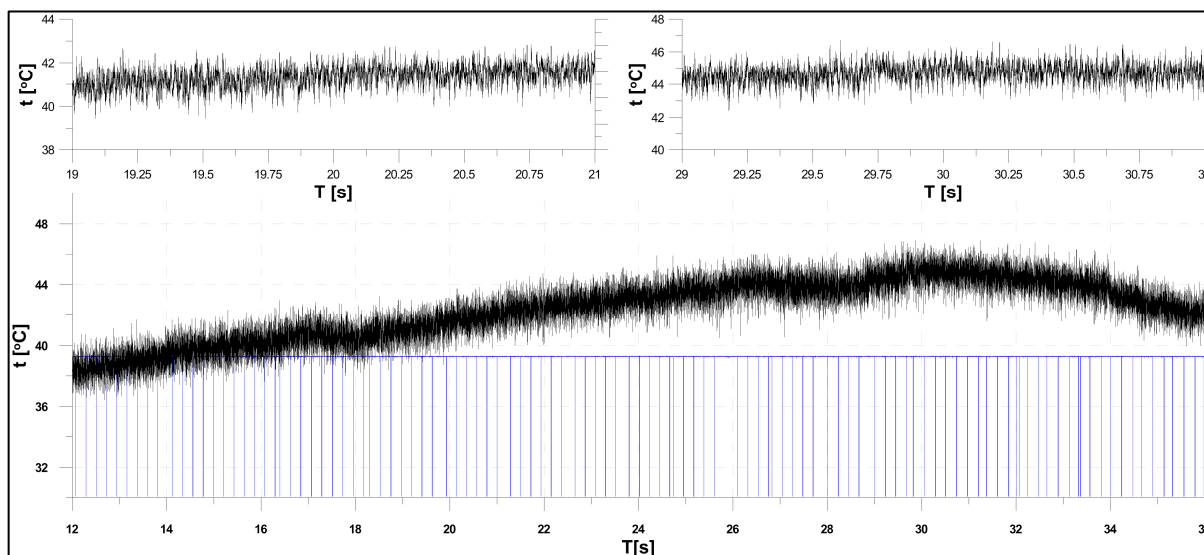
Wyniki eksperymentów



Przebieg mierzonej temperatury powietrza termoparą typu K z odkrytym złączem pomiarowym dla średnicy rurki wylotowej 9mm i różnych prędkości obrotowych, temperatura grzałki 500°C.



Przebieg mierzonej temperatury powietrza termoparą typu E dla średnicy rurki wylotowej 9mm i różnych prędkości obrotowych, temperatura grzałki 500°C.



Przebieg mierzonej temperatury powietrza termoparą typu K z zamkniętym złączem pomiarowym dla średnicy rurki wylotowej 9mm i różnych prędkości obrotowych, temperatura grzałki 500°C.

Obliczenia strumienia przekazywanego ciepła na podstawie pomiarów

$$\dot{q}_s(t_n) = \frac{2\sqrt{\rho ck}}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{T(t_i) - T(t_{i-1})}{(t_n - t_i)^{1/2} + (t_n - t_{i-1})^{1/2}}$$

Stała termopary typu „E”

