



SEMINARIUM INSTYTUTOWE

# **Badania eksperymentalne wirującej detonacji w mieszaniu ciekłego paliwa z powietrzem**

**Dr inż. Jan Kindracki**

**Warszawa, 27 listopad 2012**

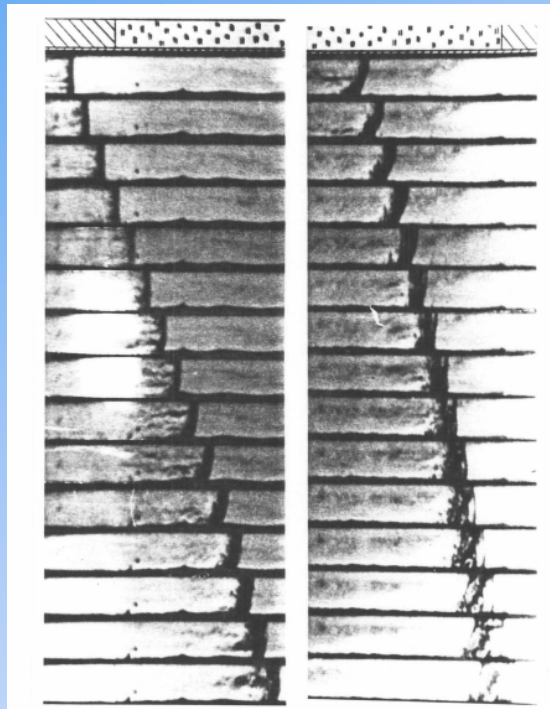
# WPROWADZENIE DO TEMATYKI DETONACJI



**DEFLAGRACJA** – front płomienia propaguje z prędkością poddźwiękową względem świeżej mieszanki, ciśnienie i gęstość za frontem fali maleją (przykład: palenie się świecy, spalanie w silnikach spalinowych, raketowych, spalanie paliwa w kotłach energetycznych)



**DETONACJA** – front płomienia propaguje z prędkością naddźwiękową względem świeżej mieszanki, ciśnienie i gęstość za frontem fali rosną (spalanie w silniku PDE, RDE, niektóre postaci wybuchów przemysłowych)

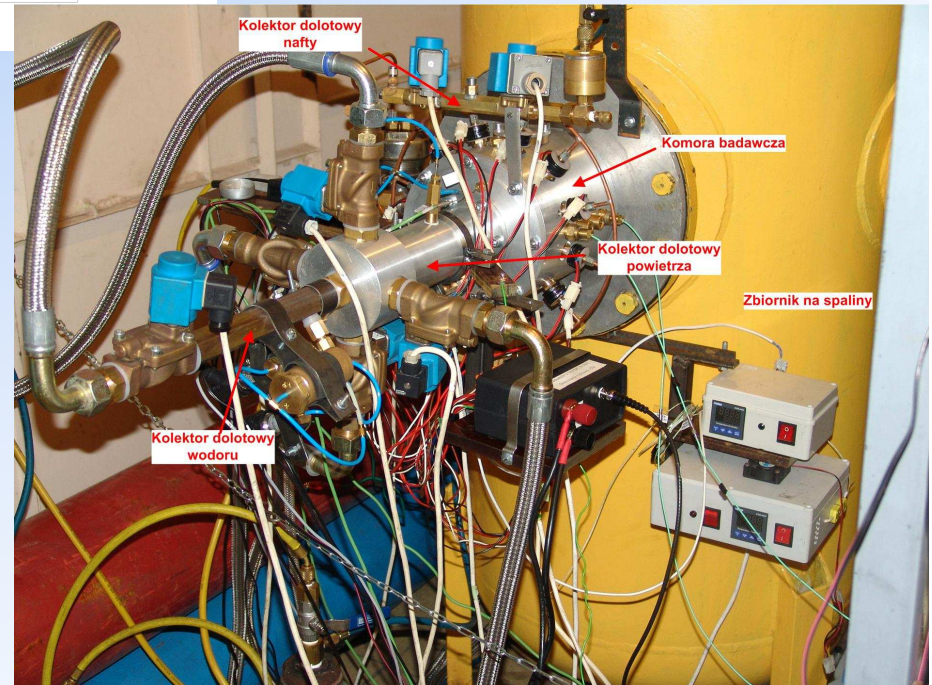
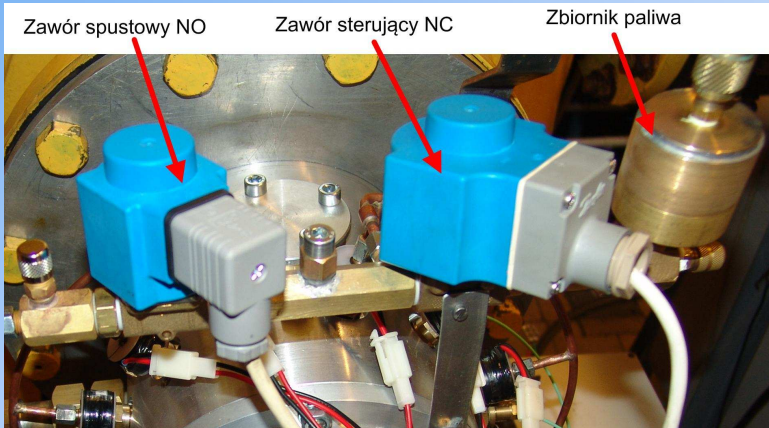
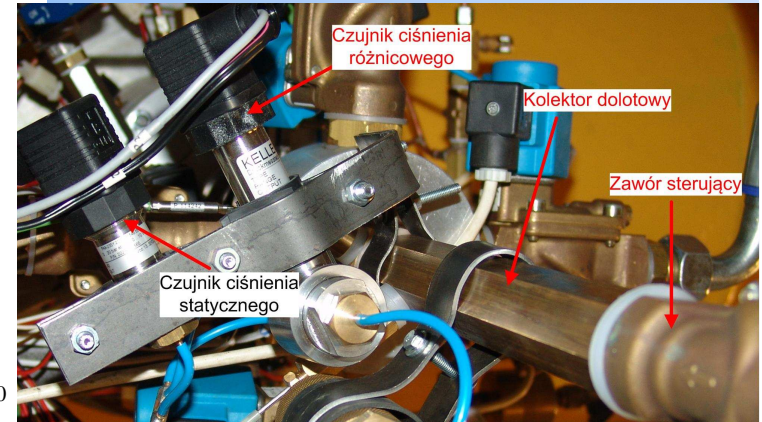
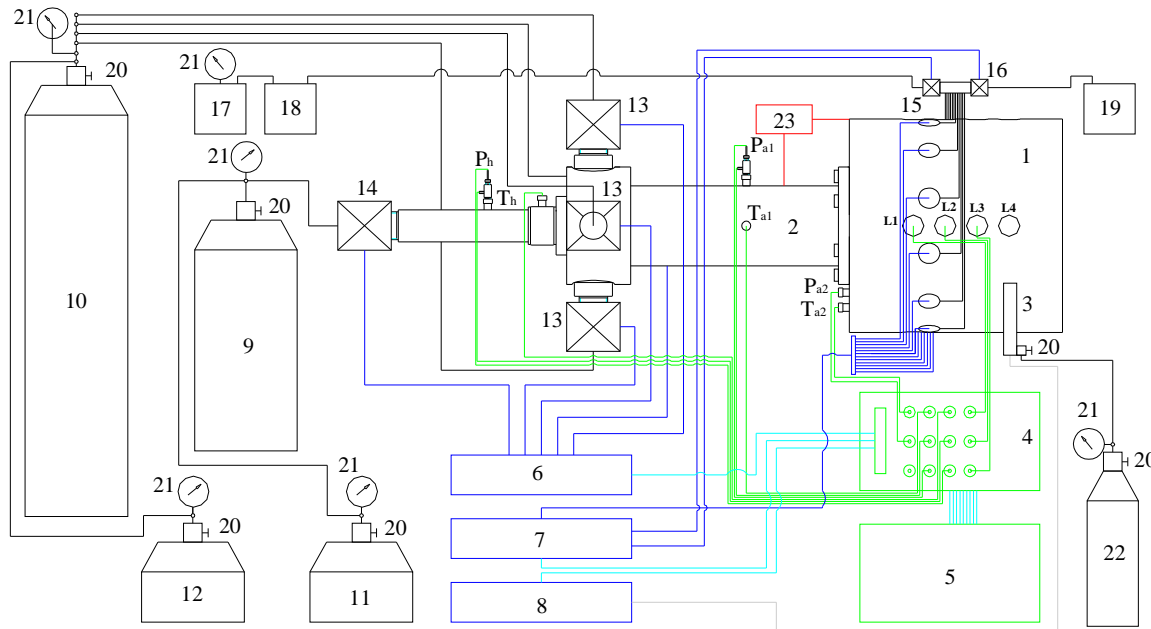


Nasze klasyczne  
wyobrażenia  
detonacji

Detonacja



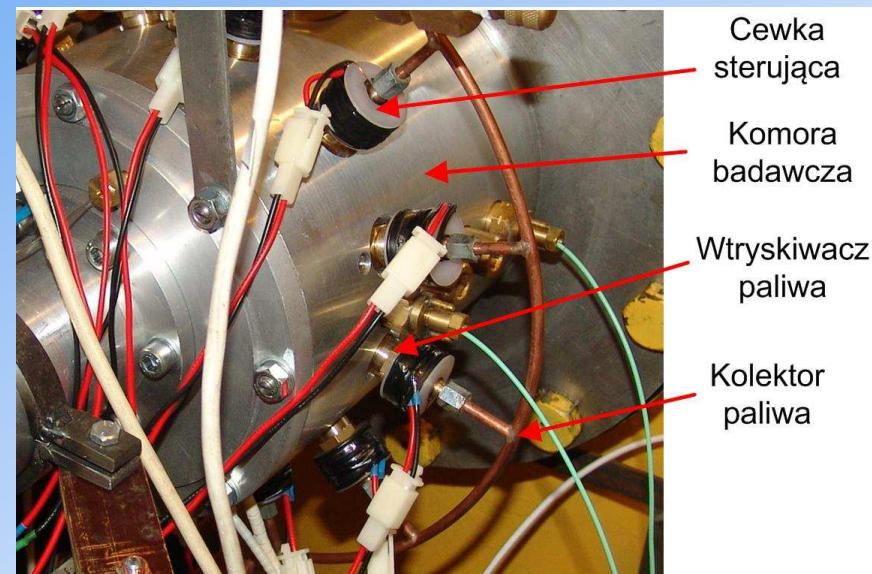
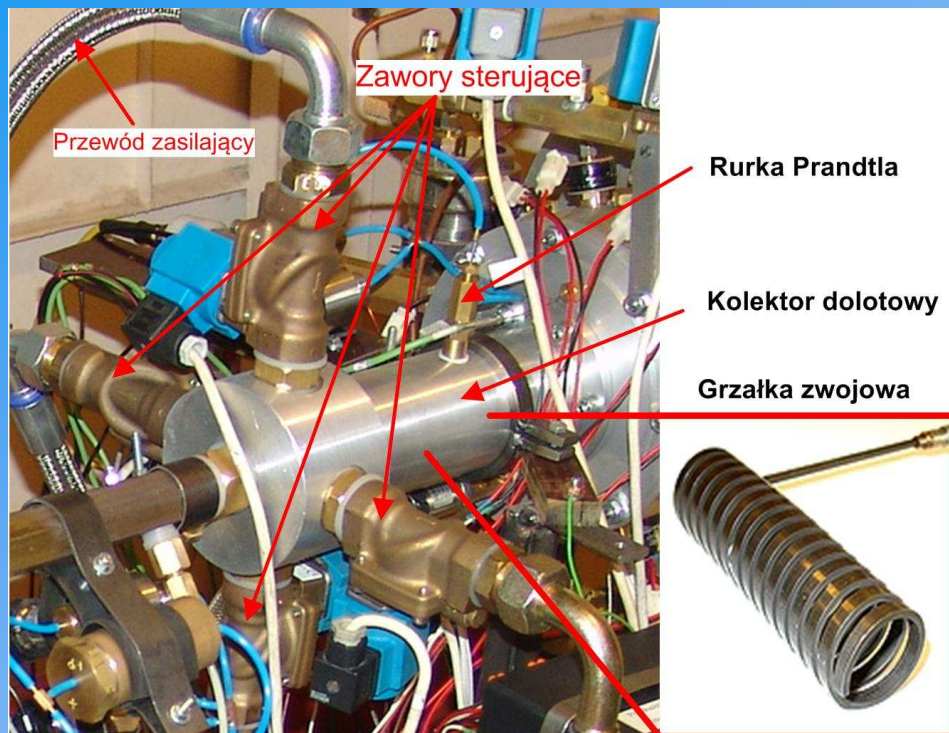
# STANOWISKO BADAWCZE



1 – komora badawcza, 2 – nagrzewnica powietrza, 3 – inicjator, 4 – karta pomiarowa, 5 – komputer, 6, 7 – zasilacz DC, 8 – sterownik świecy zapłonowej, 9 – butla niskiego ciśnienia z wodorem, 10 – butla niskiego ciśnienia z powietrzem, 11 – butla wysokiego ciśnienia z wodorem, 13 – zawory sterujące elektromagnetyczne powietrza, 14 – zawór sterujące elektromagnetyczny wodoru, 15 – zawór elektromagnetyczny NC dla nafty, 16 – zawór elektromagnetyczny NO dla nafty, 17 – zbiornik ciśnieniowy azotu, 18 – zbiornik zasilający naftę, 19 – zbiornik przelewowy nafty, 20 – zawór kulowy ręczny, 21 – manometr, 22 – butla z mieszaniną inicjującą, 23 – sterownik grzałek.



