

## Spis treści

1. Opracowanie założeń do stanowisk badawczych oraz metod badania pasywnych systemów tłumienia wybuchów .....	4
1.1. Wstęp.....	4
1.2. Stanowisko badawcze w postaci rury detonacyjnej w skali laboratoryjnej.....	5
1.3. Stanowisko badawcze w postaci rury detonacyjnej w skali rzeczywistej i pasywny element zabezpieczenia przed wybuchem .....	10
2. Budowa bazy danych charakterystyk spalania detonacyjnego i deflagacyjnego na podstawie badań doświadczalnych.....	14
2.1. Badania parametrów deflagracji:.....	14
2.2. Badanie parametrów detonacji: .....	19
3. Testy prototypu pasywnego systemu tłumienia wybuchów w skali rzeczywistej .....	34
3.1. Opis układu tworzenia mieszanin gazowych.....	34
3.2. Opis prototypu pasywnego systemu tłumienia wybuchów .....	35
3.3. Opis wyników badań z zastosowaniem różnego typu przeszkód w RD20.....	40
3.4. Opis wyników badań prototypu pasywnego systemu tłumienia wybuchów w skali rzeczywistej	45
4. Testy aktywnych systemów tłumienia wybuchów .....	51
4.1. Działanie systemu .....	51
4.2. Analiza medium gaśniczego .....	54
4.2.1. Skuteczność proszków gaśniczych .....	56
4.2.2. Stężenia gaśnicze proszków .....	56
4.2.3. Metody podawania proszków gaśniczych .....	56
4.3. Testy prototypów aktywnego systemu tłumienia wybuchem w przestrzeni otwartej.....	56
4.4. Wyniki badań aktywnego systemu gaśniczego w sferze o obj. 150m <sup>3</sup> .....	61
4.5. Testy prototypu aktywnego systemu tłumienia wybuchów w zbiorniku o poj. 1m <sup>3</sup> .....	62
4.5.1. Badania skuteczności gaśniczej systemu HRD.....	63
5. Opracowanie modeli matematycznych, kodu numerycznego do obliczeń wybuchów deflagacyjnych oraz detonacyjnych.....	67
5.1. Implementacja i walidacja kodu do symulacji numerycznych detonacji wodoru, metanu i propanu w rurze .....	67
5.1.1. Wprowadzenie.....	67
5.1.2. Solver .....	67
5.1.3. Model obliczeniowy .....	68
5.1.4. Literatura .....	68
5.2. Technologia oraz architektura .....	69
5.2.1. Technologia.....	69
5.2.2. Środowisko programistyczne .....	69
5.2.3. Wykorzystane biblioteki SWING .....	69

5.2.4.	Architektura okien .....	69
5.2.5.	JFreeChart.....	70
5.2.6.	Model współbieżności.....	70
5.2.7.	Podsumowanie .....	70
5.2.8.	Statystyki technologii programowania oraz kodu .....	70
6.	Testowanie i walidacja oprogramowania w oparciu o dane eksperymentalne .....	72
6.1.	Wstęp.....	72
6.2.	Testowanie oprogramowania IntexSoft.....	72
6.2.1.	Powitanie .....	72
6.2.2.	Start .....	72
6.2.3.	Geometria.....	72
6.2.4.	Mieszanina.....	72
6.2.5.	Siatka .....	73
6.2.6.	Warunki brzegowe.....	73
6.2.7.	Modele.....	73
6.2.8.	Solver .....	73
6.2.9.	Analiza Wyników.....	73
6.3.	Wyniki symulacji numerycznych .....	73
6.4.	Podsumowanie .....	74
7.1.	Wstęp.....	75
7.2.	Wyniki.....	75
7.2.1.	Wodór-powietrze.....	75
7.2.2.	Wodór-tlen .....	77
7.2.3.	Metan-tlen .....	78
7.2.4.	Propan-powietrze .....	79
7.2.5.	Propan-tlen .....	80
7.3.	Podsumowanie .....	82
8.	Walidacja kodu dla danych eksperymentalnych w dużej skali .....	83
8.1.	Wprowadzenie.....	83
8.2.	Opis symulacji .....	83
8.2.1.	Ustawienia programu .....	83
8.3.	Bibliografia.....	83
9.	Opracowanie wyników symulacji numerycznych w dużej skali.....	85
9.1.	Wprowadzenie.....	85
9.2.	Omówienie wyników symulacji.....	85
9.2.1.	Przebiegi ciśnienia.....	85
9.2.2.	Prędkość .....	86
9.3.	Podsumowanie .....	86
9.4.	Bibliografia.....	86

10.	Symulacje numeryczne na wielu procesorach .....	87
10.1.	Wstęp.....	87
10.2.	Opis modelu obliczeń na wielu procesorach.....	87
10.3.	Procedura obliczeń w programie IntexSoft.....	87
10.4.	Metodologia obliczeń na wielu procesorach .....	88
10.5.	Podsumowanie .....	88
10.6.	Literatura .....	88
11.	Opracowanie wyników symulacji numerycznych na wielu procesorach.....	89
11.1.	Podsumowanie .....	89
11.2.	Literatura .....	89
12.	Instrukcja tworzenia domeny obliczeniowej w programie IntexSoft .....	90
12.1.	Wstęp.....	90
12.2.	Tworzenie geometrii obliczeniowej w programie IntexSoft.....	90
13.	Symulacje numeryczne aktywnego tłumienia spalania deflagacyjnego na otwartej przestrzeni 92	
13.1.	Symulacje numeryczne .....	92
13.2.	Instrukcja przygotowania symulacji numerycznej.....	94
15.	Wersje instalacyjne programu Intexsoft oraz strona www projektu .....	97
15.1.	Wstęp.....	97
15.2.	Funkcjonalność .....	97
16.	Wytworzone stanowiska badawcze oraz urządzenia .....	98
16.1.	Stanowiska do badania aktywnych systemów tłumienia wybuchów w skali laboratoryjnej. 98	
16.2.	Stanowisko do badań w przestrzeni hemisferycznej 150m <sup>3</sup> – drugie stanowisko do badania aktywnych systemów wybuchu. ....	100
16.3.	Stanowisko do badania pasywnych systemów tłumienia wybuchów oraz inne urządzenia przewidziane w projekcie .....	101
16.4.	Pasywny system gaśniczy – tłumik wybuchu .....	103
16.5.	Elementy aktywnego systemu gaśniczego – system HRD .....	103

# 1. Opracowanie założeń do stanowisk badawczych oraz metod badania pasywnych systemów tłumienia wybuchów

## 1.1. Wstęp

Pierwsze badania nad zjawiskiem wybuchu gazów przeprowadzone zostały przez naukowców Berthelota i Vielle'a oraz Mallard'a i Le Chatelier'a w 1881 r. Od tego czasu zjawisko to stało się źródłem fascynacji naukowców i inżynierów. Jedną z motywacji do podjęcia tego rodzaju badań było bezpieczeństwo infrastruktury przemysłowej. Energia wydzielona w trakcie spalania wybuchowego mieszanin palnych bardzo często prowadzi do śmierci personelu i zniszczeń instalacji przemysłowych.

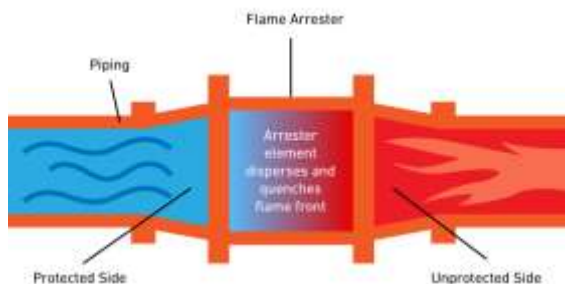
Pierwszy model pozwalający na oszacowanie prędkości detonacji powstał na podstawie praw zachowania energii oraz właściwości termodynamicznych. Model ten opracowany został przez Champana i Jougueta (CJ). Gdy prędkość detonacji jest już znana to przepływ może zostać wyznaczony na podstawie pomiarów prędkości, ciśnienia, stężenia OH oraz temperatury wraz z uwzględnieniem tarcia i wymiany ciepła. W wyznaczeniu prędkości fali ogromną rolę odgrywa powierzchnia dźwiękowa która izoluje front fali od zaburzeń z tyłu. Prędkość fali zależy od stopnia reakcji przed osiągnięciem powierzchni dźwiękowej dla fal idealnych, reakcja jest zasadniczo zakończona w tym momencie, także prędkość fali jest niezależna od kinetyki reakcji chemicznych. Reakcje chemiczne zachodzą w czole fali detonacyjnej, gdzie za falą uderzeniową istnieje cienka (mniej niż 1 mm) strefa reakcji.