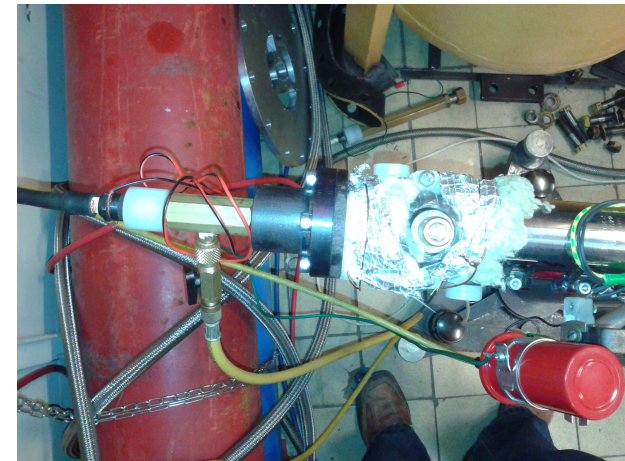
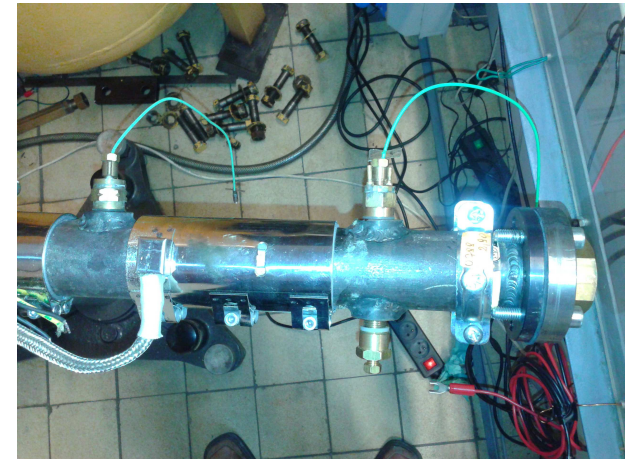
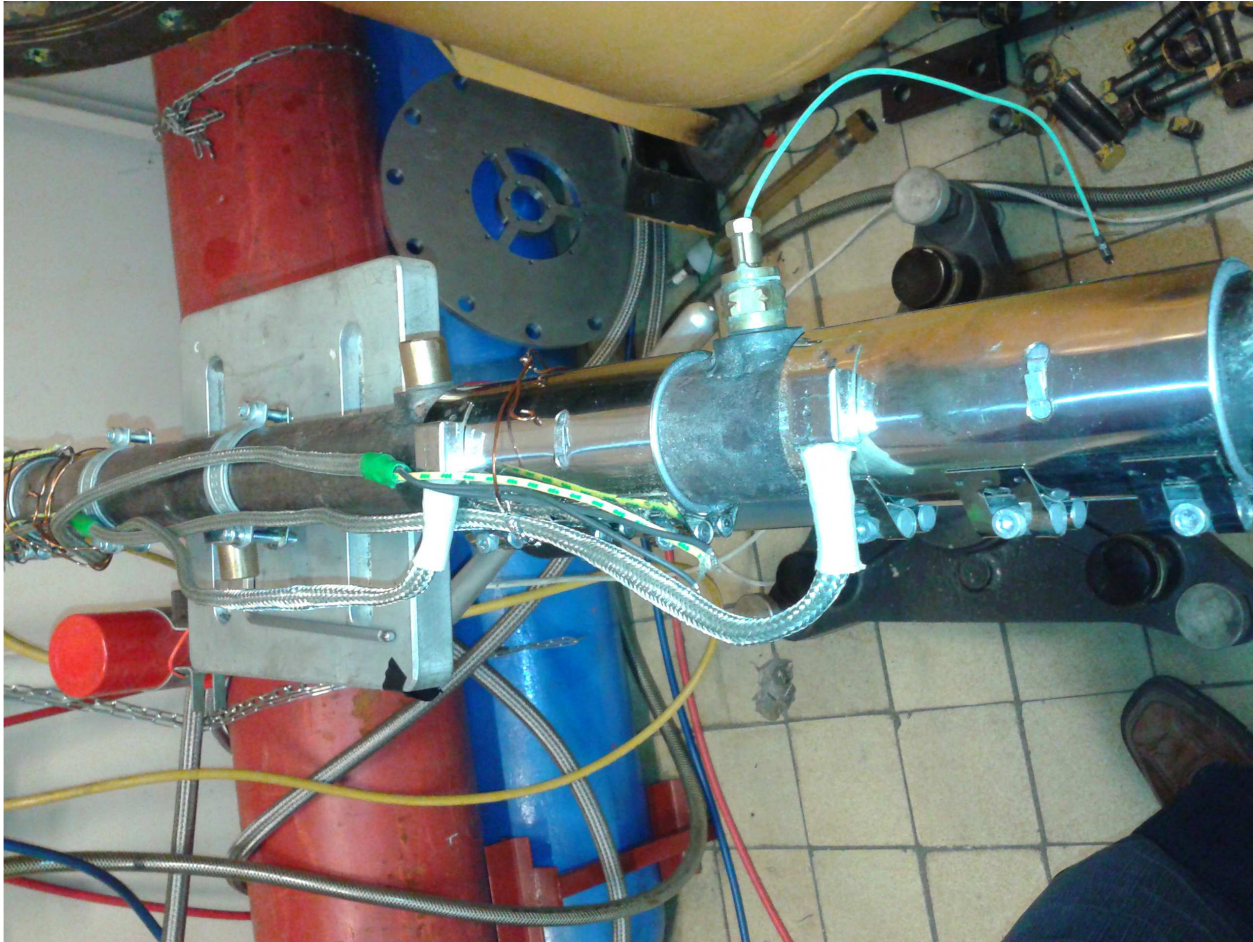
$$2\sqrt{\rho ck} = 8274 \frac{W\sqrt{s}}{m^2K}$$