# PARAMETRY I OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO



**Czujniki ciśnienia:** Kistler 603B sztuk 3, zakres pomiarowy 0÷200bar (zainstalowane w oprawkach chłodzonych wodą w obiegu otwartym max 4bar, z monitoringiem temperatury oprawki czujnika);

**Czujniki temperatury:** termopary typu K (Czaki), zakres pomiarowy zredukowany do 400°C za pomocą programowalnych wzmacniaczy TED-38;

**Termoregulator:** ESM 4420 z regulacją typu On/Off oraz PID z funkcją autoadaptacji parametrów regulatora PID;

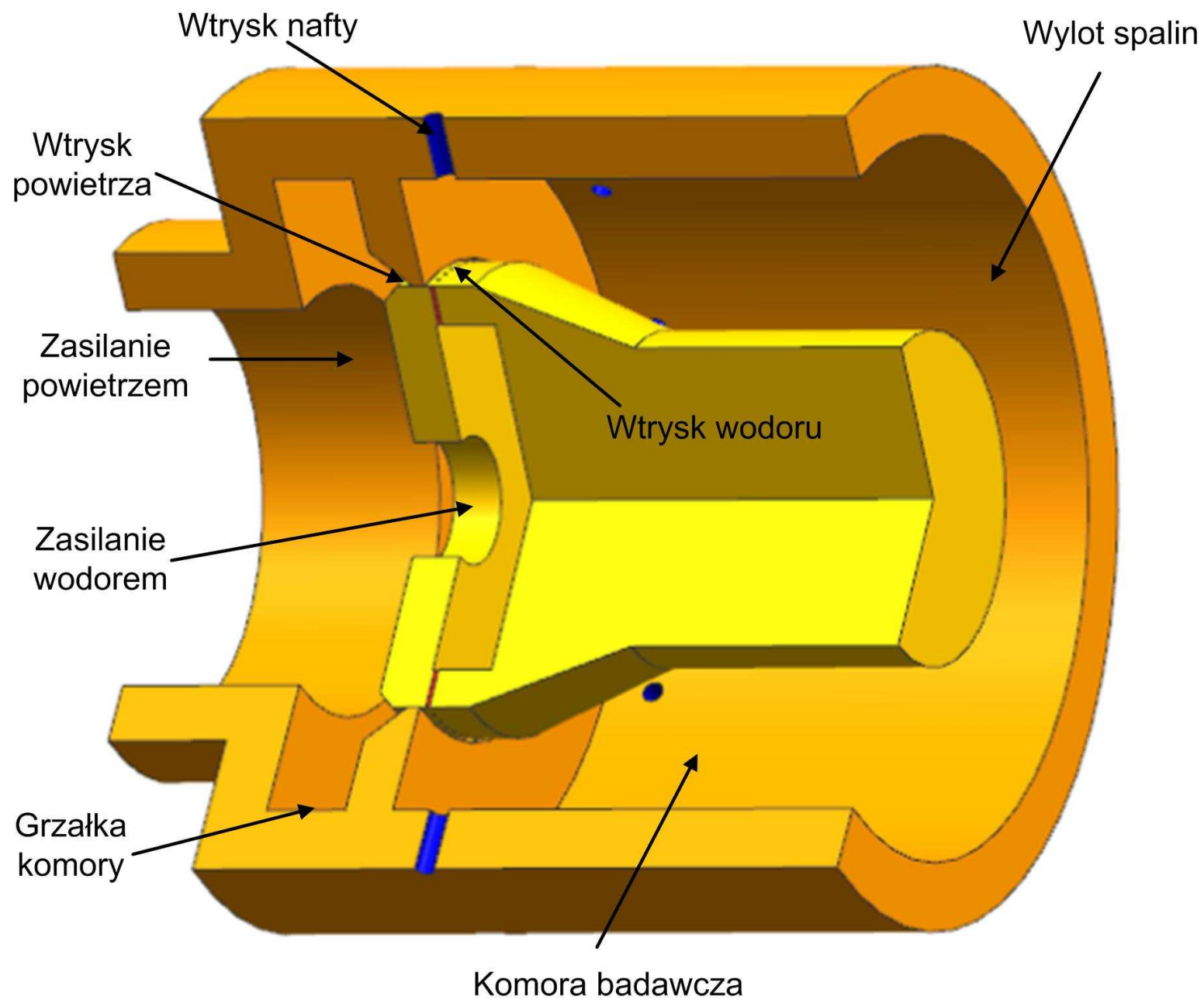
**Karty pomiarowe:** National Instruments PCI 6115 (4kanały z maksymalną częstotliwością próbkowania 10MHz/kanał), USB 6259 (16kanałów dla maksymalnej częstotliwości dzielonej na wszystkie kanały 1.25MHz);

**Wtryskiwacz:** konstrukcja własna z wykorzystaniem elementów firmy Danfoss (typ OD), sterowany elektrycznie jako pojedynczy wtryskiwacz lub ze wspólnej szyny z wykorzystaniem karty pomiarowej oraz oprogramowania własnego;

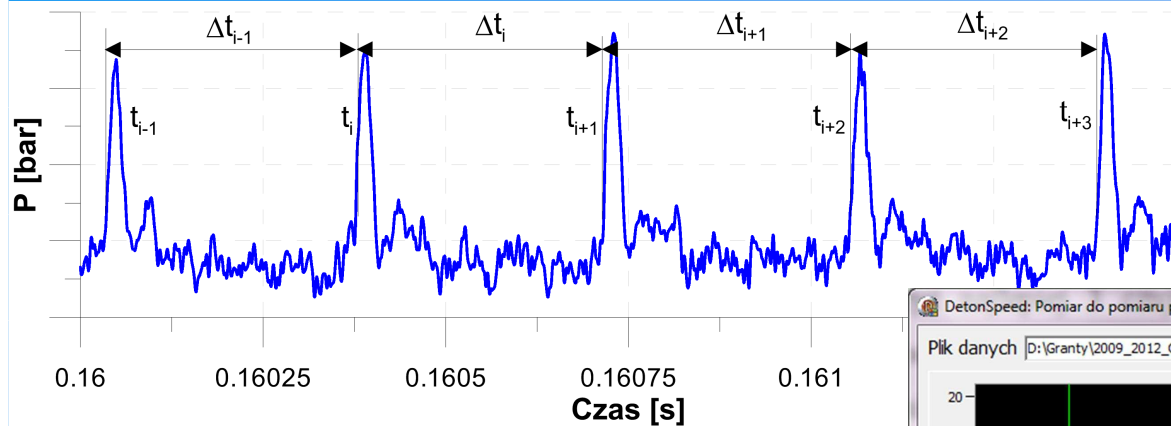
**Grzałki:** konstrukcja opaskowa wykonywana na specjalne zamówienie, firma SELFA o mocy grzewczej 800W, oraz grzałka zwojowa do podgrzewania powietrza zasilającego z wbudowaną termoparą do kontroli.



## Schemat komory badawczej (nie w skali)

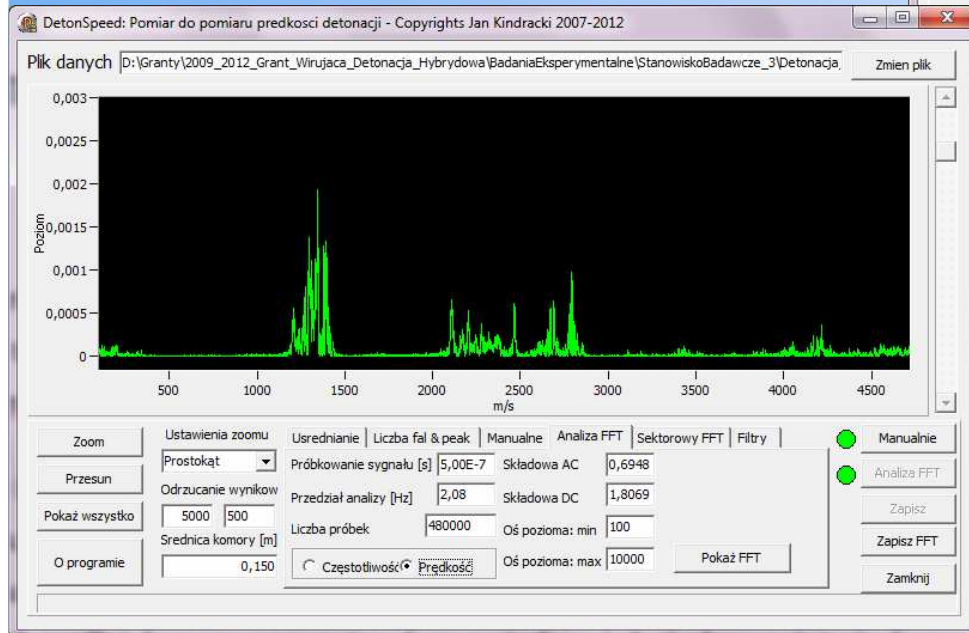
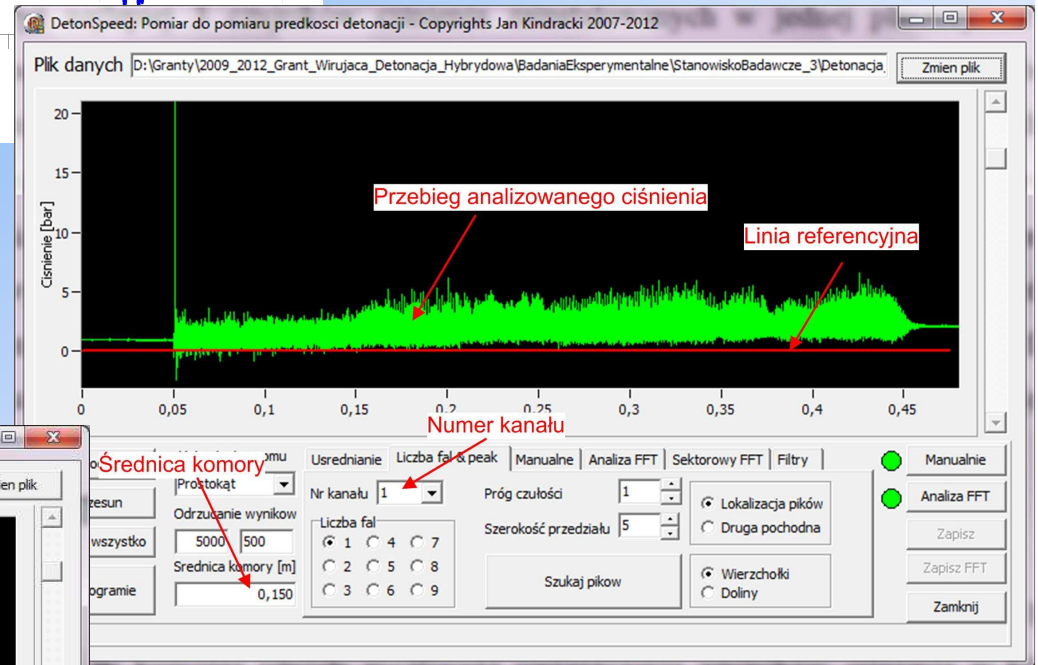


# OBLICZENIA PRĘDKOŚCI PROPAGACJI DETONACJI



Interfejs programu do obliczania prędkości propagacji detonacji na podstawie pomiaru czasów przejścia fali detonacyjnej na czolem czujnika