Z uwagi na potencjał niszczący zjawiska wybuchu, równoległe nad badaniami zjawisk towarzyszących tym procesom rozpoczęto prace badawcze i doświadczalne pozwalające na przerwanie procesu spalania wybuchowego, jego kontroli oraz ograniczenia skutków. Jednym ze sposobów przerwania wybuchu jest zastosowanie urządzeń pochłaniających jego energię poprzez jej rozproszenie w materiale pochłaniającym oraz rozprężenie objętości czoła fali ciśnienia oraz płomienia. Problemem tutaj jest takie dobranie materiałów aby uzyskać optymalny efekt przerwania procesu spalania przy zachowaniu właściwych parametrów prowadzonego procesu technologicznego. Urządzenia tego typu nazywane są przerywaczami wybuchu (spalania, deflagracji, detonacji, itp.) lub pasywnymi systemami tłumienia wybuchu.

Główne zadania przerywaczy płomienia, deflagracji czy detonacji można ograniczyć do zatrzymania procesu niekontrolowanego spalania przy jednoczesnym zachowaniu przepływu wewnątrz chronionego przewodu lub kanału. Ich zadaniem na instalacjach procesowych jest zapobieganie rozprzestrzenienia się wybuchu na inne elementy instalacji. Praca pasywnego przerywacza płomieni opiera się zwykle na kilku etapach:

- rozprężanie – pochłonięcie energii kinetycznej,
- transport ciepła na powierzchnię elementu gaszącego – obniżenie temperatury,
- zapewnienie maksymalnego bezpiecznego prześwitu szczeliny gaszącej (z ang. maximum experimental safe gap – MESG),
- zapewnienie niewielkiego stopnia oporu dla przepływającego przez rurociąg i tłumik w normalnych warunkach pracy medium.

Poniższy rysunek obrazuje pracę przerywacza płomieni zamontowanego na instalacji.



Rysunek 1 Zasada działania rurowego przerywacza płomieni po prawej stronie strona „niezabezpieczona” w środku element absorbcyjny/tłumiący po lewej stronie „zabezpieczona”

Pierwszym przemysłowo zastosowanym przerywaczem płomienia był wynalazek H. Davy’ego zwany lampą Davyego opracowany i zastosowany w 1817 r. na rzecz górnictwa. Wynalazek ten miał przeciwdziałać zapłonowi metanu w szybach kopalnianych podczas użytkowania zwykłych lamp naftowych. Davy zaproponował osłonięcie lampy naftowej drobną siatką stalową. Siatka pochłaniała znaczną część ciepła, co pozwalało na całkiem bezpieczną pracę urządzeń w kopalniach, gdzie pewna część atmosfery wypełniał metan (siatka nie pozwalała na przeniesienie ognia z wnętrza lampy do objętości szybu kopalnianego). W oparciu o patent Davyego zbudowano wiele kolejnych urządzeń w ciągu kolejnych niemal 200 lat. Współczesne konstrukcje tłumików często sięgają do gęstej siatki jako medium tłumiącego – to właśnie materiał tłumiący jest tak naprawdę kluczowym elementem pasywnego przerywacza płomienia. Podział przerywaczy płomienia jest następujący (zgodnie z normą PN-EN ISO 16852:2017-02 [5])

- Przerywacze rurowe,
  - deflagracji,
  - detonacji,
    - stabilnej,
    - niestabilnej,
- Przerywacze końcowe
  - deflagracji,
  - spalania długotrwałego,
  - spalania krótkotrwałego.
- Przerywacze objętościowe

Przerywacze rurowe zapobiegają rozprzestrzenianiu się ognia pomiędzy częściami chronionej instalacji, np.: na wybranych odcinkach rurociągów czy pomiędzy rurociągami a innymi urządzeniami. Przerywacze deflagracji stosowane są tam, gdzie geometria instalacji nie pozwoli na rozwinięcie się spalania naddźwiękowego. Kiedy istnieje zagrożenie rozwinięcia się spalania do detonacji (geometria instalacji - średnica czy długość rurociągu bądź objętością zbiornika pozwalają na to) stosowane są przerywacze detonacji. Przerywacze końcowe stosowane są wszędzie tam, gdzie wykonywane są np. przedmuchy technologiczne i istnieje obawa przeniesienia się spalania z zewnętrznej atmosfery do urządzenia czy rurociągu. Przerywacze rurowe mogą występować w opcjach dwu i jednokierunkowych oraz w wariantach do zastosowania z cieczami palnymi bądź gazami i parami cieczy palnych.

## 1.2. Stanowisko badawcze w postaci rury detonacyjnej w skali laboratoryjnej

Stanowisko umożliwiające testowanie przebiegów spalania detonacyjnego w kanale w skali laboratoryjnej bazuje na istniejącym w CNBOP-PIB układzie badawczym. Badania przeprowadzono po modernizacji stanowiska i uzbrojenia go w dodatkowe komponenty. Jednym z elementów wpływających na wyniki badań było opracowanie sposobu uzyskiwania jednorodnej mieszaniny gazów: palnego i utleniającego. Opracowane założenia umożliwiły dobór odpowiedniej metody. Mieszanki przygotowywane były na zaprojektowanej aparaturze z wykorzystaniem różnic ciśnień cząstkowych. W skład tego stanowiska wchodzi: mieszalnik (z wykorzystaniem kanału badawczego), układ do wykonywania mieszanek (blok gazów palnych) z zaworami i manometrami pozwalającymi na

przygotowanie mieszanin o dwóch różnych zakresach ciśnień: do 5 bar oraz do 25 bar, zestaw przyłączy z reduktorami, zestaw butli z gazami, z których to przygotowywane były mieszaniny z tlenem oraz z powietrzem.

Opracowane założenia umożliwiły utworzenie ostatecznego układu pomiarowego detonacji w mieszaninach gazowych. Głównym elementem układu jest rura detonacyjna, o średnicy wewnętrznej 170 mm i długości 9000 mm (RD9). Rura wykonana ze stali kwasoodpornej, w postaci trzech odcinków po 3000 mm, z naspawanymi kołnierzami, za pomocą których łączy się odcinki w całość. Obliczeniowe maksymalne ciśnienie pracy rury to 30 bar. Poniżej na rysunku przedstawiono widok fragmentu kołnierza oraz sposobu mocowania rury do ramy nośnej niwelującej drgania rury.



Rysunek 2 Fragment kołnierza oraz sposobu mocowania rury do ramy nośnej

Na krańcowych kołnierzach rury umieszczone zostały pokrywy, z jednej strony pokrywę z elementami zapłonu i przyłączami, zaś na drugim pokrywę z zaworem wylotowym układ odprowadzania spalin. Układ rury wsparty jest na 3 ramach w tzw. układzie Kee-Klamp, do których za pomocą specjalnych ściągaczy przykręcone zostały poszczególne odcinki rury. Poniżej kanały umieszczono część aparatury rejestrującej i sterującej (w tym karty akwizycji i kondycjonery czujników ciśnienia). Poniżej na rysunku przedstawiono widok na lokalizację układu pomiaru ciśnienia cząstkowego oraz układ fragment układu sterowania.