Uzyskane wyniki obliczeń

$$\dot{q}_{s4} = 28,57 \frac{kW}{m^2}$$

$$\dot{q}_{s9} = 5,89 \frac{kW}{m^2}$$

Stanowisko badawcze nr 2 – badania fali uderzeniowej



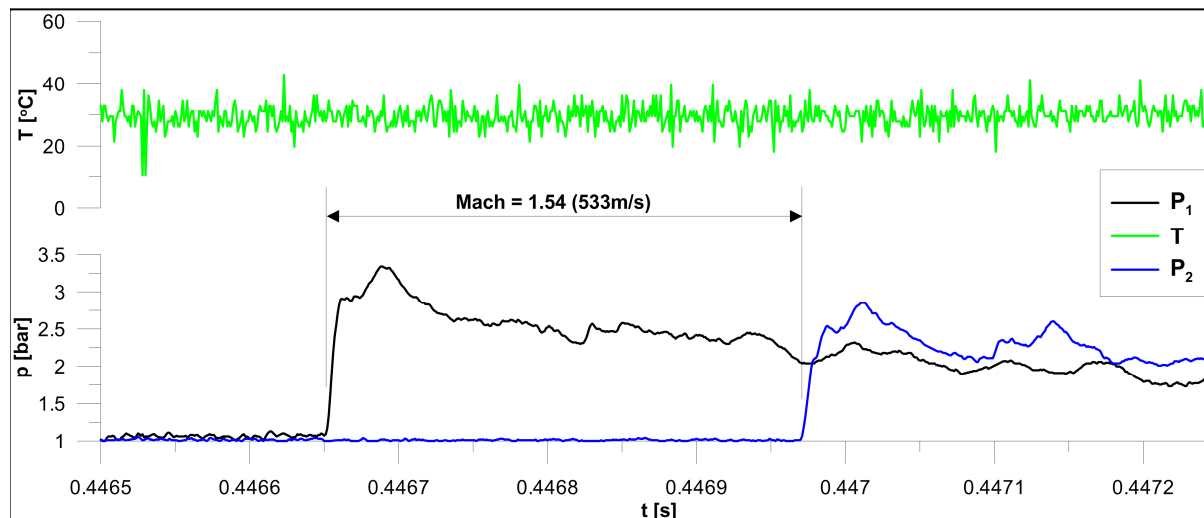
Widok stanowiska badawczego wykorzystującego falę uderzeniową: rura o średnicy 44mm i długości 1000mm.

Do pomiaru fali uderzeniowej wykorzystano dwa czujniki ciśnienia Kistler 603B (częstotliwość drgań własnych $>400\text{kHz}$, zakres pomiarowy 0-200bar)

Fala uderzeniowa generowana przez inicjator gazowy napełniany stechiometryczną mieszaniną acetylenowo – tlenową pod odpowiednim ciśnieniem

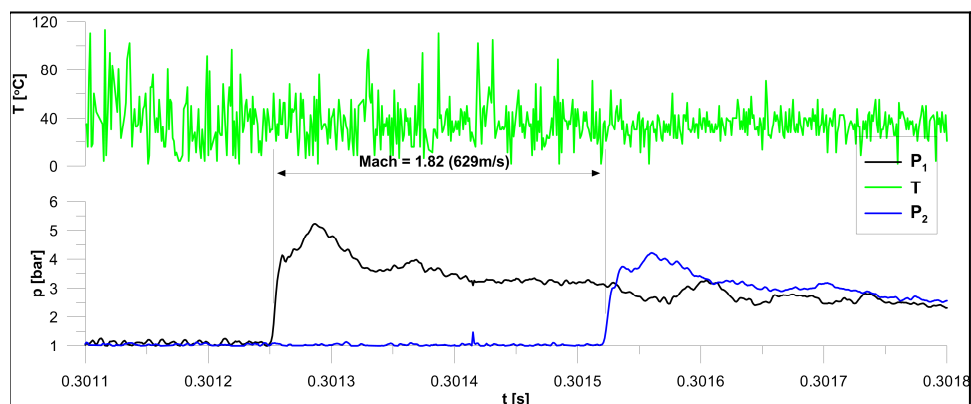
Pomiar tylko termoparą typu E, K z zakrytym i izolowanym złączem pomiarowym oraz K z odkrytą spoiną pomiarową