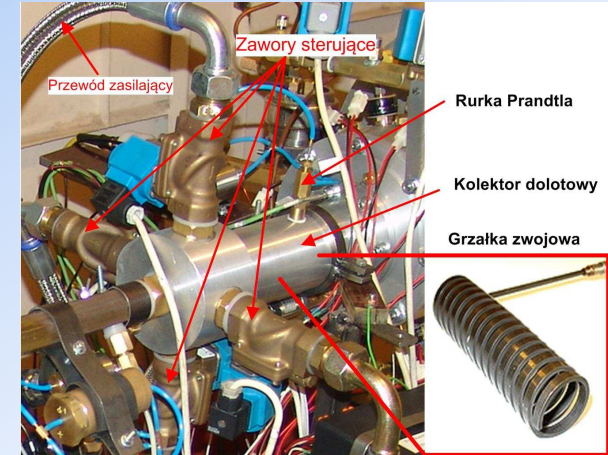
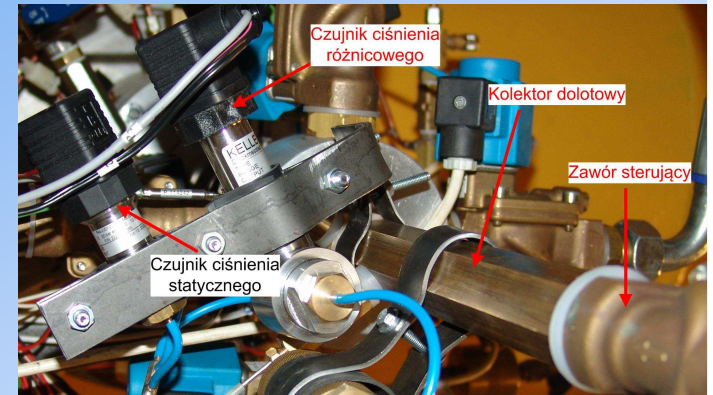
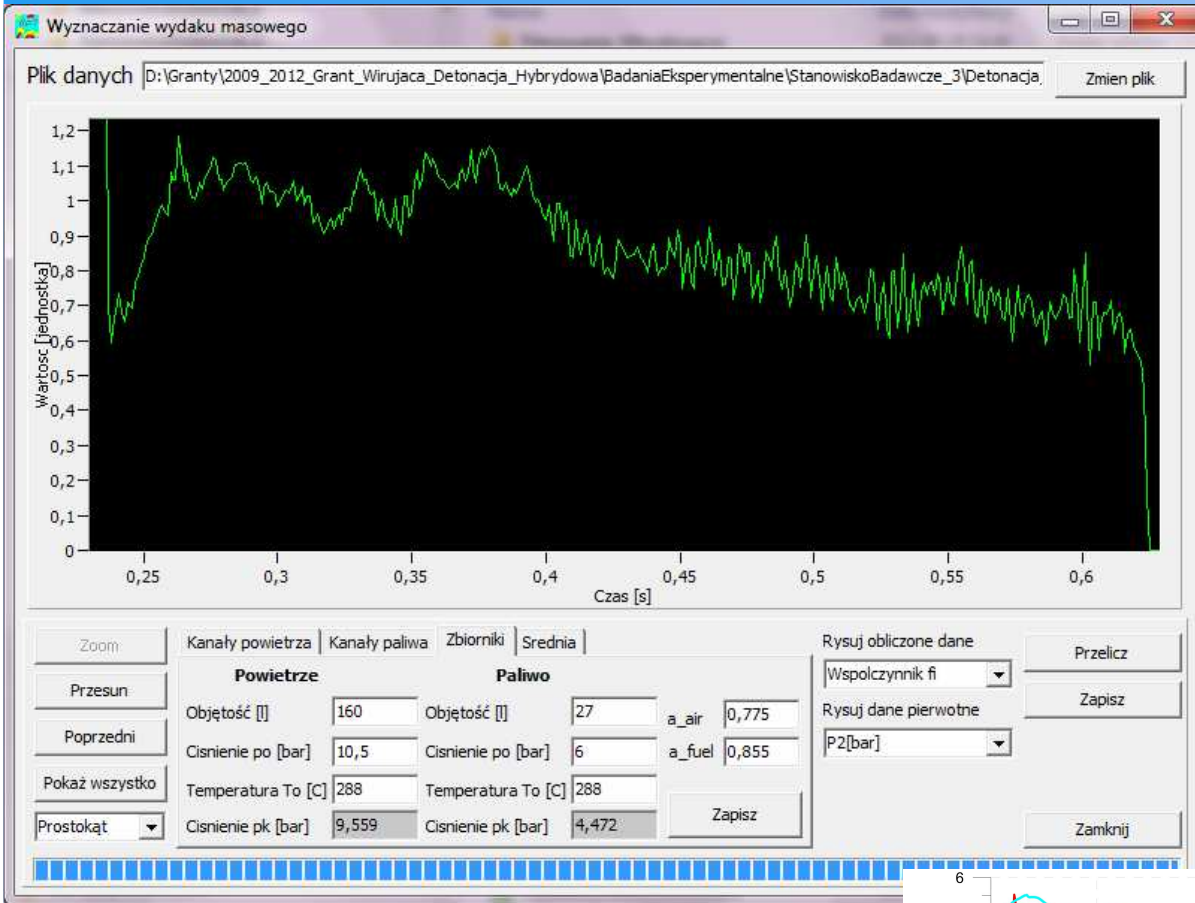
## Metodologia obliczeń



Zakładka programu pozwalająca obliczać prędkość propagacji detonacji z wykorzystaniem analizy FFT

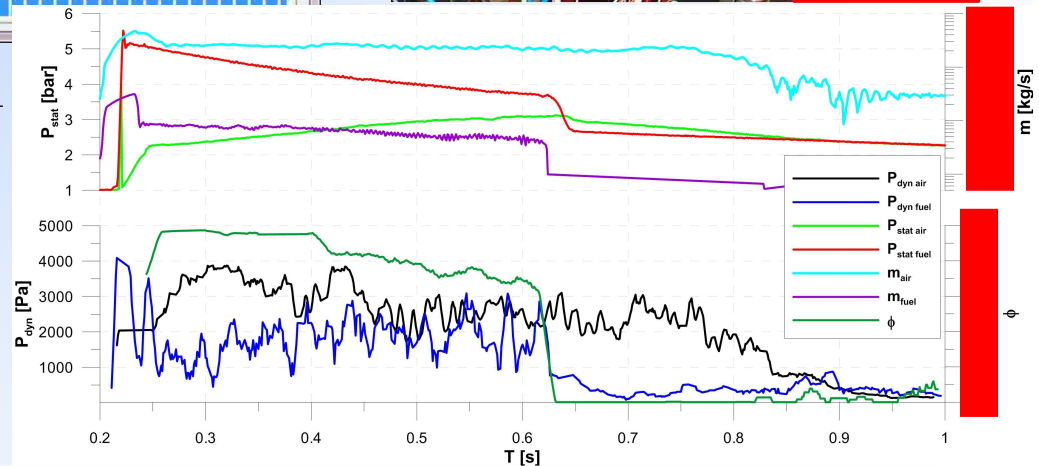


# POMIAR I OBLICZENIA WYDATKU MASOWEGO

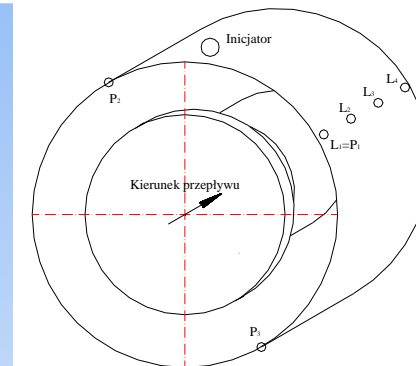


$$p_{dyn} = \frac{\rho \cdot V^2}{2} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{dyn}}{\rho}} \quad \frac{p_{stat}}{\rho} = R_{gazu} \cdot T_{stat} \Rightarrow \rho = \frac{p_{stat}}{R_{gazu} \cdot T_{stat}}$$

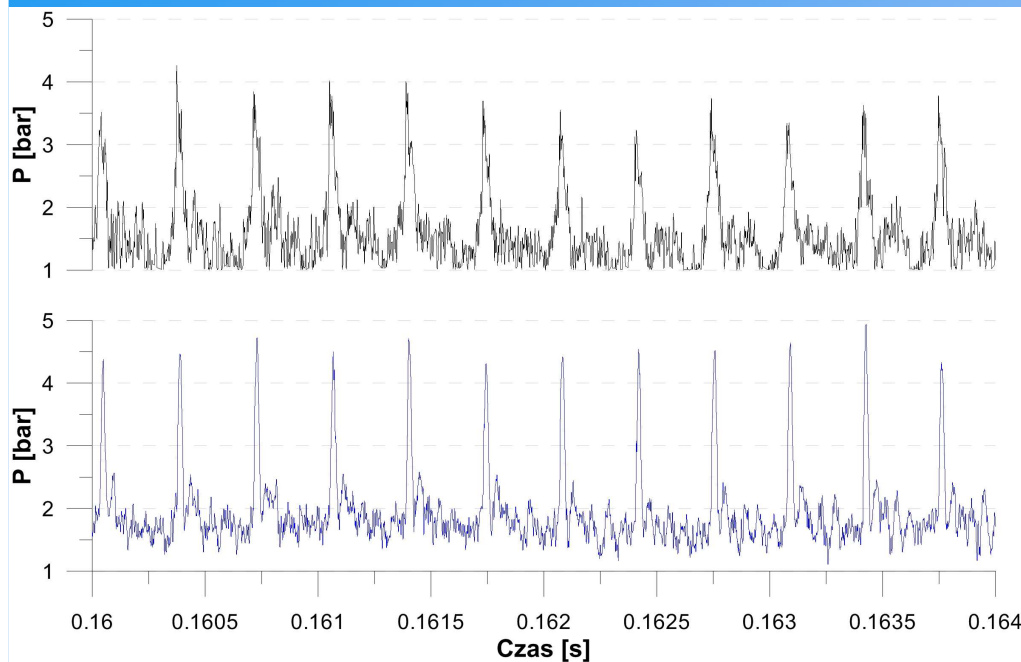
$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A \quad \phi = \frac{\left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}}\right)_{paliwo} / \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}}\right)_{powietrze}}{\left[\frac{\left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}}\right)_{paliwo} / \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}}\right)_{powietrze}}{\right]_{stochiometria}}$$



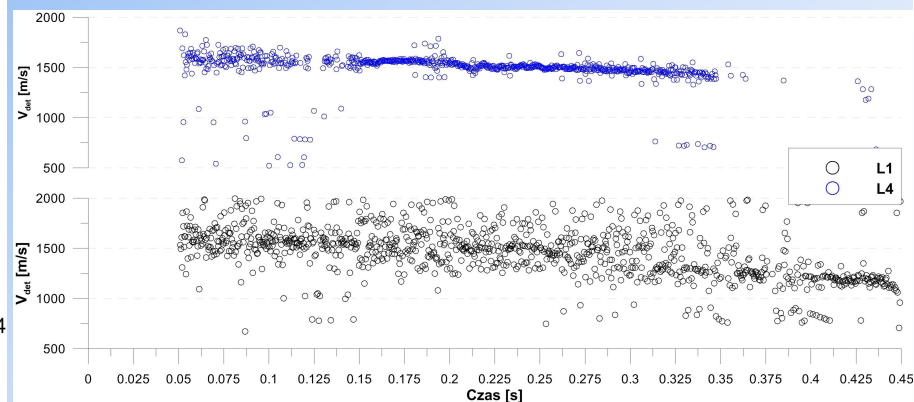
# DETONACJA – MIESZANINA H<sub>2</sub> - POWIETRZE



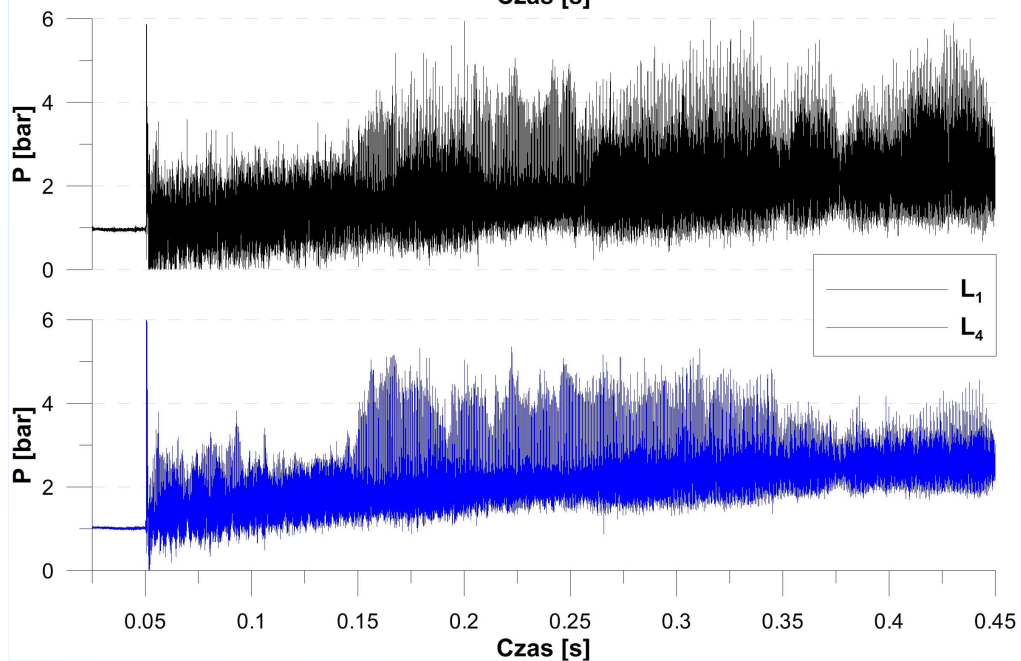
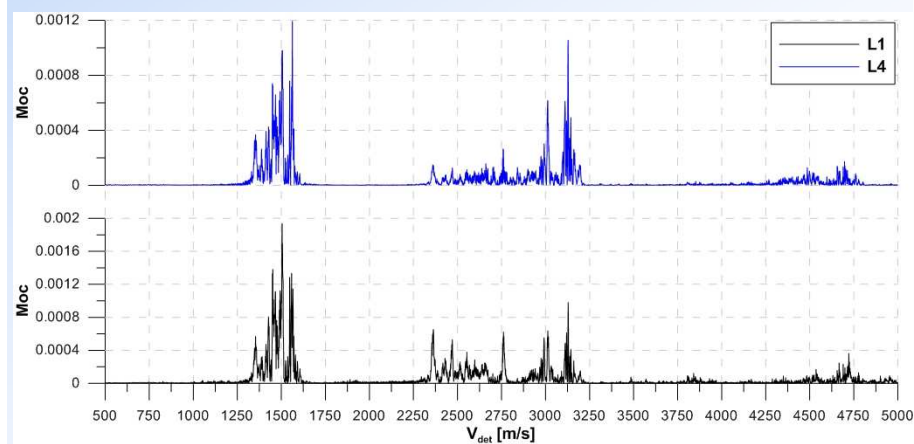
Przebieg ciśnienia