Rysunek 3 Układ rury detonacyjnej przymocowany do systemu nośnego wg technologii Kee-Klamp

Stanowisko wyposażono w niezbędną aparaturę kontrolno-pomiarową, jak również układ do sterowania zapłonem. Poniżej przedstawiono głowicę z układem zapłonowym zlokalizowaną na froncie rury detonacyjnej



Rysunek 4 Głowica rury detonacyjnej wraz z przyłączem świecy zapłonowej i układem sterowania zapłonem.

RD9 jest wyposażone w czujniki ciśnienia zlokalizowane w górnej części płaszcza na całej długości w określonych odstępach umożliwiające wyznaczenie profilu ciśnieniowego fali spalania. W ramach prac koncepcyjnych opracowano sposób mocowania czujnika typu PCB 113B26 na stanowisku, umożliwiający zminimalizowanie wpływu drgań wywołanych przejściem fali spalania na profil rejestrowanego ciśnienia (zmiany napięcia generowane przez czujnik). Poniżej przedstawiono sposób mocowania czujnika.



Rysunek 5 Sposób mocowania czujnika umożliwiający zminimalizowanie wpływu drgań

Stanowisko wyposażone zostało w 3 szt. czterokanałowych kondycjonerów dedykowanych do czujników PCB typu ICP model 482C SERIES, które odpowiednio profilowały i wzmacniały sygnał na karty akwizycji danych. Dane z kondycjonerów trafiały do systemu akwizycji danych zbudowanego z kart analogowo-cyfrowych DAC a następnie przez 3 HUBY do dedykowanego oprogramowania DetSoft zainstalowanego na komputerze PC.

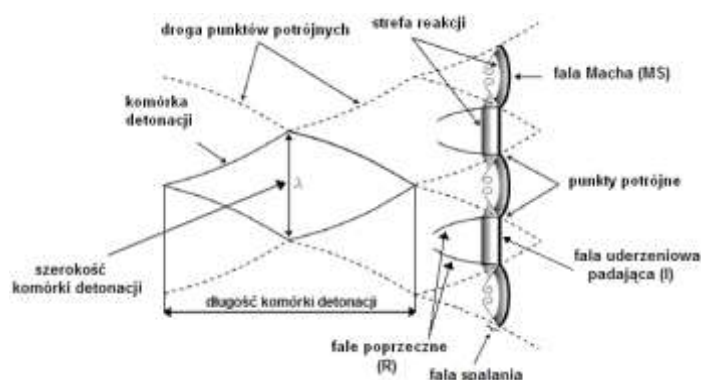
W celu rejestracji fali spalania zastosowano rozwiązanie w postaci czujników jonizacyjnych. Sonda jest urządzeniem rejestrującym moment przejścia zjonizowanego gazu (plazma tuż przed frontem płomienia podczas detonacji). Wielkością wyjściową sondy jest napięcie, które rejestruje w funkcji czasu fakt przejścia fali spalania (rejestracji płomienia) przez daną sondę.

Sonda składa się z dwóch elektrod umieszczonych w gnieździe w odległości 2-3 mm. Na jedną z nich zadana jest odpowiednia wartość napięcia. Napięcie to jest niewystarczające, aby w warunkach panujących przed detonacją (czy normalne warunki atmosferyczne) umożliwić przepływ pełnego sygnału napięciowego (powstania wysokiego piku sygnałowego świadczącego o przejściu spalania). Gdy jednak zjonizowany gaz – plazma „omiecie” elektrody umożliwi zadanemu napięciu przejście na drugą elektrodę i chwilowe zamknięcie obwodu, co zostanie zarejestrowane przez układ jako gwałtowny wzrost napięcia. Oczywiście napięcie wyjściowe będzie ściśle uzależnione od stopnia zjonizowania gazu – im bardziej zjonizowany będzie gaz tym większe napięcie pojawi się na wyjściu (mniejszy opór – większy prąd). Umieszczenie kilku takich sond w różnych miejscach rury pozwala na określenie rozkładu prędkości płomienia w funkcji zarówno czasu jak i odległości (długości rury detonacyjnej). Na rysunku przedstawiono przykład opracowanej sondy jonizacyjnej.



Rysunek 6 Opracowana koncepcja sondy jonizacyjnej

Fala detonacyjna nie składa się z płaskiej fali uderzeniowej, lecz z szeregu fal, poruszających się zarówno w kierunku propagacji frontu płomienia jak i poprzecznie. Pomiędzy falami zachodzą cykliczne sprzężenia tworząc tak zwaną strukturę komórkową detonacji. Na rysunku przedstawiono wygląd płaski fali detonacyjnej.



Rysunek 7 Komórkowa struktura fali detonacyjnej

Standardowym pomiarem dla detonacji jest określenie dominującej odległości pomiędzy falami poprzecznymi  $\lambda$ , lub inaczej tzw. szerokości komórki, która określa strukturę fal poprzecznych. Pomiar ten stanowi ważny materiał porównawczy w trakcie oceny skutków wybuchów.

Pomiar struktury fali detonacyjnej, który był istotnym elementem prowadzonych w projekcie badań, jest możliwy za pomocą tzw. techniki smoke foil. Im mniejsze uzyskiwane komórki detonacyjne, tym mieszanina gazowa jest bardziej podatna na przejście do detonacji. Analizując strukturę fali detonacyjnej możliwa jest ocena ryzyka wystąpienia zjawiska detonacji. Smoke foil są cienkimi arkuszami blachy, na które naniesiono warstwę sadzy o gr. ok. 0.02-0.05 mm. Tak przygotowanymi foliami wyścielany jest koniec rury detonacyjnej. Propagująca fala detonacyjna odciska się na folii, tworząc możliwy do analizy komórkowy materiał. Przykład odcisniętej fali detonacyjnej przedstawiono na poniższym rysunku.

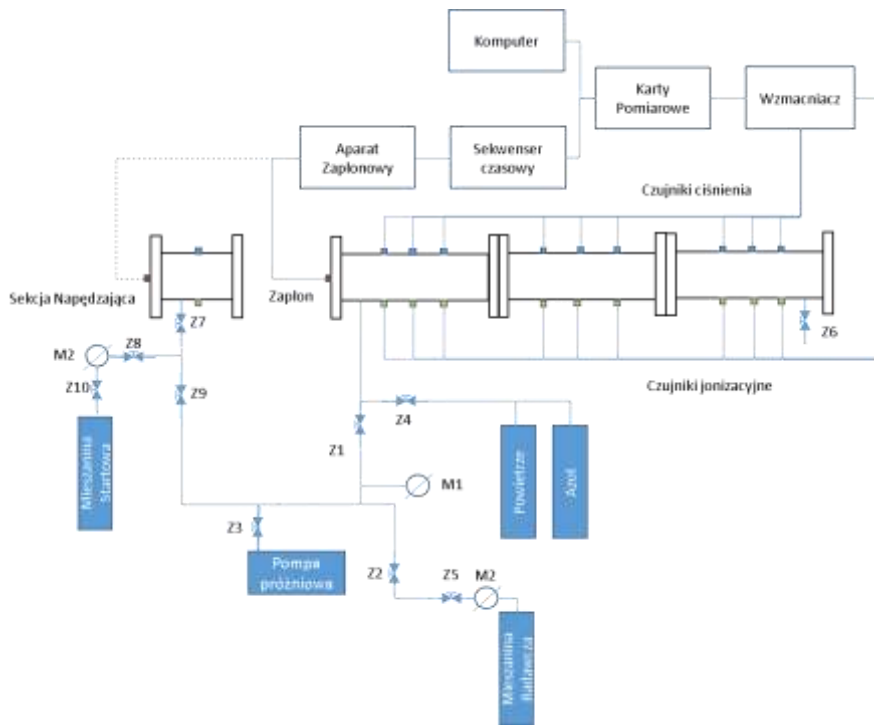




Rysunek 8 Przykładowy wynik rejestracji smoke foil (wodór powietrze, 30%)