Wyniki eksperymentów – fala uderzeniowa

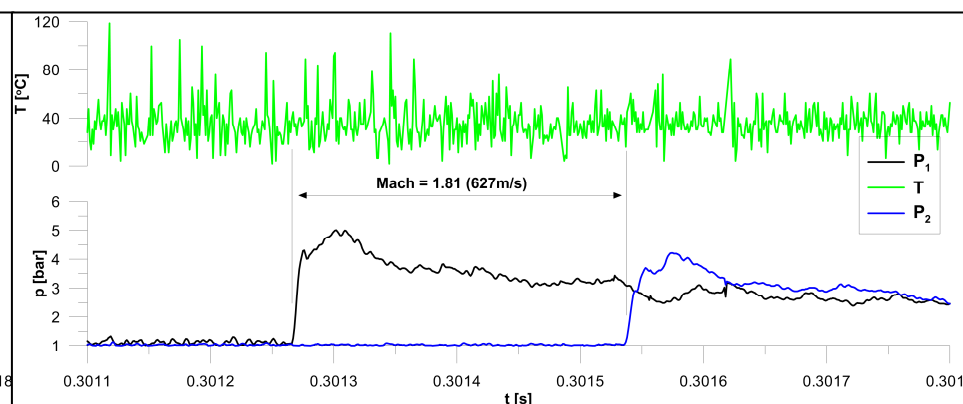


Przebieg propagacji fali uderzeniowej w rurze badawczej: ciśnienie P_1 i P_2 oraz temperatury dla czujnika temperatury typu E.

Teoretyczny stosunek temperatur
 $T_2/T_1 = 1.47 \Rightarrow T_2 = 178^\circ\text{C}$ (dla 20°C)
 (ale bardzo krótki czas działania !!!)



Przebieg propagacji fali uderzeniowej w rurze badawczej: ciśnienie P_1 i P_2 oraz temperatury dla czujnika temperatury typu K, ze złączem pomiarowym zamkniętym i izolowanym.