Przebieg prędkości – obliczenia manualne



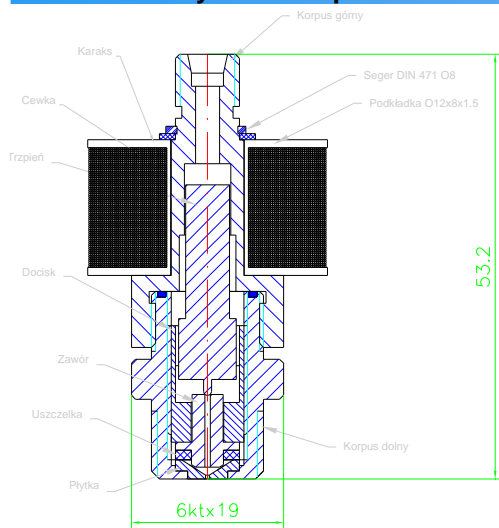
Przebieg prędkości – obliczenia FFT



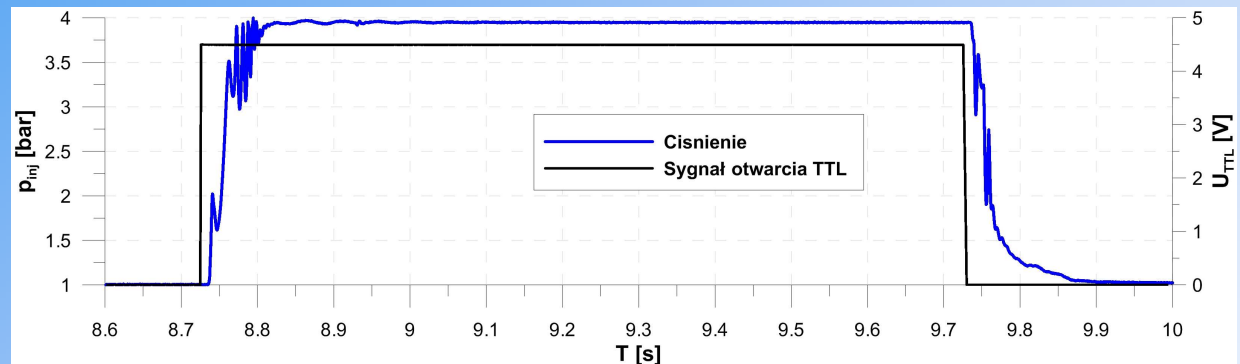


# WTRYSK CIEKŁEJ NAFTY LOTNICZEJ

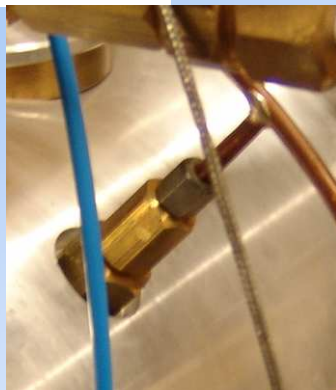
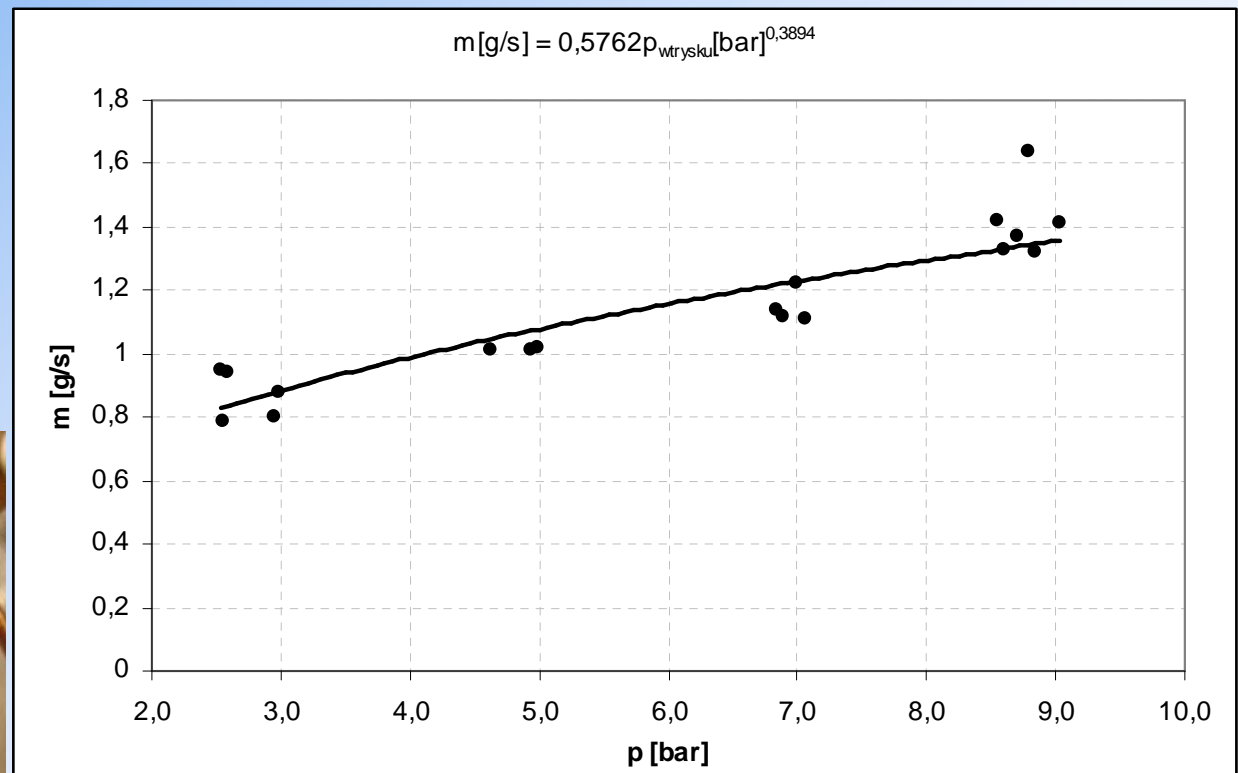
Schemat i widok przykładowego wtryskiwacza paliwa lotniczego



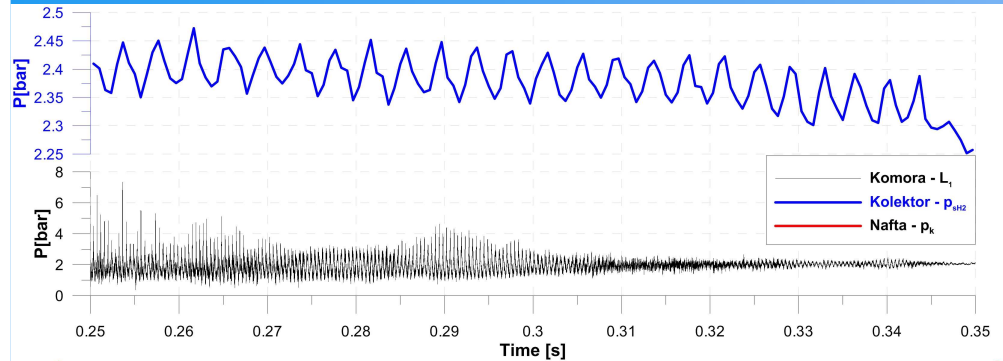
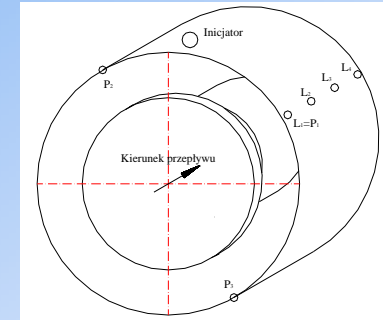
Przykładowy przebieg wtrysku



Charakterystyka pojedynczego wtryskiwacza

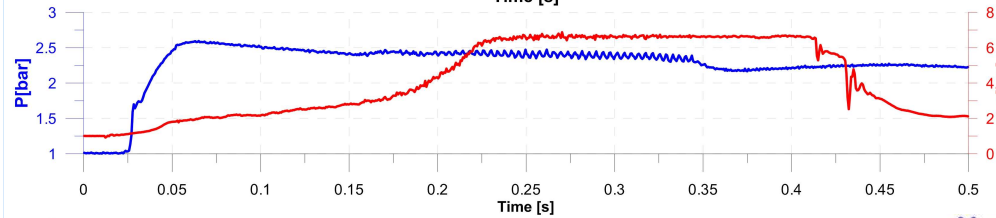


# DETONACJA MIESZANINY HETEROGENICZNEJ - WYNIKI



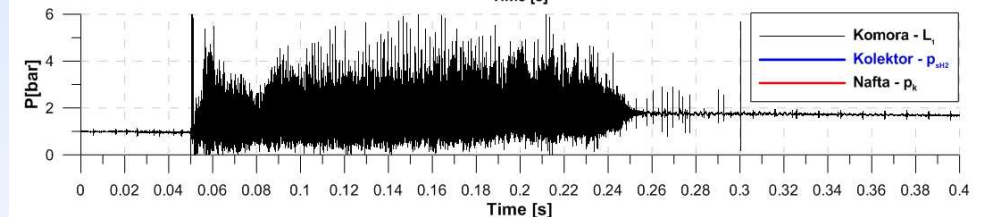
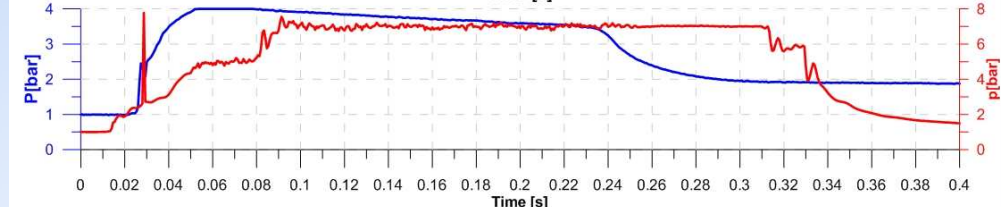
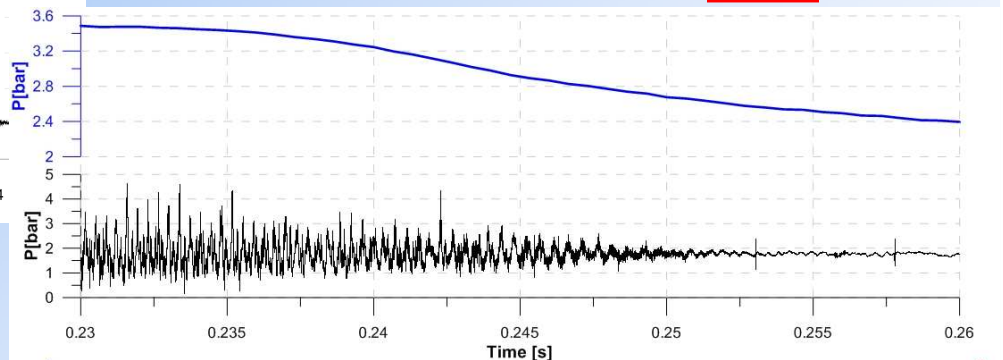
## Przebieg zmian parametrów dla przypadku mieszanki – wodór powietrze – nafta lotnicza (przypadek 64):