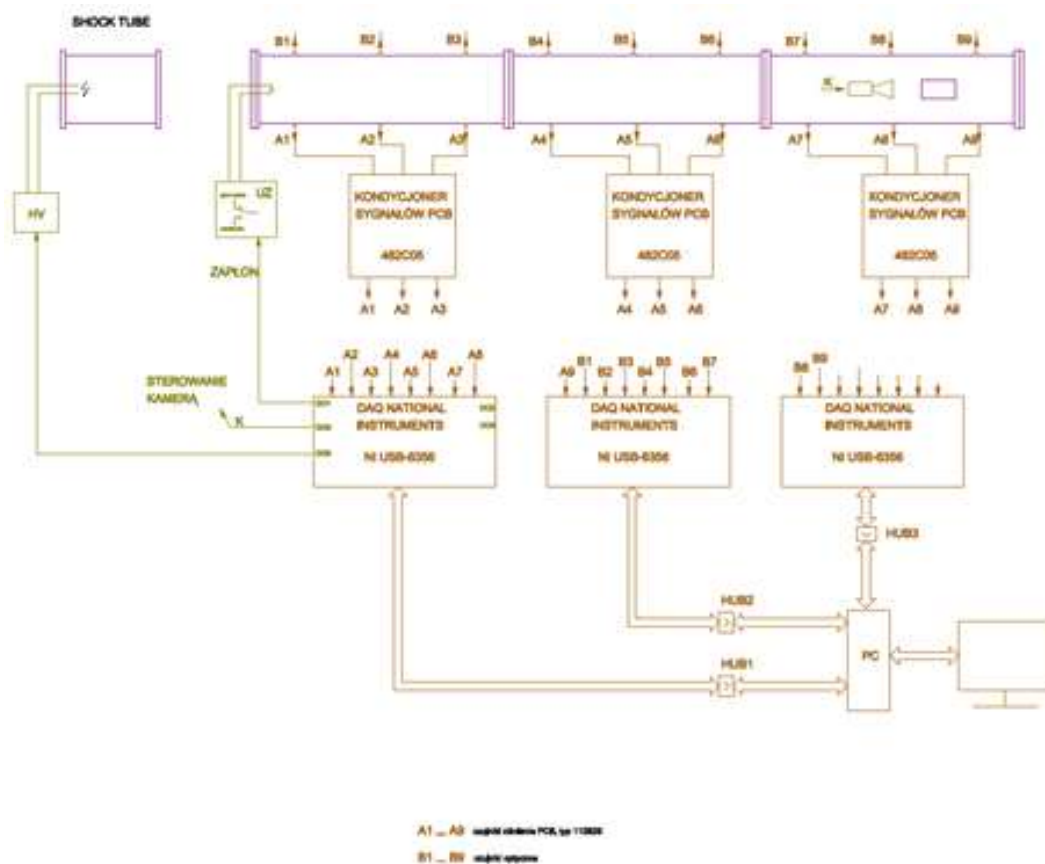
Ogólnie odnosząc się do wyników rejestrowanej w ten sposób fali detonacyjnej to można przyjąć, że im mniejsze/drobniejsze komórki, tym mieszanina jest bardziej podatna na przejście do detonacji (bardziej niebezpieczna z punktu widzenia możliwości przejścia spalania laminarnego do detonacyjnego). Analizując strukturę fali detonacyjnej, np. na elementach instalacji przemysłowych możliwa jest ocena tego zjawiska po jego wystąpieniu i analizie przyczyn zdarzenia.

Poniżej przedstawiono schemat stanowiska badawczego RD9 (rura detonacyjna 9 m) przeznaczonej do wyznaczania parametrów detonacji mieszanin gazowych.



Rysunek 9 Schemat stanowiska badawczego RD9

Poniżej przedstawiono schemat pomiarowy parametrów fizycznych określających zjawisko detonacji.



Rysunek 10 Układ schematu pomiarowego

### 1.3. Stanowisko badawcze w postaci rury detonacyjnej w skali rzeczywistej i pasywny element zabezpieczenia przed wybuchem

Stanowisko do badań zaprojektowano i wykonano jako kanał rurowy (przekrój kołowy), o średnicy wewnętrznej 0,35 m. Materiałem budulcowym jest stal nierdzewna. Kanał składa się z 9 odcinków rurowych o długościach:

- 3000 mm (6 odcinków),
- 495 mm (2 odcinki),
- 995 mm (1 odcinek)

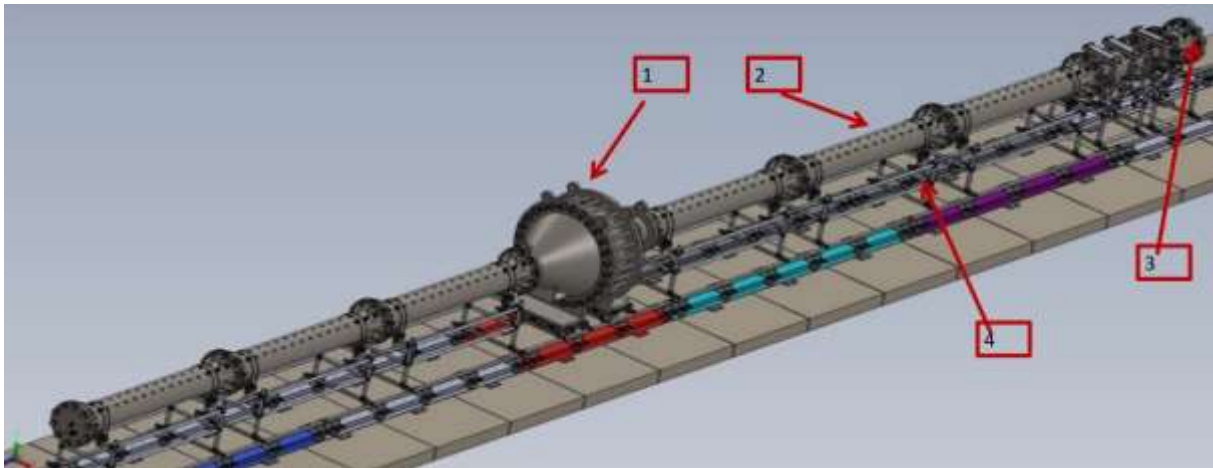
przedstawionych na rysunku poniżej.



Rysunek 11 Rzeczywiste elementy układu rury detonacyjnej – widoczne kolnierze służące do łączenia elementów i gwintowane otwory/gniazda na czujniki

W skład stanowiska wchodzi pasywny tłumik detonacji o wymiarach zew. średnicy ok. 1415 mm i długości konstrukcji 2500 mm. Tłumik niejako dzieli rurę na dwie części – jedną stronę „zabezpieczoną” o długości ok. 9 m i drugą stronę, w której inicjowany jest zapłon - o długości ~11,3 m. Całość znajduje się na systemie jezdnym, który pozwala poruszać wybranymi segmentami wzdłuż osi urządzenia. Odcinki

rurowe powiązane są za pomocą łoży i obejm z wózkami (w konstrukcji kee-klamp) z osiami jezdnymi, wózki te posadowione są na stalowych rurach, które to przyspawane są do pryzm. Pryzmy przykręcone są do osadzonych na betonowych płytach dwuteowników. Oba końce kanału badawczego zamknięte są deklami. Przedni dekiel posiada przyłącze na sprężone powietrze, gniazdo świecy zapłonowej oraz opcjonalne przyłącze (dwa wyprowadzenia elektrod) umożliwiające podłączenie główki zapalczącej (zapłon więc może być realizowany w dwojaki sposób). Tylny dekiel posiada zawór spustowy. Poniżej przedstawiono rysunek w 3D stanowiska rura detonacyjna 20 m (RD20) wraz z tłumikiem detonacji.