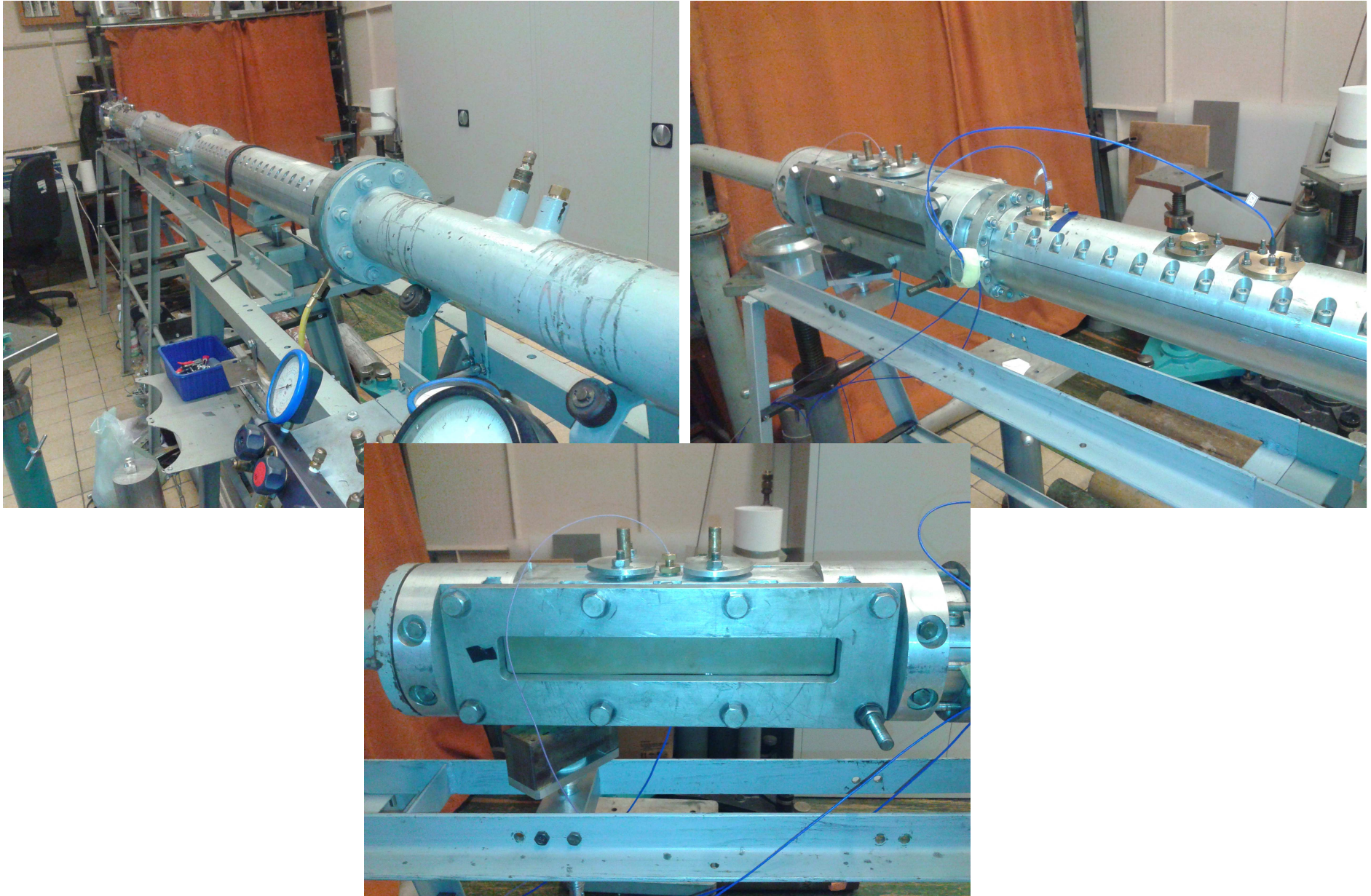
Przebieg propagacji fali uderzeniowej w rurze badawczej: ciśnienie P_1 i P_2 oraz temperatury dla czujnika temperatury typu K z odkrytym złączem pomiarowym.

Teoretyczny stosunek temperatur
 $T_2/T_1 = 1.66 \Rightarrow T_2 = 260^\circ\text{C}$ (dla 20°C)

(ale bardzo krótki czas działania i zbyt mała precyzja pomiaru z powodu zakłóceń sieci zasilającej!!!)