- współczynnik  $\phi$  dla uwzględnienia tylko paliwa wodorowego [REDACTED]
- współczynnik  $\phi$  dla uwzględnienia tylko paliwa wodorowego [REDACTED]
- współczynnik  $\phi$  dla uwzględnienia obydwu paliw [REDACTED]



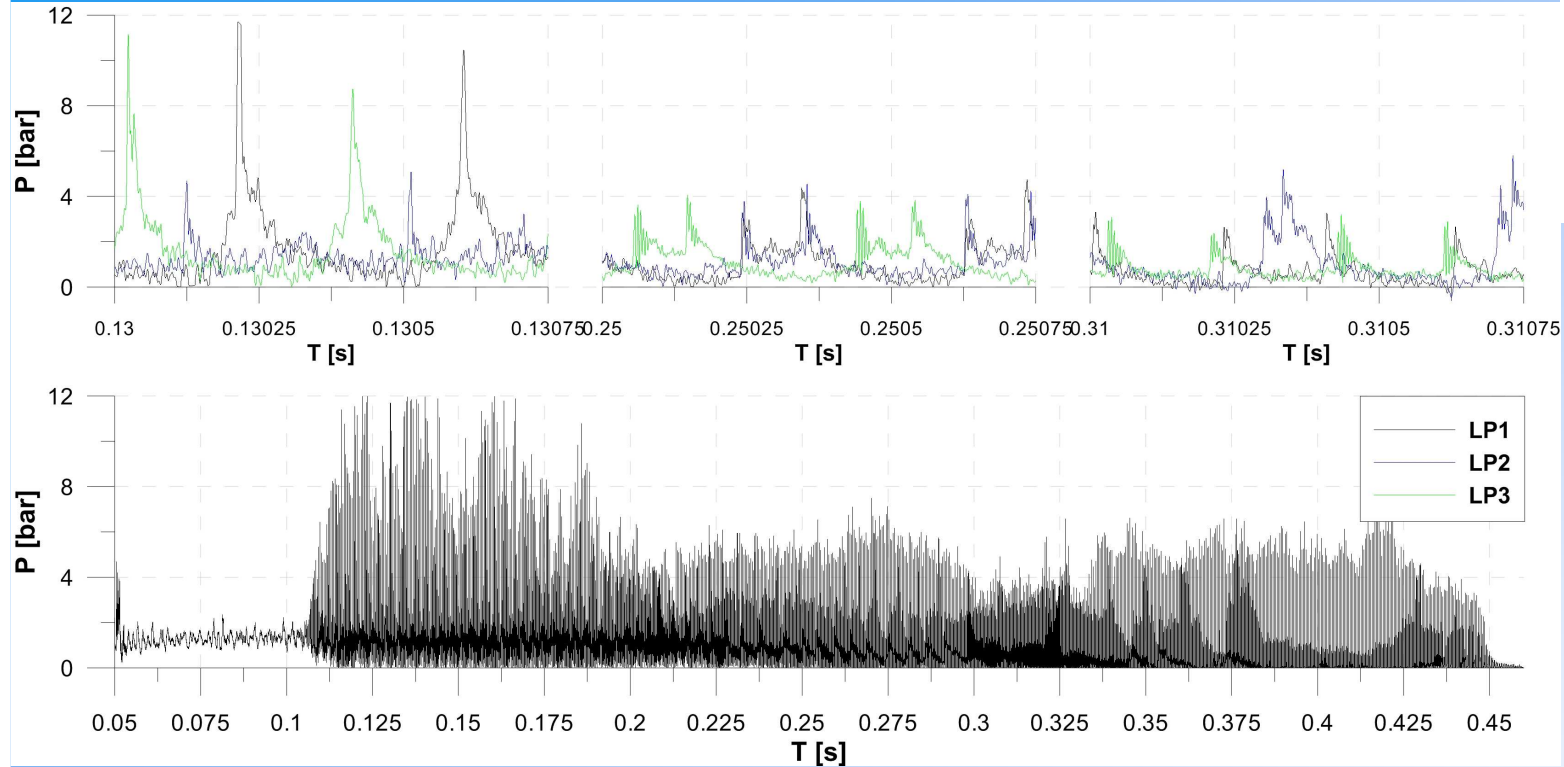
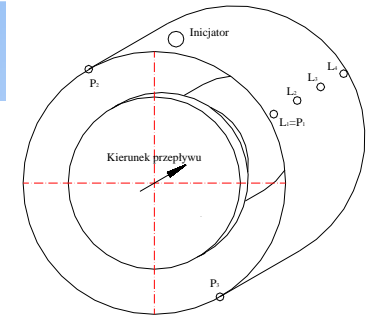
## Przebieg zmian parametrów dla przypadku mieszanki – wodór powietrze – nafta lotnicza (przypadek 79):

- współczynnik  $\phi$  dla uwzględnienia tylko paliwa wodorowego [REDACTED]
- współczynnik  $\phi$  dla uwzględnienia tylko paliwa wodorowego [REDACTED]
- współczynnik  $\phi$  dla uwzględnienia obydwu paliw [REDACTED]





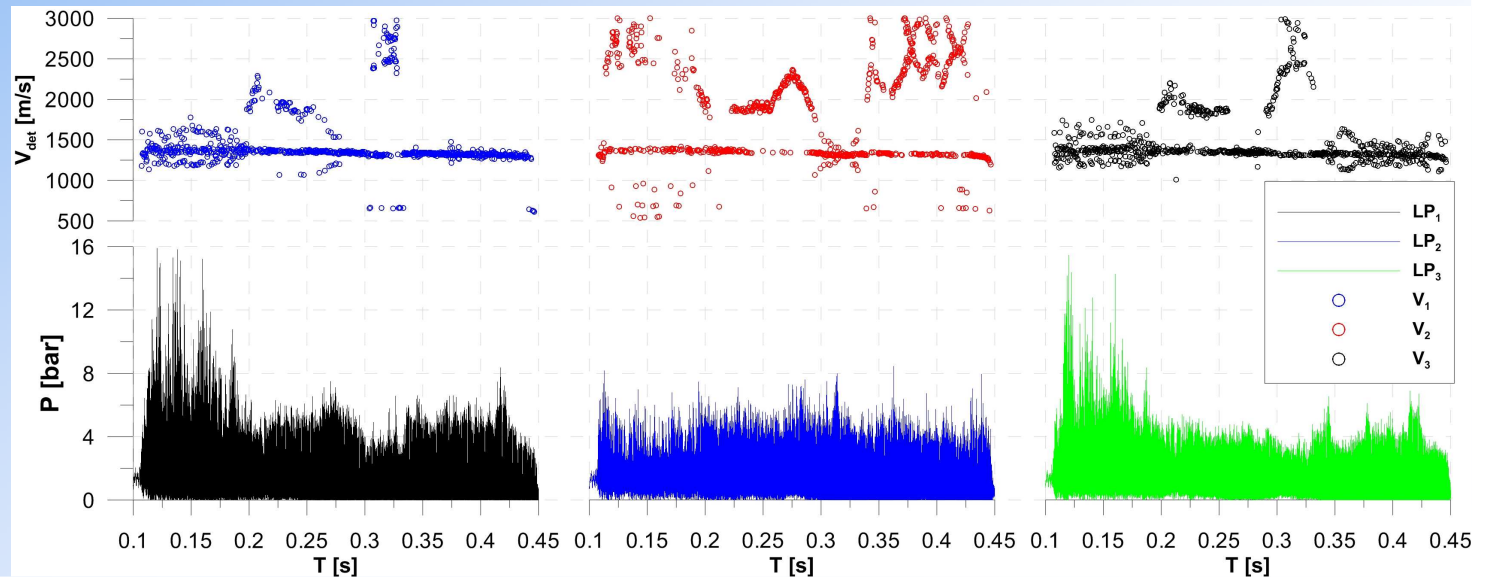
# DETONACJA MIESZANINY HETEROGENICZNEJ - WYNIKI



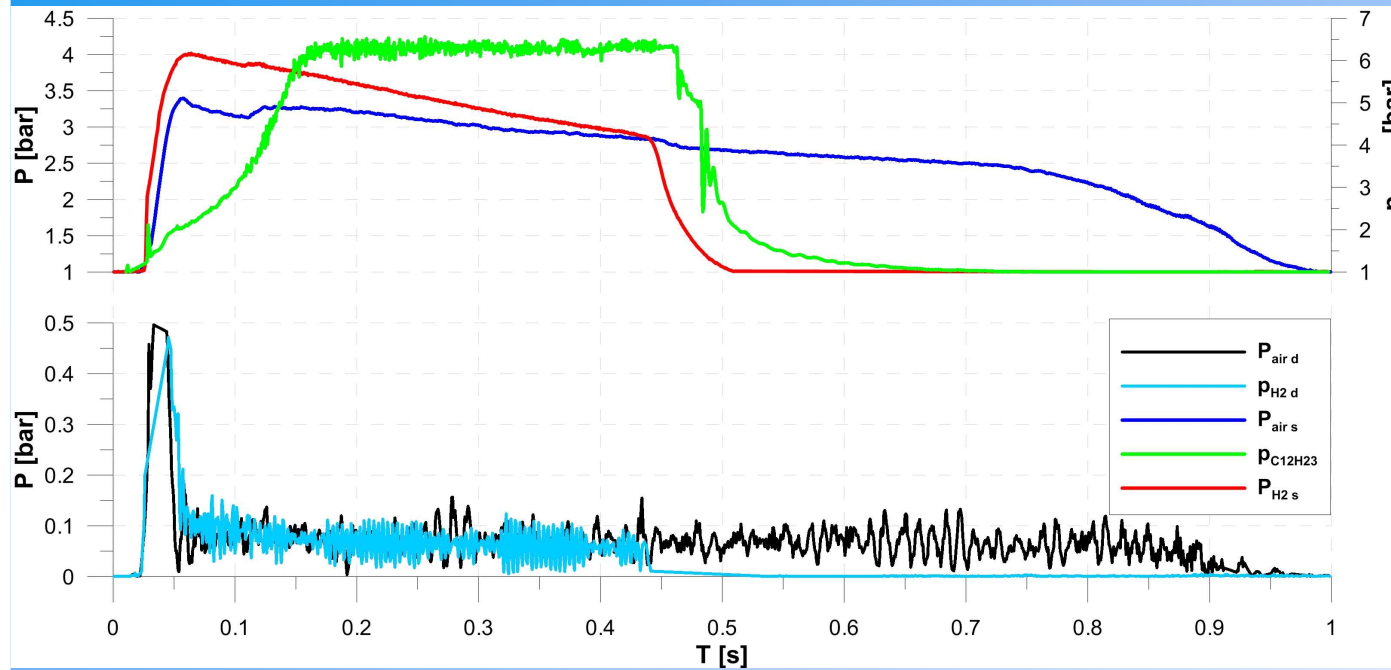
Zastosowano  
dodatek  
„uczulający” paliwo  
– azotan izopropylu  
(IPN) 20% masowo  
w stosunku do  
nafty

Przebieg zmian parametrów ciśnienia w komorze dla przypadku mieszanki – wodór powietrze – nafta lotnicza (przypadek 111):

- współczynnik  $\phi$  dla uwzględnienia tylko paliwa wodorowego [redacted]
- współczynnik  $\phi$  dla uwzględnienia tylko paliwa wodorowego [redacted]
- współczynnik  $\phi$  dla uwzględnienia obydwu paliw [redacted]