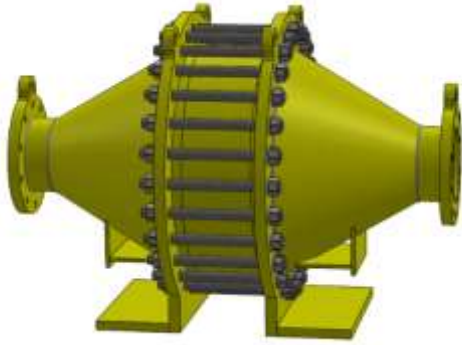


Rysunek 12 Widok układu do badań – kanału detonacyjnego z tłumikiem pasywnym – model 3d. 1-tłumik wybuchu, 2-układ czujników ciśnienia/płomienia, 3-część zapłonowa, 4-autonomiczne podwozie w systemie Kee Klamp

Odcinki rur (oba końce) posiadają przyspawane i wzmacniane żebrami kołnierze. Kołnierze mają na przemian pozostawiony wpust bądź wyfrezowany rowek (promieniowo) – za pomocą których ustalane jest położenie sąsiadujących odcinków względem siebie i zapewniona ich osiowość. Odcinki te łączy się ściągając kołnierze poprzez otwory (wywiercone na wspólnym obwodzie, prostopadłe do ich osi). Kołnierze mają również wyfrezowane promieniowo dwa rowki, w których osadza się uszczelki typu o-ring. Podwójne zastosowanie uszczelnienia tego typu gwarantuje najwyższy poziom szczelności połączeń.

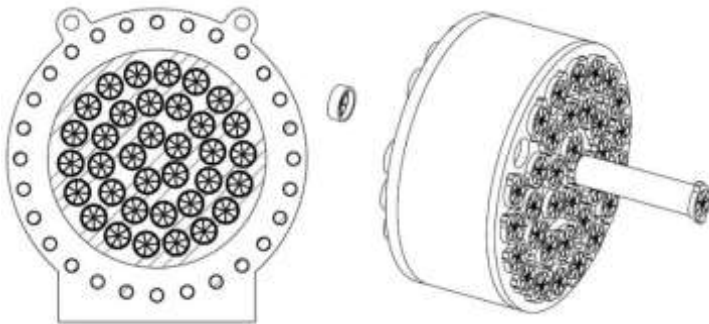
Kanał detonacyjny na całej swej długości posiada dwa rzędy (na obwodzie) otworów z gwintem M20, otwory te rozmieszczone są w równych odległościach od siebie na każdym z odcinków rury. Pozwala to na zastosowanie różnych konfiguracji rozmieszczenia czujników ciśnienia i jonizacji. W celach pomiarów i kontroli dynamicznie zmieniającego się podczas badań detonacyjnych ciśnienia wewnątrz rury, wyposażono ją w 10 piezoelektrycznych czujników ciśnienia (PCB 113B26) o maksymalnej wartości pomiarowej – 68,95 bar oraz rozdzielczości pomiarowej 14 Pa (zakres temperaturowy pracy czujników to  $-73^{\circ}\text{C}$ - $135^{\circ}\text{C}$  – maksymalna temperatura „krótkiej” pracy to  $1649^{\circ}\text{C}$ ). Czujniki piezoelektryczne to zabudowane w niewielkiej obudowie (tulei) kryształy piezoelektryczne reagujące na zmianę ciśnienia proporcjonalnie wytwarzanym napięciem – co po wprowadzeniu stałej czujnika pozwoli na zamianę sygnału napięciowego na odpowiadające mu ciśnienie. Kanał detonacyjny w drugim rzędzie otworów M20 ma umieszczone sondy jonizacyjne – 10 szt. Zadaniem sondy jonizacyjnej jest wykrycie fali spalania. Urządzenia te pozwalają ocenić skuteczność tłumika – na zasadzie sprawdzenia czy przeniesie on falę spalania na drugą „zabezpieczoną” stronę. Akwizycja danych z pomiarów jak i sterowanie procesem zapłonu mieszaniny realizowane są pomocą układu sterowania (w skład wchodzi: komputer z oprogramowaniem ANKO DET SOFT, wielokanałowe karty pomiarowe PCB i kondycjonery).

Na poniższym rysunku przedstawiono szkic techniczny przerywacza spalania – tłumika detonacyjnego będącego założonym efektem (demonstratorem) projektu. Tłumik wykonany jest w postaci dwóch flansz połączonych tuleją z wkładami tłumiącymi. Materiałem budulcowym jest stal czarna, wytrzymałość i połączenia zostały obliczone i dobrane tak, aby wytrzymać warunki badania (detonację).



Rysunek 13 Przerwywacz płomienia – tłumik do RD20 m

Poniższa rysunek przedstawia widok na wewnątrz przerwywacza detonacji. Na modelu widoczna jest konstrukcja podtrzymująca wkłady rurowe (dwie równoległe tarcze z otworami). Urządzenie zawiera wkłady rurowe wypełnione gęstą stalową siatką i stalowymi hartowanymi kulkami.



Rysunek 14 Przerwywacz płomienia – wybrane przekroje

Tłumik oparty jest na układzie jezdny, wózki z łożyskowanymi osiami, który pozwala na rozłączenie flanszy od drugiej części – celem uzupełnienia tłumika bądź wymiany wkładów. Tak więc obie flansze wsparte są na wózkach a część środkowa na specjalnej kobyłce z wibroizolatorami. Wózki pozwalają na ustawienie osiowe tłumika oraz umożliwiają pewną regulację urządzenia w poziomie.

Stanowisko do testowania pasywnych systemów tłumienia wybuchów w skali rzeczywistej składa się z:

- stanowiska do przygotowywania mieszanin gazowych,
- przeszkód w konfiguracji 2D,
- układu inicjującego shock tube,
- piezoelektrycznych czujników ciśnienia dynamicznego,
- sond optycznych,
- układu zapłonowego,
- układu akwizycji danych,
- smoke foil.

Zastosowany układ przygotowywania mieszanin gazowych stechiometrycznych umożliwia przygotowanie jej w oparciu o metodę ciśnień cząstkowych. Planowo w jego skład wchodzi mieszalnik, układ do wykonywania mieszanek (blok przygotowywania gazów palnych w postaci układu zaworów z przyłączami i pomiarem ciśnienia) oraz butli z planowanymi do badań gazami.

Badania poprawności działania tłumika detonacji przewidziano na RD20. Testy zaplanowano dla gazów palnych testowych, tj. metan, propan i wodór w stężeniu stechiometrycznym. Zaplanowano wykonanie badań przy zachowaniu każdorazowo wystąpienia spalania detonacyjnego w RD20. Przemieszczanie się fali ciśnienia i płomienia monitorowane jest przez układ czujników ciśnienia i jonizacyjnych podłączonych do systemu akwizycji danych. Czujniki ciśnienia i jonizacyjne zostały umieszczone w określonych odstępach od siebie w górnej części kanału.

Skuteczność tłumika detonacji zostanie dowiedziona, jeśli w każdym przebiegu spalania detonacyjnego dla określonego gazu zostanie ono przerwane. Wykazane zostanie to poprzez brak odczytu obecności fali płomienia w mieszaninie gazowej znajdującej się po prawej stronie tłumika detonacji w określonej odległości. Elementem pomocniczym wskazującym na zachodzenie dodatkowych zjawisk, np. zjawiska sprężania gazu przez falę ciśnienia, będzie rejestracja zmian ciśnienia w mieszaninie palnej po stronie chronionej (prawa strona tłumika detonacji).

## 2. Budowa bazy danych charakterystyk spalania detonacyjnego i deflagacyjnego na podstawie badań doświadczalnych

W tym zadaniu utworzono bazę danych zawierającą parametry detonacji i deflagacji. Dostęp do bazy danych został zapewniony przez stronę [www.intexonlie.pl](http://www.intexonlie.pl).

### 2.1. Badania parametrów deflagacji:

Spalania deflagacyjnego dla:

- cieczy palnych: toluen, heksan, etanol, aceton
- pyłów palnych: drewno sosnowe, mąka, aluminium, kakao.

Badania parametrów spalania deflagacyjnego par cieczy i pyłów.

Do celów badawczych w tej części projektu wykorzystano następujące substancje:

- alkohol etylowy,
- heksan,
- toluen,
- aceton.