Stanowisko badawcze nr 3 – fala detonacyjna

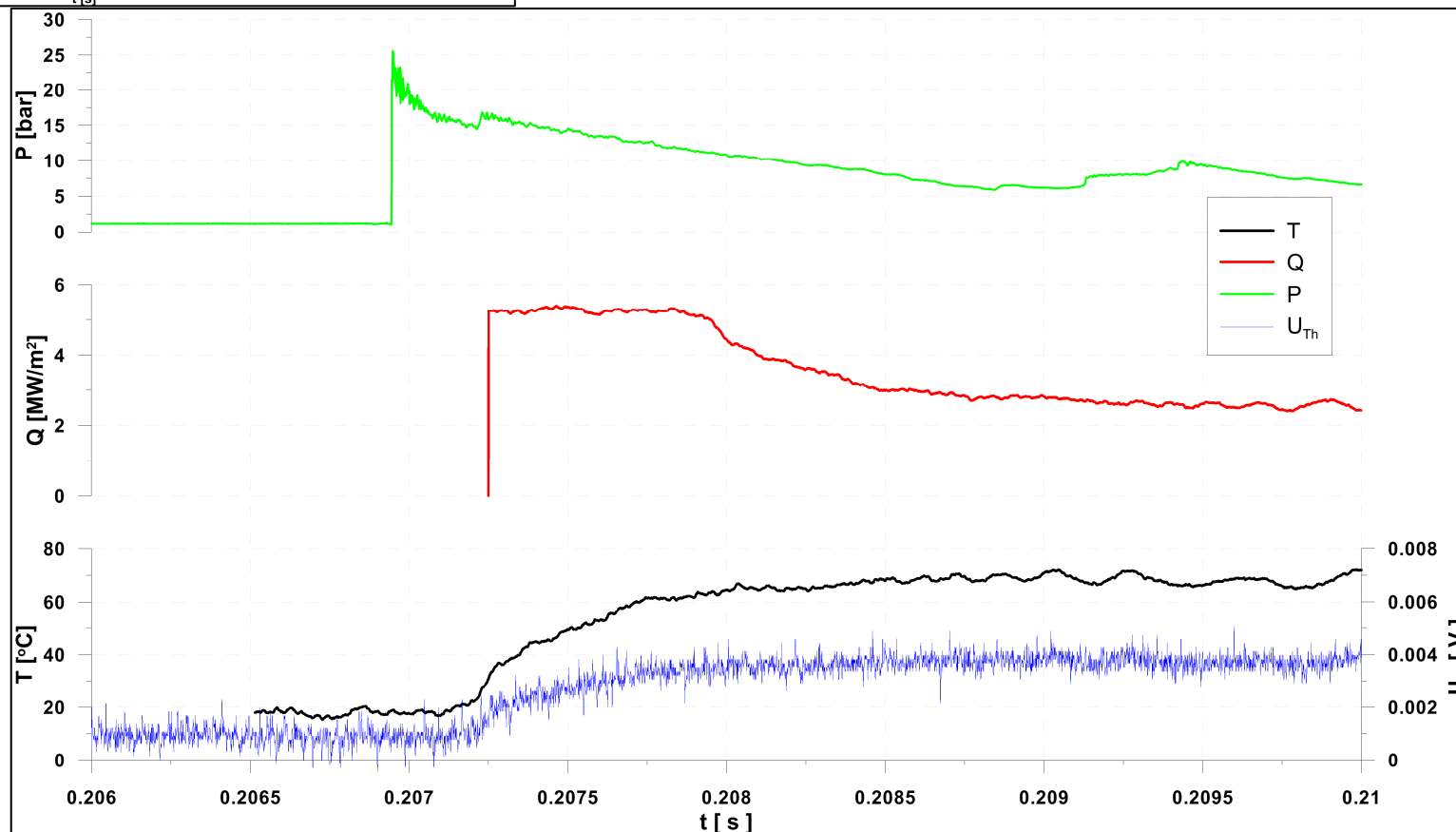
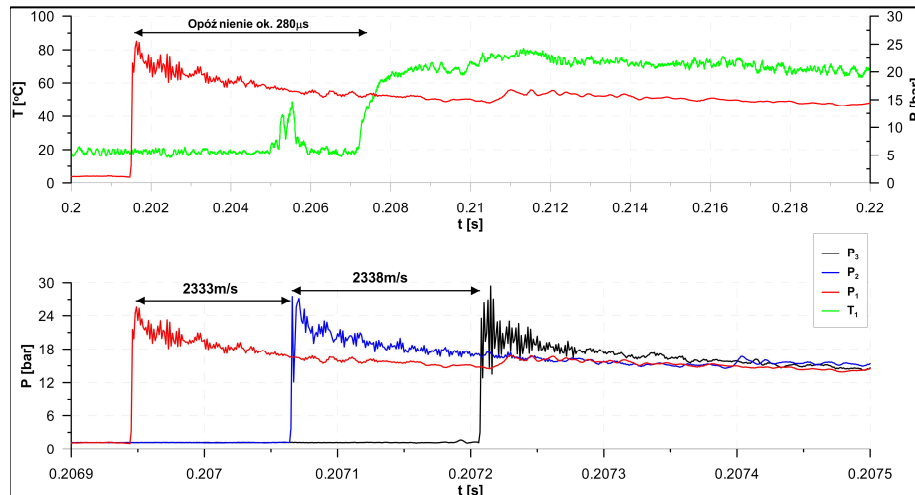
Rura detonacyjna o długości 3m, przekroju kwadratowym, zapłon mieszaniny – świeca zapłonowa, czujniki: trzy czujniki PCB do pomiaru ciśnienia oraz termopara typu E umieszczona w tym samym przekroju pomiarowym co ostatni z czujników