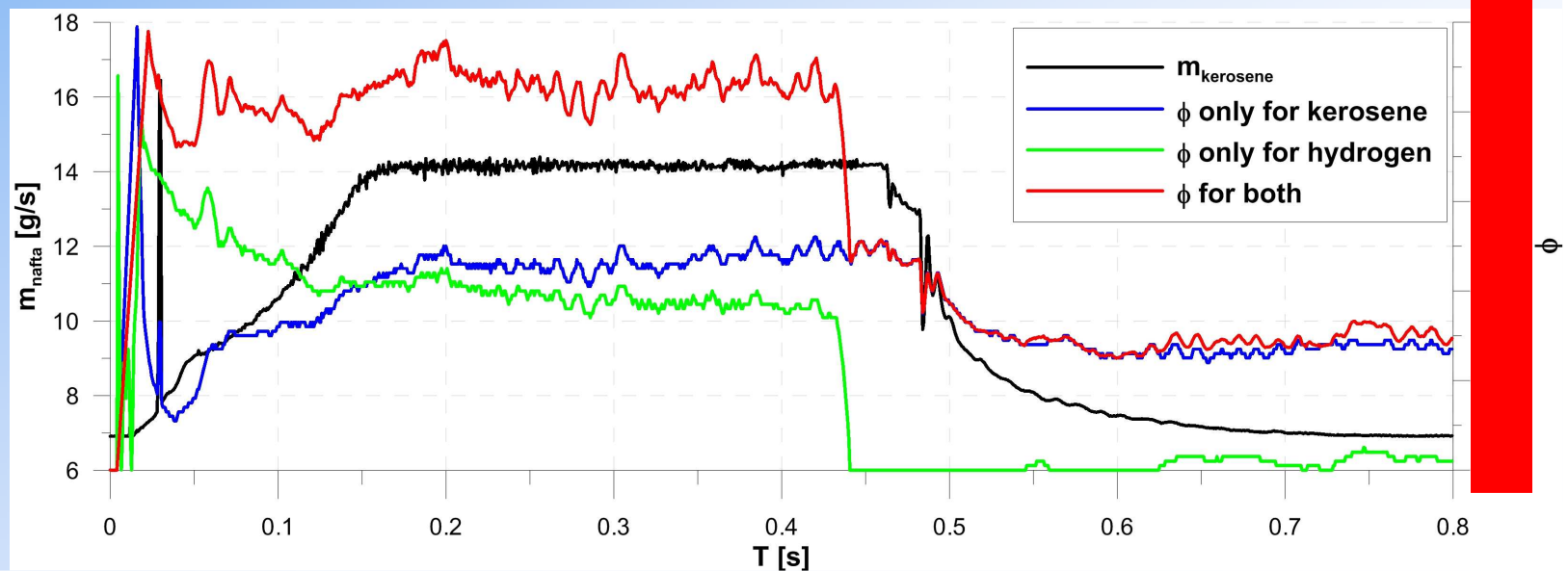


# Detonacja mieszaniny heterogenicznej – wyniki – c.d.



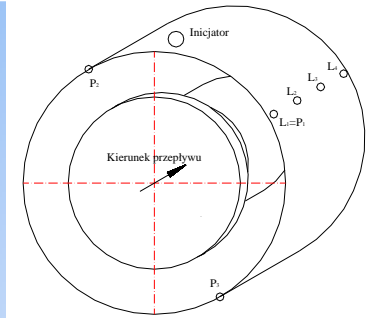
**Przypadek 111:**  
Przebieg ciśnień wolnozmiennych

Przebieg wydatku nafty i składu mieszaniny

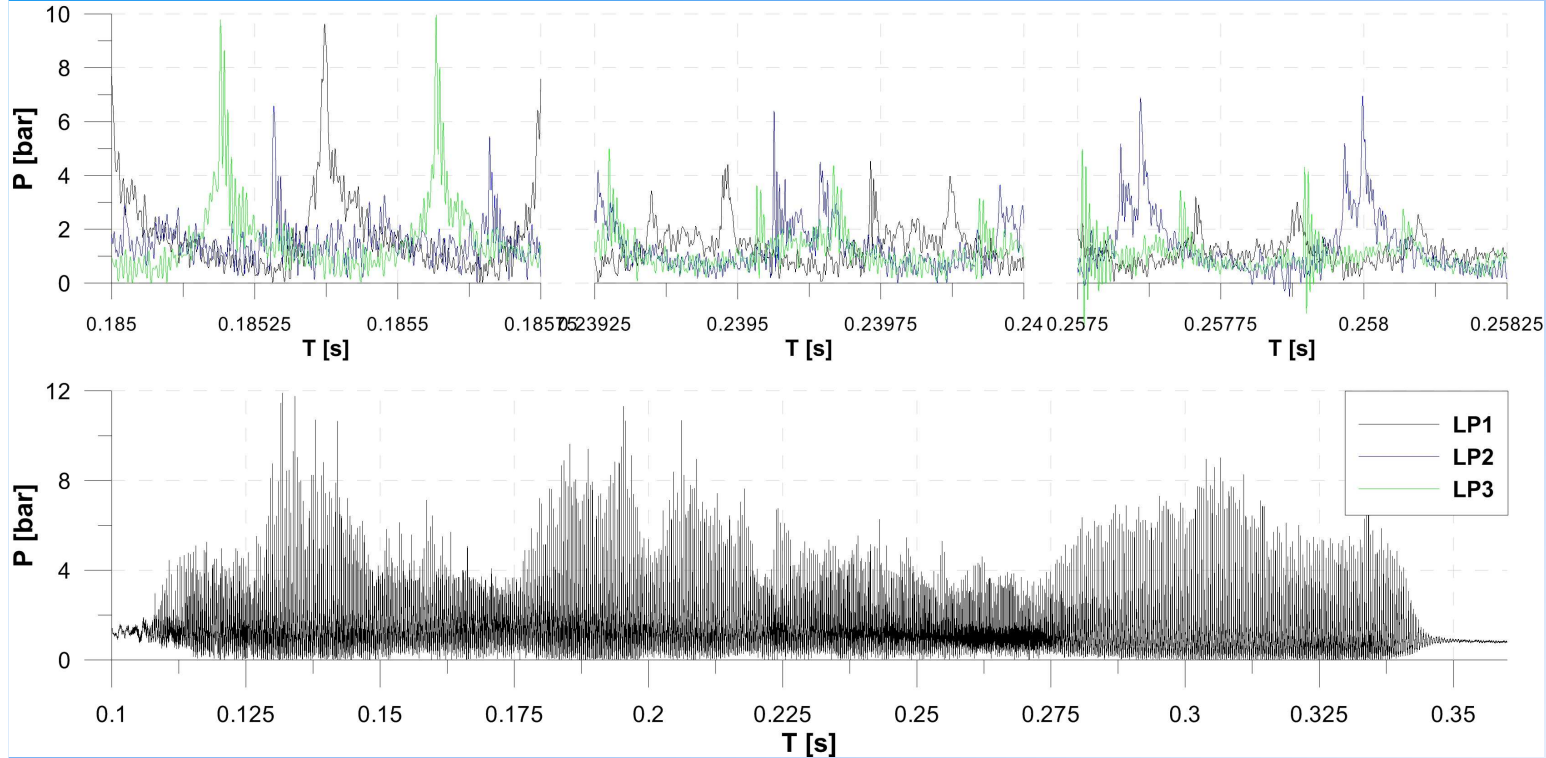




# Detonacja mieszaniny heterogenicznej - wyniki

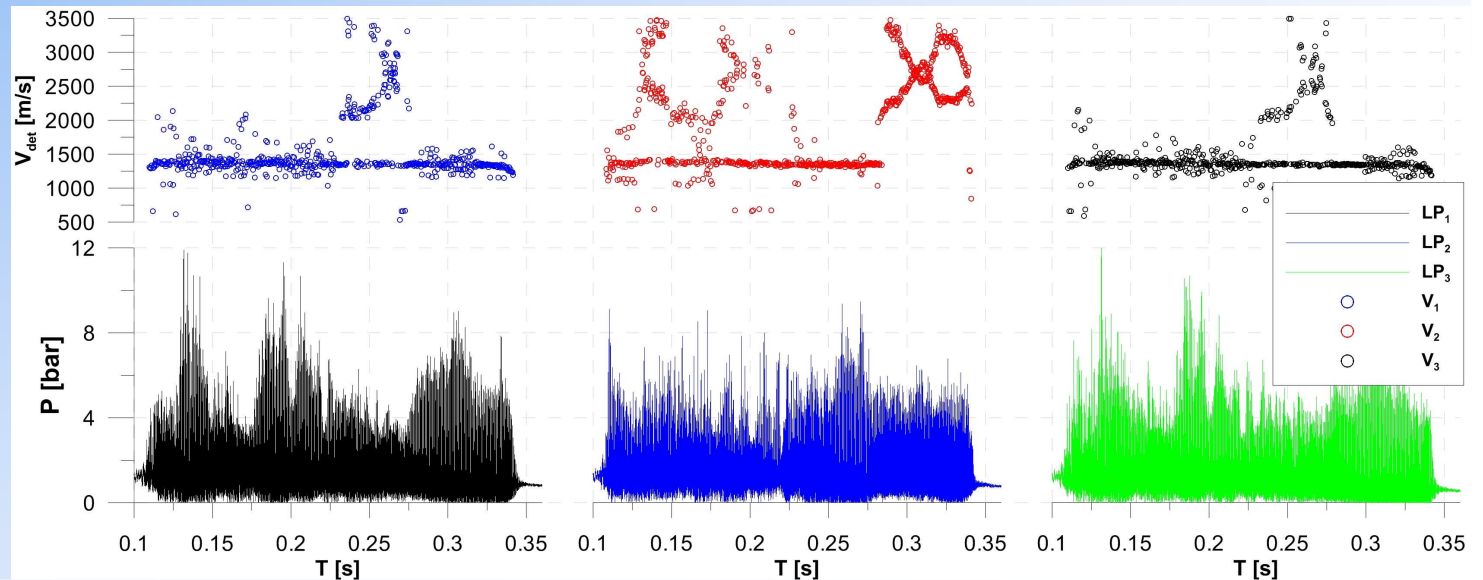


Zastosowano dodatek „uczulający” paliwo – azotan izopropylu (IPN) 20% masowo w stosunku do nafty, a także ogrzewanie komory do 50°C oraz podgrzewanie powietrza

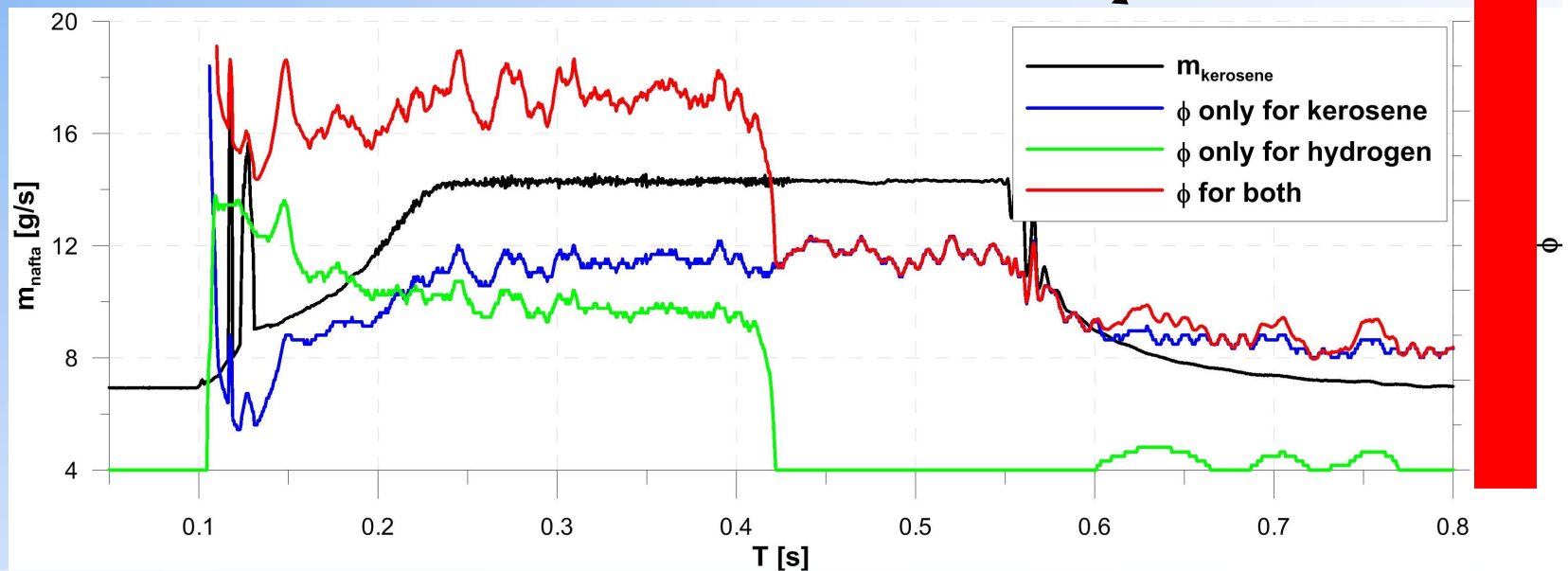
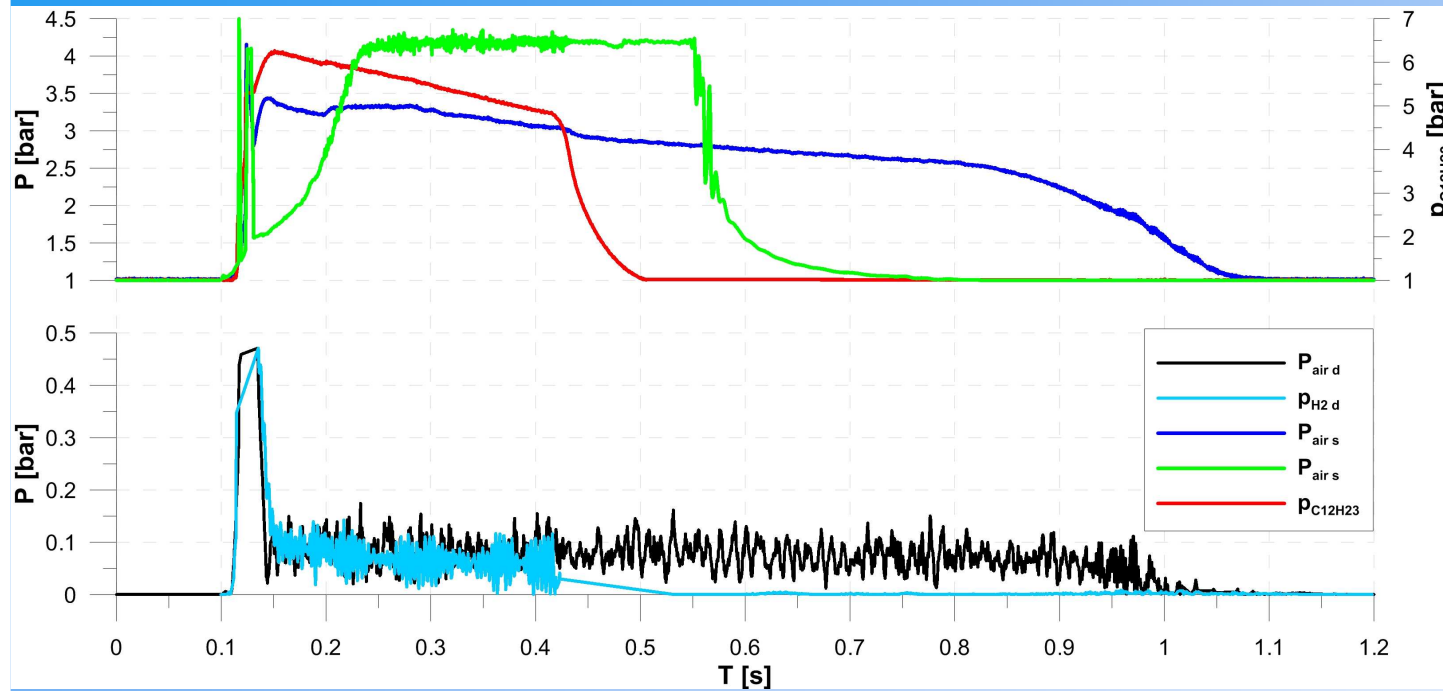