Wykorzystano następujące metody badawcze:

- dla temperatury zapłonu cieczy palnych w tyglu zamkniętym z wykorzystaniem aparatów Pensky`ego-Martensa według polskiej normy PN-EN ISO 2719 i Abła zgodnie z polską normą PN-EN ISO 13736;
- dla temperatury zapłonu i palenia produktów naftowych w tyglu otwartym Clevelanda według opisu polskiej normy PN-EN ISO 2592;
- dla temperatury samozapłonu zgodnie z polską normą PN-EN 14522.

W ramach badania parametrów spalania deflagacyjnego przeprowadzono analizy wybuchowości wybranych pyłów przemysłowych tj.:

- mąka Poznańska typ 500,
- pył sosnowy,
- pył aluminium,
- pył kakao.

Badanie eksperymentalne wykonano zgodnie z normą PN-EN 14034:2011 Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu składającą się z następujących części:

- Część 1: Oznaczanie maksymalnego ciśnienia wybuchu  $p_{max}$  obłoków pyłu.
- Część 2: Oznaczanie maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu  $(dp/dt)_{max}$  obłoków pyłu.
- Część 3: Oznaczanie dolnej granicy wybuchowości DGW obłoków pyłu.

Opracowano dane wszystkich otrzymanych wyników w formie tabelarycznej i przedstawiono w tabelach 1-8.

Tabela 1 Wyniki oznaczeń parametrów  $p_{max}$  i  $(dp/dt)_{max}$  w skali laboratoryjnej etanolu, acetonu, heksanu, toluenu

Masa [g]	Stężenie [g/m <sup>3</sup> ]	$p_{max}$ [bar]	$dp/dt$ [bar/s]	$K_g$ [bar*m/s]
Alkohol etylowy 96% cz.				
2,4	120	6,71	291,41	78,97
2,9	145	6,93	333,76	90,45
3,3	165	6,89	305,48	82,79
3,6	180	6,46	158,22	42,88
4,13	206,5	5,97	122,57	33,22

4,9	245	5,65	89,59	24,28
5,6	280	3,05	19,05	5,16
Aceton cz. d. a.				
1,8	90	6,03	159,16	43,13
2,2	110	6,73	269,58	73,06
2,43	121,5	6,89	312,32	84,64
2,7	135	6,83	280,46	76,01
2,9	145	6,78	221,99	60,16
3,1	155	6,51	166,72	45,18
3,8	190	3,73	26,9	7,29
n-heksan cz. d. a.				
0,96	48	5,06	102,56	27,79
1,295	64,75	6,57	278,8	75,56
1,45	72,5	6,71	333,43	90,36
1,61	80,5	7,16	386,28	104,68
1,76	88	6,76	313,81	85,04
1,93	96,5	7	357,56	96,9
2,24	112	6,24	138,95	37,65
Toluen cz. d. a.				
1,2	60	5,74	147,31	39,92
1,63	81,5	6,82	315,89	85,61
1,8	90	7,09	321,42	87,1
2	100	6,84	275,27	74,6
2,2	110	7,05	283,53	76,84
2,44	122	6,17	197,9	53,63
2,8	140	2,94	32,25	8,74

Tabela 2 Wyniki oznaczeń parametrów DGW i GGW w skali laboratoryjnej etanolu, acetonu, heksanu, toluenu

Masa [g]	Stężenie [% mol]	Pmax [bar]	dp/dt [bar/s]	Kg [bar*m/s]
Alkohol etylowy 96% cz.				
0,92	2,0	0,01	3,42	0,93
1,13	2,5	0,01	4,17	1,13
1,24	2,7 (DGW)	0,02	3,85	1,04
1,29	2,8	0,59	13,41	3,63
1,33	2,9	0,98	4,98	1,35
1,36	3,0	1,78	9,75	1,64
1,84	4,0	4,45	96,44	26,14
2,4	5,2	6,71	291,41	78,97
2,9	6,3	6,93	333,76	90,45
3,6	7,8	6,46	158,22	42,88
4,13	9,0	5,97	122,57	33,22
4,9	10,7	5,65	89,59	24,28
5,6	12,2	3,05	19,05	5,16
6,44	14,0	3,15	23,63	6,4
7,37	16,0	3,14	22,24	6,03
8,28	18,0	2,39	22,99	6,23
9,18	20,0	1,82	22,92	6,21
10,12	22,0	1,55	33,08	8,97
11,04	24,0	1,35	22,78	6,17
11,47	24,9	2,81	31,43	8,52
11,59	25,2 (GGW)	0,04	4,07	1,1
11,68	25,4	0,01	3,5	0,95
11,96	26,0	0,39	5,06	1,37
Aceton cz. d. a.				
0,57	1,0	0,01	3,61	0,98
0,58	1,0	0,01	3,52	0,95
0,87	1,5	0,03	10,48	2,84
1,04	1,8	0,01	3,51	0,95
1,1	1,9 (DGW)	0,01	4,41	1,19

1,14	2,0	1,84	16,05	4,35
2,2	3,8	6,73	269,58	73,06
2,9	5,0	6,78	221,99	60,16
3,8	6,6	3,73	26,9	7,29
4,91	8,5	0,96	6,76	1,83
5,05	8,7	0,98	7,46	2,02
5,16	8,9	0,73	5,82	1,58
5,28	9,1	1,12	7,86	2,13
5,39	9,3 (GGW)	0,09	4,66	1,26
5,51	9,5	0,04	3,07	1,85
6,08	10,5	0,03	4,71	1,28
7,24	12,5	0,01	3,1	0,84
n-Heksan cz. d. a.				
0,44	0,5	0,01	3,87	1,05
0,65	0,8 (DGW)	0,01	4,08	1,1
0,76	0,9	1,43	7,11	1,93
0,87	1,0	4,56	65,28	17,69
1,61	1,9	7,16	386,28	104,68
2,24	2,6	6,24	138,95	37,65
3,38	3,9	0,85	6,25	1,69
4,14	4,8	0,82	6	1,62
4,31	5,0	0,65	5,07	1,38
4,47	5,2	1,5	10,49	2,84
4,65	5,4 (GGW)	0,09	4,16	1,13
4,82	5,6	0,04	4,97	1,35
5,68	6,6	0,01	6,5	1,76
Toluen cz. d. a.				
0,76	0,8	0,02	11,66	3,16
0,83	0,9 (DGW)	0,03	4,37	1,18
0,96	1,0	3,63	31,65	8,51
1,2	1,3	5,74	147,31	32,92
2	2,2	6,84	275,27	74,6
2,8	3,0	2,94	32,25	8,75
4,63	5,0	0,8	11,76	3,19
4,78	5,2	0,84	26,6	7,21
4,98	5,4 (GGW)	0,23	4,72	1,28
5,53	6,0	0,07	3,89	1,05

Tabela 3 Wyniki oznaczeń parametrów temperatury zapłonu etanolu, acetonu, heksanu, toluenu w zależności od zastosowanej metody i temperatury zapłonu teoretycznej na podstawie temperatury wrzenia badanych cieczy

Badana substancja	Temp. zapłonu wg. literatury	Temp. zapłonu wg. Pensky'ego-Martensa	Temp. zapłonu wg. Abła	Temp. zapłonu wg. Clevelanda	Obliczona temperatura zapłonu
Heksan	-22,0°C	-22,68°C	-22,38°C	-	-23,01°C
Alkohol etylowy	+12,0°C	+11,5°C	+12,0°C	+14,5°C	+8,1°C
Toluen	+4,0°C	+4,0°C	+4,0°C	-	+5,1°C
Aceton	-19,0°C	-	-19,0°C	-	-20,3°C

Tabela 4 Wyniki oznaczeń parametrów temperatury samozapłonu etanolu, acetonu, heksanu, toluenu

Badana substancja	Temperatura samozapłonu wg literatury	Wyznaczona temperatura samozapłonu
Heksan	+220,0oC	+246,5oC
Alkohol etylowy	+425oC	+441,5oC
Toluen	+535oC	+554oC
Aceton	+465oC	+487,2oC



Tabela 5 Wyniki oznaczeń parametrów pmax, (dp/dt)max w skali laboratoryjnej drewna sosnowego, mąki, pyłu aluminium i kakao