Fala detonacyjna – wyniki badań eksperymentalnych

Mieszanka H_2+O_2 , 50%vol H_2 , $p_0=1.6\text{bar}$

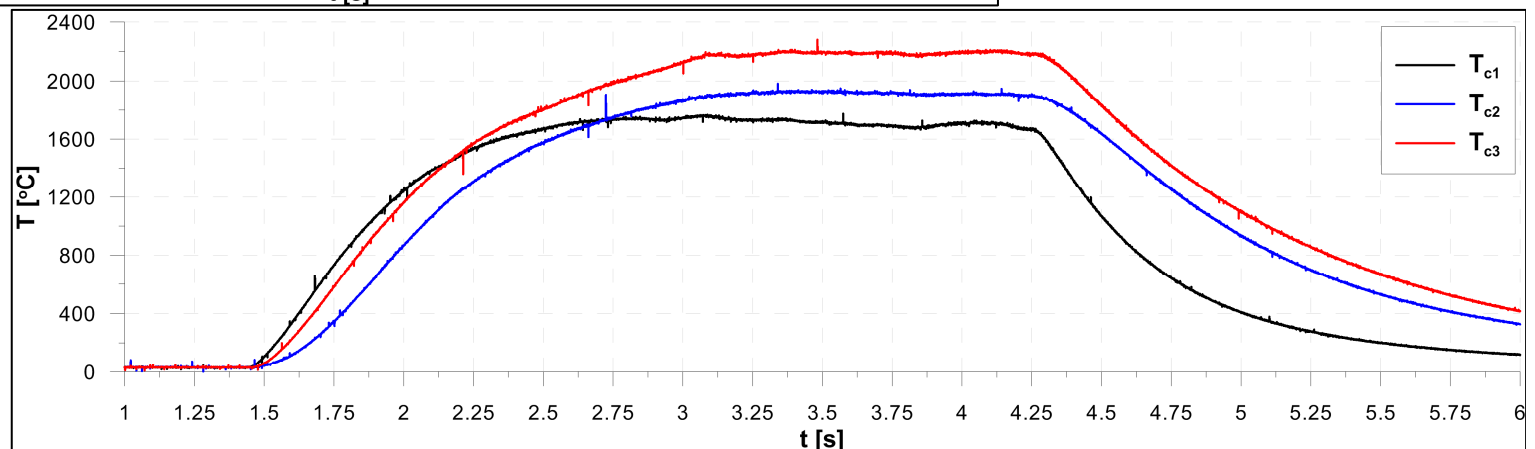
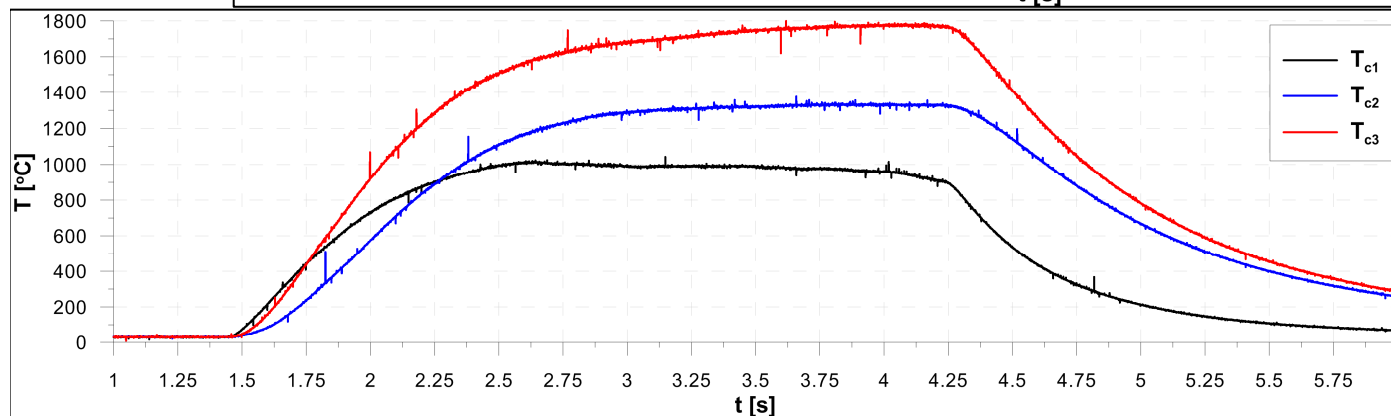
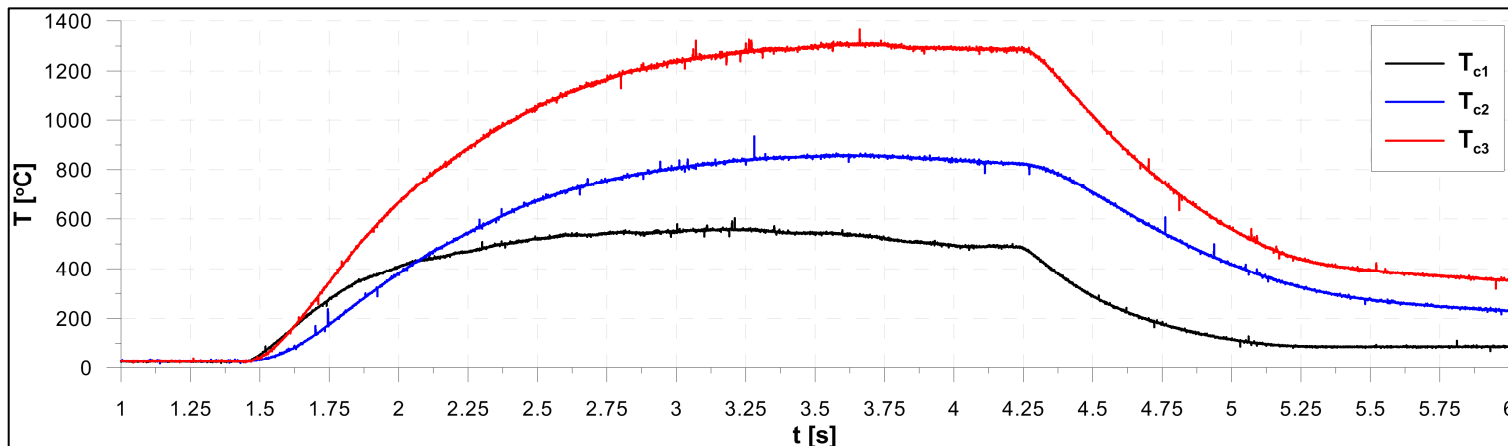
$V_{CJ}=2338\text{m/s}$, $p_{CJ}=28.9\text{bar}$