## Przebieg zmian parametrów ciśnienia w komorze dla przypadku mieszaniny – wodór powietrze – nafta lotnicza (przypadek 118):

- współczynnik  $\phi$  dla uwzględnienia tylko paliwa wodorowego [redacted]
- współczynnik  $\phi$  dla uwzględnienia tylko paliwa wodorowego [redacted]
- współczynnik  $\phi$  dla uwzględnienia obydwu paliw [redacted]

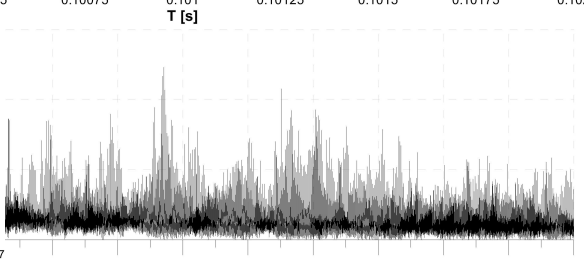
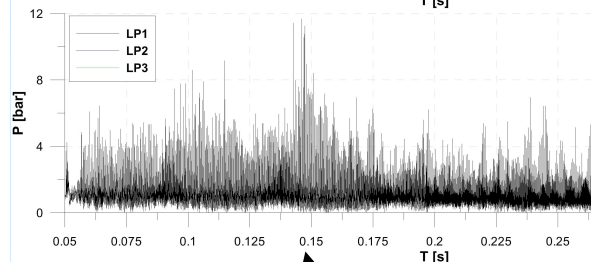
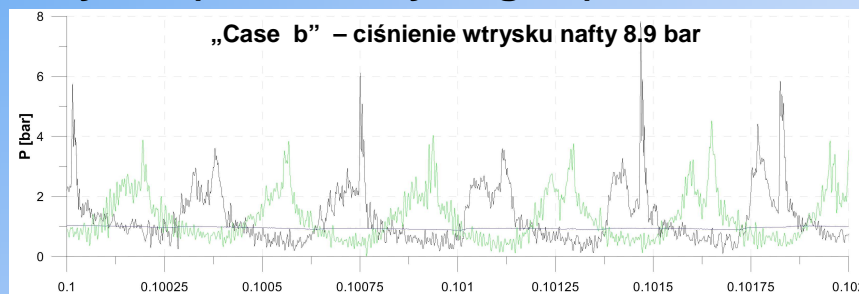
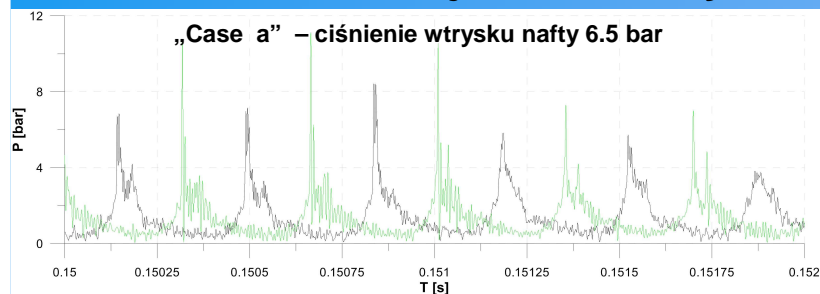


# Detonacja mieszaniny heterogenicznej – wyniki – c.d.



# Detonacja mieszanki heterogenicznej – wyniki (mieszanki bogate)

Nafta lotnicza +  
20%IPN+  
wodór+  
powietrze

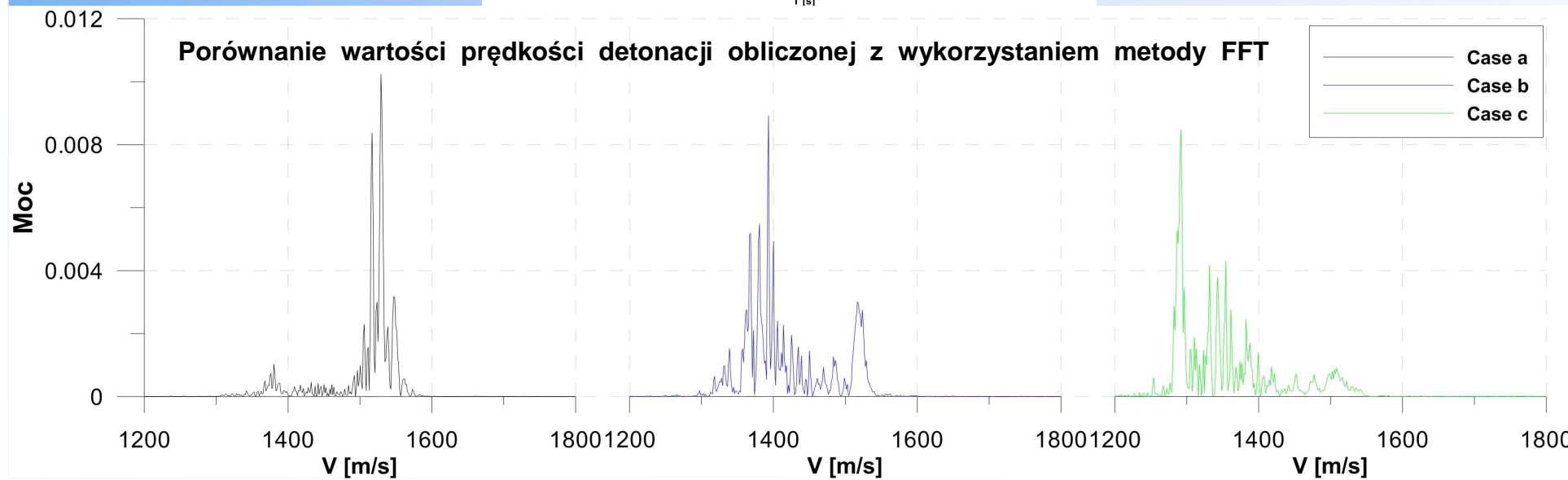


Globalny współczynnik  $\phi \approx$  [red box]

Globalny współczynnik  $\phi \approx$  [red box]

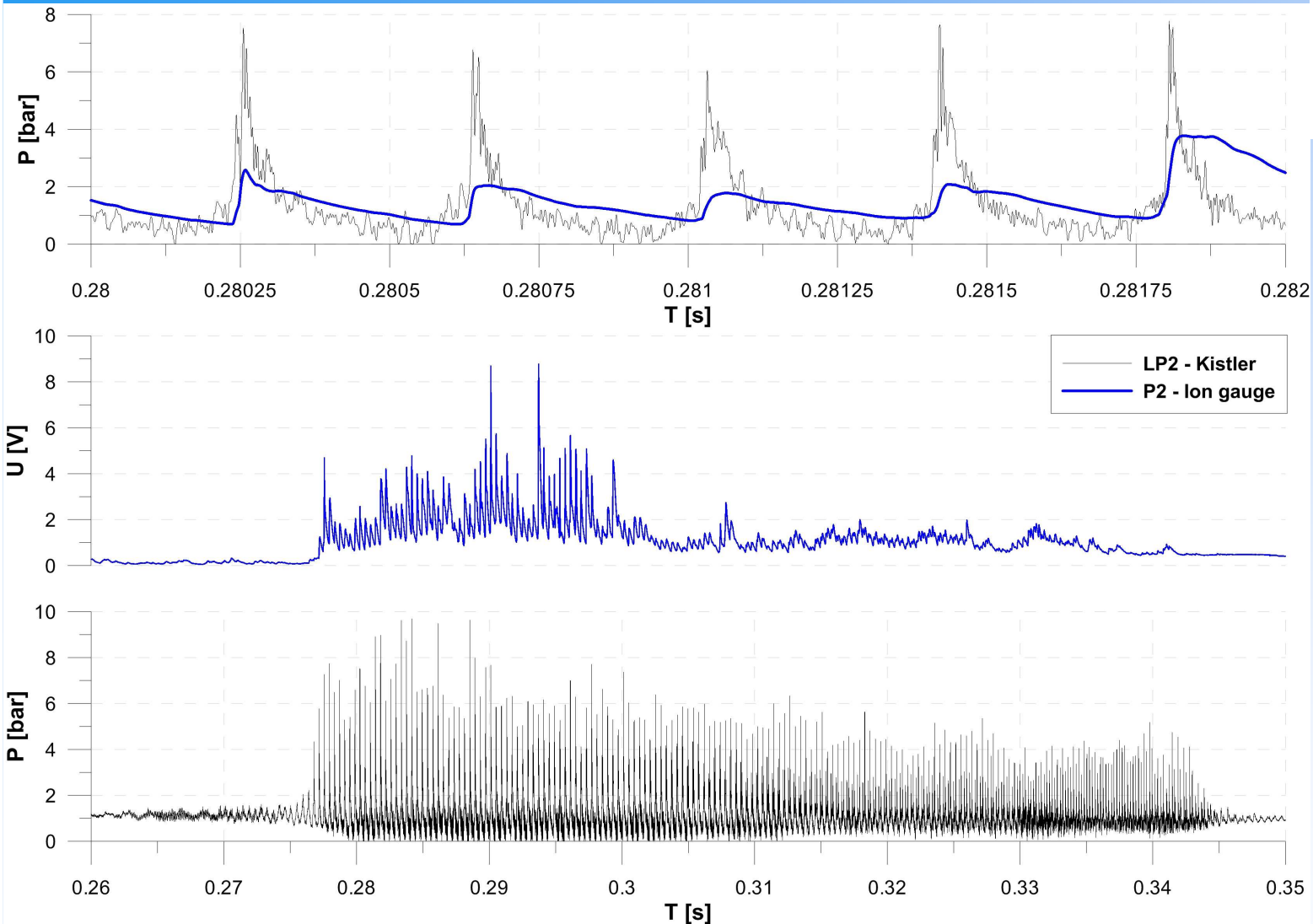
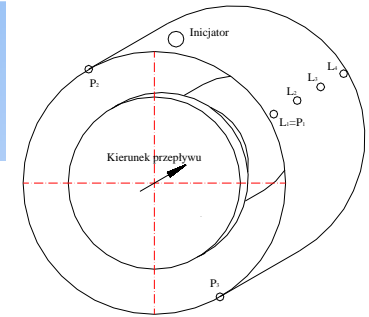
Globalny współczynnik  $\phi \approx$  [red box]

$V_{CJ} \approx 1709 \rightarrow V_{exp} \approx 82\%V_{CJ}$





# Pomiary fali detonacyjnej – czujnik ciśnienia kontra czujnik jonizacyjny



## Po raz pierwszy

(na świecie – nie ma znanych autorowi publikacji w których by używano tych czujników do takiego pomiaru)