Masa [g]	Stężenie [g/m <sup>3</sup> ]	Pex [bar]	Pmax [bar]	dp/dt [bar/s]	Kst [bar*m/s]
Mąka Poznańska typ 500					
5	250	5,61	5,63	93,92	25,45
10	500	6,42	6,58	134,22	36,37
15	750	6,77	6,99	149,05	40,39
20	1000	6,62	6,81	155,89	42,25
25	1250	6,41	6,55	168,24	45,59
30	1500	6,35	6,49	157,34	42,64
35	1750	6,21	6,33	158,89	43,06
40	2000	6,21	6,33	196,6	53,28
45	2250	5,96	6,04	221,43	60,01
50	2500	6,15	6,26	210,3	56,99
55	2750	6,25	6,38	214	57,99
Pył drewna sosnowego					
5	250	5,68	5,71	114,95	31,15
10	500	7,01	7,28	237,27	64,3
15	750	7,19	7,49	253,87	68,8
20	1000	7	7,26	279,54	75,76
25	1250	6,9	7,14	318,77	86,39
30	1500	6,83	7,06	302,47	81,97
35	1750	6,54	6,72	292,18	79,18
Pył aluminium					
5	250	7,53	7,9	399,96	108,39
10	500	8,72	9,35	612,83	166,08
15	750	9,55	10,38	668,25	181,1
20	1000	9,5	10,32	704,54	190,93
25	1250	8,65	9,27	448,83	121,63
Pył kakao					
5	250	5,07	4,89	94,48	25,6
10	500	6,41	6,56	124,64	33,78
15	750	6,73	6,94	184,12	49,9
20	1000	6,38	6,53	175,29	47,5
25	1250	6,18	6,29	165,65	44,89

Tabela 6 Wyniki oznaczeń parametrów DGW w skali laboratoryjnej drewna sosnowego, mąki, pyłu aluminium i kakao

Masa [g]	Stężenie [g/m <sup>3</sup> ]	Pex [bar]	Zapłon obfoku pyłu [tak/nie]
Mąka Poznańska typ 500			
10	500	6,18	tak
5	250	3,65	tak
2,5	125	2,27	tak
1,2	60	0,42	nie
1,2	60	0,25	nie
1,2	60	0,22	nie
Pył drewna sosnowego			
10	500	7,45	tak
5	250	5,92	tak
2,5	125	4,39	tak
1,2	60	2,89	tak
0,6	30	0,21	nie
0,6	30	0,23	nie
0,6	30	0,23	nie
Pył aluminium			
2,5	125	4,47	tak

1,2	60	0,62	tak
0,6	30	0,16	nie
0,6	30	0,17	nie
0,6	30	0,16	nie
Pył kakao			
10	500	5,01	tak
5	250	1,37	tak
2,5	125	0,24	nie
2,5	125	0,19	nie
2,5	125	0,27	nie

Tabela 7 Wyniki oznaczeń minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu drewna sosnowego, mąki, pyłu aluminium i kakao

Grubość warstwy, rozmiar ziarna	Max. dop. temp. powierzchni urządzenia [°C]	MTZW [°C]
Mąka Poznańska typ 500		
5 mm, ≤200 μm	345	420
12,5 mm, ≤200 μm	325	400
Pył drewna sosnowego		
5 mm, ≤200 μm	235	310
12,5 mm, ≤200 μm	205	280
Pył aluminium		
5 mm, ≤200 μm	335	410
12,5 mm, ≤200 μm	260	370
Pył kakao		
5 mm, ≤200 μm	175	250
12,5 mm, ≤200 μm	135	230

Tabela 8 Wyniki oznaczeń minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu drewna sosnowego, mąki, pyłu aluminium i kakao

Rozmiar ziarna	Max. dop. temp. powierzchni urządzenia [°C]	MTZO [°C]
Mąka Poznańska typ 500		
≤71 μm	334	500
Pył drewna sosnowego		
≤71 μm	240	360
Pył aluminium		
≤71 μm	346	520
Pył kakao		
≤71 μm	380	570

Analiza wyników uzyskanych pokazuje, że zapalenie się atmosfery pyłowo-powietrznej uzależnione jest od wielu czynników takich jak: wilgotność pyłu, skład chemiczny pyłu i jego rozdrobnienie, temperatura powietrza, itd. Przeprowadzona w projekcie analiza parametrów wybuchowości wykonana zgodnie z normą PN-EN 14034, pozwoliła na określenie zagrożenia pożarowo-wybuchowego stwarzanego przez badane pyły i może być użyta w wybraniu właściwych środków zabezpieczających w celu uniknięcia lub zminimalizowania ryzyka powstania pożaru lub wybuchu w zakładach przemysłowych.

Oznaczenie temperatury zapłonu i samozapłonu cieczy, jest bardzo ważnym parametrem, ze względu na bezpieczeństwo pożarowe i ochronę przeciwpożarową. Pozwala na określenie rzeczywistych zagrożeń wynikających z przechowywania bądź transportu substancji niebezpiecznych. Ponadto, dzięki znajomości tych parametrów można podjąć odpowiednie kroki, które będą mogły zapobiegać ewentualnym zagrożeniom.

Najbardziej niebezpieczną cieczą pod względem pożarowym spośród analizowanych w powyższej pracy badawczej czterech cieczy palnych okazał się być heksan dla którego wartość maksymalnego ciśnienia wybuchu wyniosła 7,16 bar a wartość maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu wyniosła 386,28 bar/s.

Na wartość  $p_{max}$  i  $(dp/dt)_{max}$  wpływ ma m.in.: temperatura i ciśnienie początkowe mieszaniny wybuchowej, objętość i kształt zbiornika, stężenie gazu palnego, stężenie tlenu w mieszaninie par cieczy palnych, czas rezydencji gazu, rodzaj i pozycja położenia bodźca energetycznego oraz prędkości rozprzestrzeniania się płomienia. Wartości oznaczonych granic wybuchowości za pomocą różnych metod są trudne do porównania, ponieważ różnorodność warunków w jakich dokonywane są pomiary oraz rodzaj aparatury wykorzystywanej w tym celu powoduje bardzo dużą rozbieżność wyników.

Należy podkreślić, że każda z przebadanych cieczy może stwarzać bardzo poważne zagrożenie wybuchowe powodujące wiele zniszczeń w miejscach, w których zostaną nagromadzone w ilościach niebezpiecznych to znaczy ich stężenie znajdzie się w zakresie granic wybuchowości i będzie przyłączony do niej efektywny bodziec energetyczny. Jeżeli nie zostaną zastosowane odpowiednie środki zapobiegawcze może dojść do zapłonu i poważnej awarii.