Podsumowanie i wnioski

- Prawidłowy pomiar temperatur szybkozmiennych jest niezmiernie trudny;
- Używać należy bardzo szybkich przetworników (wzmacniaczy) z wykluczeniem sprzętowego oraz programowego przetwarzania napięcia na temperaturę podczas pomiarów lub mierzyć bezpośrednio z wykorzystaniem szybkiej karty pomiarowej z dużą częstotliwością próbkowania;
- Do pomiarów gdzie występują szybkie zmiany ciśnienia (fale uderzeniowe lub detonacyjne) klasyczna termopara (spoina pomiarowa w postaci „kuleczki”) nie sprawdza się gdyż może ulec zniszczeniu, natomiast mają tu zastosowanie wszelkie termopary w wykonaniu specjalnym;
- Dzięki użyciu termopary TE 60-4 (typ E) w specjalnym wykonaniu możliwy jest pomiar strumienia ciepła – dla szybkich zmian tylko przez maksymalnie 20ms, dla pomiarów quasi-ustalonych (temperatura ścianki komory od zewnętrznej strony) praktycznie w sposób ciągły;
- „Bezpośredni” pomiar strumienia ciepła pozwala na łatwy dobór układu i metody chłodzenia ścianek komory spalania silnika

A z ciekawostek – pomiar temperatury termoparą typu K, która wg producenta pozwala mierzyć temperatury do 1100°C



PODZIĘKOWANIA

Niniejsza praca jest współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, poprzez realizację projektu „Program rozwoju dydaktycznego Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej”.

Autor pragnie także podziękować studentowi Mieszkowi Klimaszewskiemu za pomoc w czasie realizacji niniejszych badań,

A także doktorantowi Dominikowi Kublikowi z możliwością skorzystania ze stanowiska badawczego do badania detonacji i wyniku eksperymentu wykorzystującego pomiar temperatury