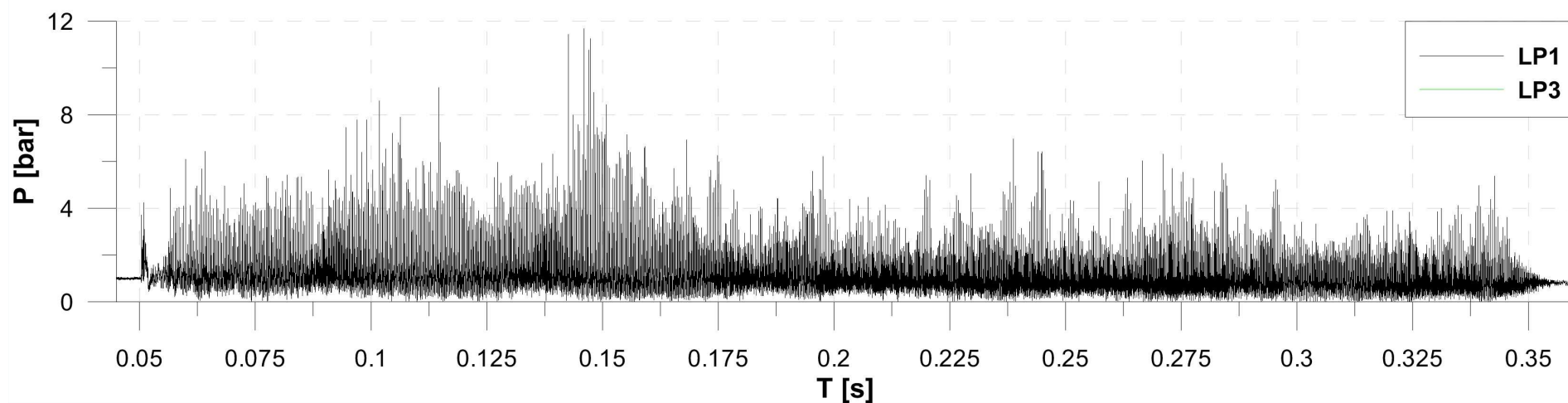
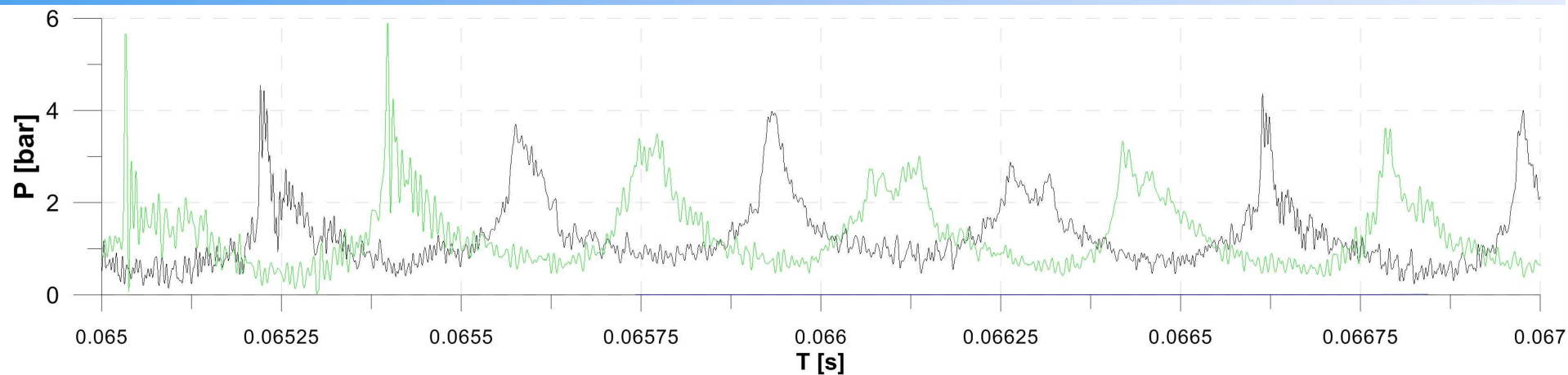
**użyto czujnika jonizacyjnego do detekcji wirującej fali detonacyjnej**

Przebieg ciśnień w podgrzewanej komorze badawczej dla mieszaniny wodór – nafta lotnicza – powietrze z dodatkiem IPN (20% masowo)

# Analiza przypadku 122

Wodór – nafta lotnicza 20%IPN –  
powietrze - mieszanina bogata

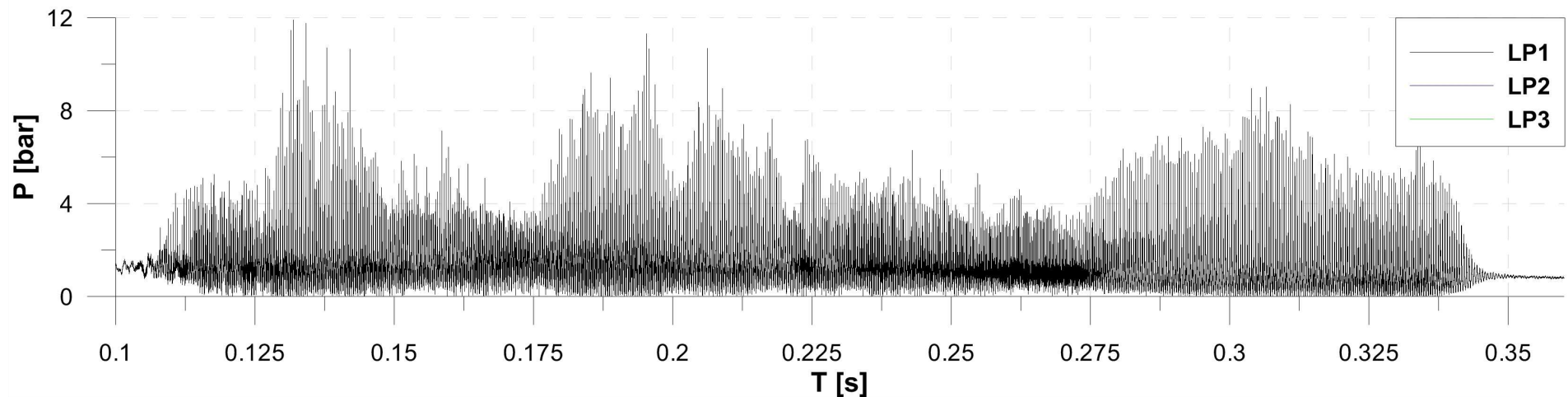
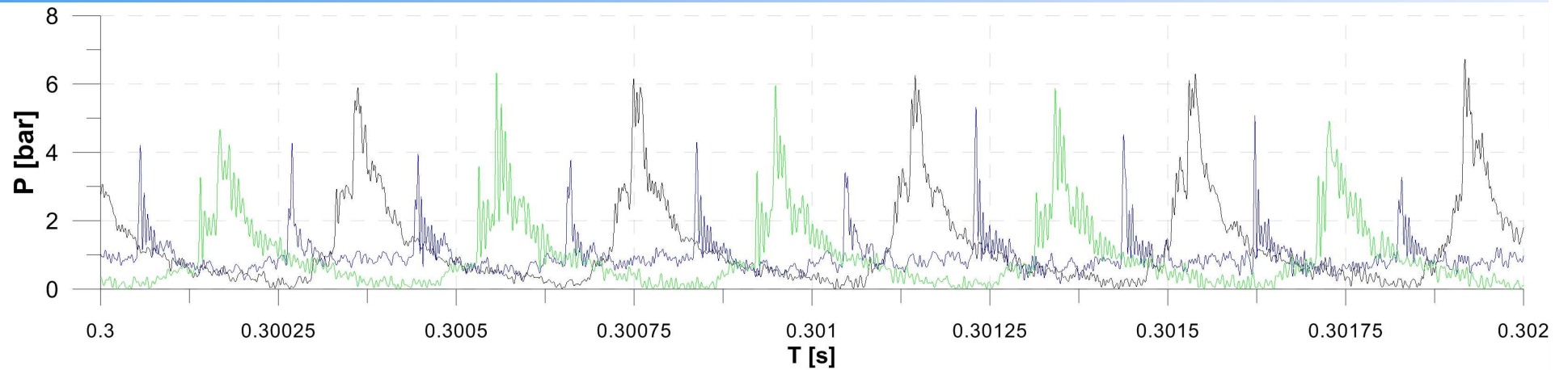
Przypadek 122						
t[s]	X <sub>H2</sub> [%]	X <sub>nafta</sub> [%]	φ <sub>all</sub>	D <sub>exp K1</sub> [m/s]	D <sub>CJ</sub> [m/s]	deficyt V [%]
0,065	84,0	16,0		1500	1987	24,51%
0,115	57,0	43,0		1550	2009	22,85%
0,195	41,0	59,0		1490	1997	25,39%
0,195	dwie przeciwbieżne fale			1250	1997	37,41%
0,245	32,0	68,0		1500	1963	23,59%
0,245	dwie przeciwbieżne fale			1300	1963	33,77%



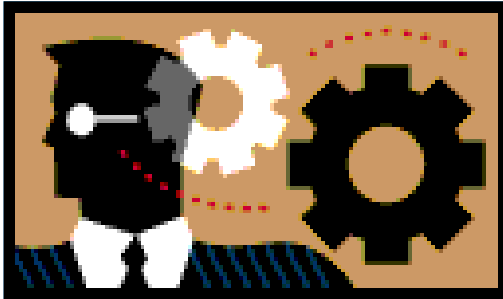
# Analiza przypadku 118

Wodór – nafta lotnicza 20%IPN –  
powietrze - mieszanina uboga

Przypadek 118						
t[s]	X <sub>H2</sub> [%]	X <sub>nafta</sub> [%]	φ <sub>all</sub>	D <sub>exp K1</sub> [m/s]	D <sub>CJ</sub> [m/s]	deficyt V [%]
0,12	80,0%	20,0%		1380	1831	24,63%
0,16	54,0%	46,0%		1370	1724	20,53%
0,20	44,0%	56,0%		1350	1736	22,24%
0,24	33,0%	67,0%		1370	1792	23,55%
0,24	dwie przeciwbieżne fale			1100	1792	38,62%
0,30	30,0%	70,0%		1350	1726	21,78%







## PODSUMOWANIE I WNIOSKI



- zbudowano stanowisko badawcze do badania inicjacji i propagacji detonacji w mieszaninie heterogenicznej (ciekłe paliwo, gazowy utleniacz);
- przeprowadzono badania referencyjne dla mieszaniny wodorowo – powietrznej;
- przeprowadzono badania procesu inicjacji i propagacji dla mieszaniny nafta lotnicza z dodatkiem wodoru w stanie gazowym;
- przeprowadzono badania procesu inicjacji i propagacji dla mieszaniny nafta lotnicza z dodatkiem wodoru w stanie gazowym oraz dodatkiem uczulającym IPN, oraz podgrzewaniem komory badawczej (do 60°C) i powietrza zasilającego;
- wykonano obliczenia prędkości propagacji i składu mieszaniny detonującej;
- niestety w przedstawionej geometrii nie udało się uzyskać inicjacji wirującej detonacji dla nafty lotniczej z powietrzem;
- w przypadku geometrii o dużych szerokościach kanału komory lepiej posługiwać się wartością częstotliwości dla fali detonacyjnej z uwagi na pewną nieoznaczoność średnicy referencyjnej dla obliczania prędkości propagacji;
- badana komora zasilana paliwem dwuskładnikowym w różnych stanach skupienia może być wykorzystana w zastosowaniach stacjonarnych (turbogeneratory).



# DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ



**Praca** była prowadzona przy wsparciu NCN, projekt nr 838/B/T02/2009/37

**Autor** jest stypendystą w ramach projektu: Program rozwoju dydaktycznego Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej” finansowanego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki i Unii Europejskiej – Europejskiego Funduszu Społecznego);

**Autor** także współpracuje w kontekście badań związanych z wirującą detonacją z Instytutem Lotnictwa w ramach projektu PO IG 1.3 „Silnik turbinowy z detonacyjną komorą spalania” Nr UDA-POIG.01.03.01-14-071/09-00



UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## W prezentacji wykorzystano grafiki:

[http://www.cleanairpower.com/gas\\_engine\\_components.php](http://www.cleanairpower.com/gas_engine_components.php)

<http://www.danfoss.com/Poland/Products/Categories/Group/HE/Komponenty-do-palnikow-olejowych/Dysze-olejowe/6eba7723-8652-4d51-8c48-d9b84df8e0df.html>

[http://www.ni.com/pdf/products/us/4daqsc197-198\\_ETC\\_212-213.pdf](http://www.ni.com/pdf/products/us/4daqsc197-198_ETC_212-213.pdf)

[http://www.kistler.com/pl\\_en-ex/13\\_Productfinder/App.-.15/Product-Finder.html](http://www.kistler.com/pl_en-ex/13_Productfinder/App.-.15/Product-Finder.html)