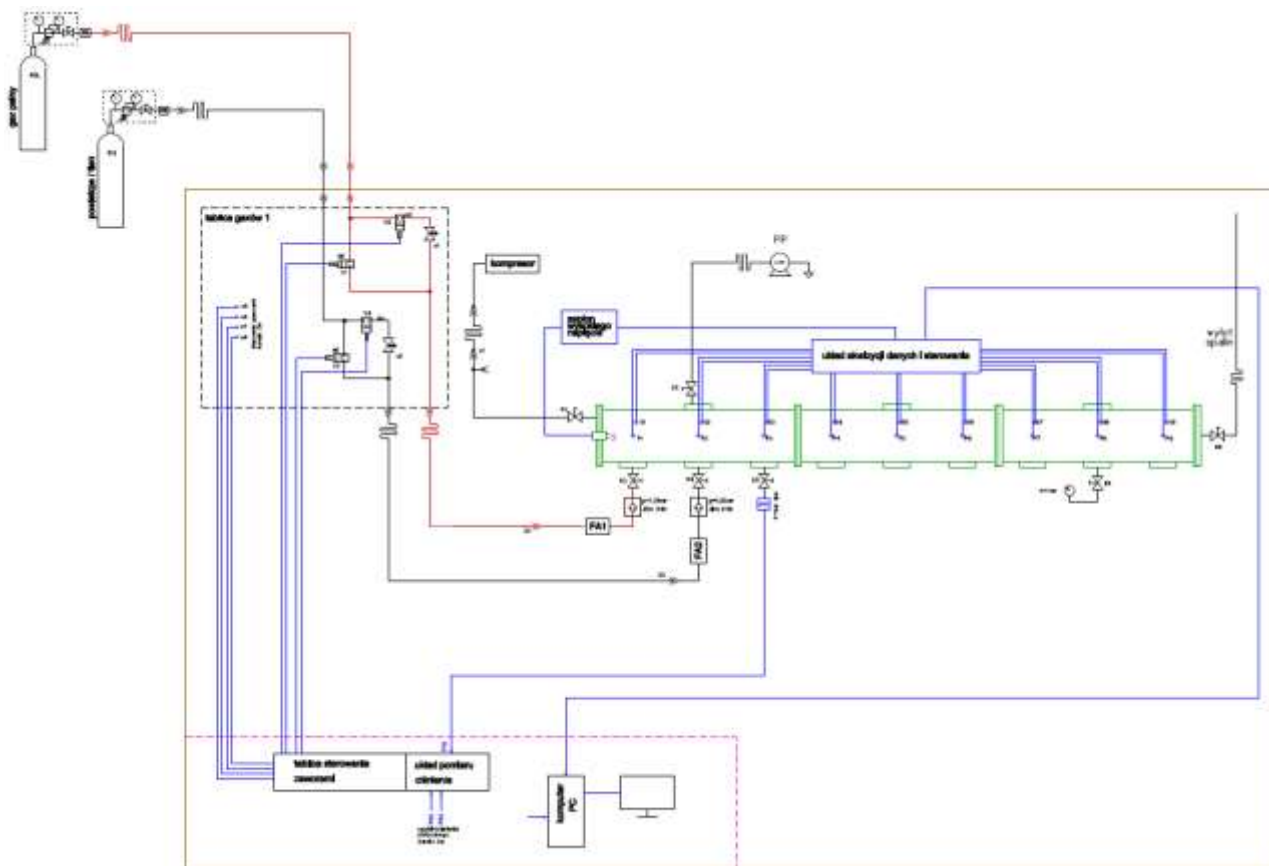
Aspektem na jaki warto zwrócić również uwagę jest wartość dolnej granicy wybuchowości oraz zakresy wybuchowości przebadanych cieczy. Wartości tych parametrów należałoby porównywać jednocześnie, gdyż nie sposób stwierdzić, która ciecz jest bardziej niebezpieczna. Patrząc na zakres granic wybuchowości najbezpieczniejszą cieczą jest toluen z zakresem 4,5%, ponieważ spośród przebadanych cieczy ma on największy zakres stężeń, w których wytwarza atmosferę wybuchową. Jednakże biorąc pod uwagę fakt, że w jakichkolwiek procesach technologicznych czy miejscach, w których występuje możliwość wytworzenia atmosfery wybuchowej jest to związane z przekroczeniem dolnej granicy wybuchowości. Dlatego należy również patrzeć na tę wartość, ponieważ w tym wypadku najbezpieczniejszą cieczą spośród przebadanych jest alkohol etylowy, gdyż ma najwyższą dolną granicę wybuchowości. Dzięki czemu aby nastąpiło jej przekroczenie musi zostać zgromadzone największe stężenie. Należy więc stwierdzić, że to wartość dolnej granicy wybuchowości jest parametrem określającym w dużej mierze czas i szybkość powstania mieszaniny wybuchowej.

Przy doborze zabezpieczeń przeciwybuchowych należy pod uwagę wziąć temperaturę procesów technologicznych, przy których może tworzyć się atmosfera wybuchowa. Wzrost temperatury powoduje obniżenie granic wybuchowości. Jest to bardzo ważny aspekt biorąc pod uwagę obszary, gdzie może tworzyć się atmosfera wybuchowa. Z uwagi na to, iż wielu procesom towarzyszy podwyższona temperatura, możliwość wytworzenia atmosfery wybuchowej jest znacznie bardziej prawdopodobna w stosunkowo krótszym czasie, gdyż potrzeba mniejszej ilości substancji do osiągnięcia dolnej granicy wybuchowości. Wartości granic wybuchowości ustalone zależą od warunków zewnętrznych takich jak temperatura, ciśnienie. Jest to ważne, gdyż podczas dokonywania oceny zagrożenia wybuchem w określonym miejscu należy wziąć pod uwagę również panujące warunki w danym pomieszczeniu czy przestrzeni, aby odpowiednio wyznaczyć ilość substancji jaką można zgromadzić w danym miejscu i zapobiec awarii. W celu zminimalizowania rozbieżności jakie mogą powstać w wyniku wyznaczania granic wybuchowości w różnych warunkach i za pomocą różnych metod należy ujednoczyć system wyznaczania granic wybuchowości.

Reasumując wszędzie gdzie istnieje możliwość wytworzenia się atmosfery wybuchowej powinna zostać dokonana ocena zagrożenia wybuchem, do której niezbędne są informacje o wybuchowości danej cieczy. Jeżeli w określonych miejscach znajdują się takie strefy to należy w nich zachować szczególną ostrożność i rozważyć oraz zastosować sposoby zapobiegania powstawaniu wybuchu lub niwelowaniu jego skutków.

## **2.2. Badanie parametrów detonacji:**

Badania parametrów detonacji wykonano dla mieszanin wodór – tlen – powietrze, metan – powietrze – tlen i propan – tlen – powietrze. Określono graniczne stężenie paliwa dla propagacji detonacji w rurze o średnicy 170 mm i długości 9 m. Dokonano pomiarów ciśnienia propagującej fali uderzeniowej, prędkości detonacji oraz wielkości komórek detonacyjnych. Badania przeprowadzono na stanowisku badawczy przedstawionym na schemacie.



Rysunek 15 Stanowisko badawcze rura detonacyjna RD9

Wartości charakterystyczne detonacji w badanych mieszaninach przedstawiono w tabeli 9. Obliczenia ww. parametrów wykonane zostały na bazie modelu ZND z wykorzystaniem bibliotek Cantera, SDToolbox oraz mechanizmu reakcji GRI30.

Tabela 9 Charakterystyki detonacji mieszanin gazowych

Mieszanina palna	DGP [%]	GGP [%]	P <sub>vN</sub> [bar]	TCJ [K]	PCJ [bar]	CJvel [m/s]
wodór - powietrze	15.0	63.5	13.3	2871	7.26	1953
wodór - tlen	15.0	90.0	15.7	3550	9.01	2780
metan powietrze	6.3	13.5	15.2	2780	8.02	1790
metan - tlen	10.0	56.0	54.4	3470	54,5	2381
propan - powietrze	2.1	10.1	33.5	3017	18.0	1805
propan - tlen	2.5	42.5	70.0	4312	70.0	2368

DGP - dolna umowna granica detonacji

GGP - górna umowna granica detonacji

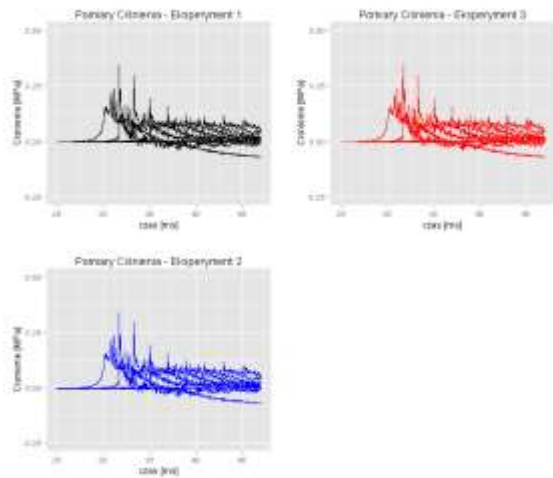
TCJ - temperatura w fali detonacyjnej Chapmana Jouget

P<sub>vN</sub> - Ciśnienie w fali detonacyjnej von Neumana

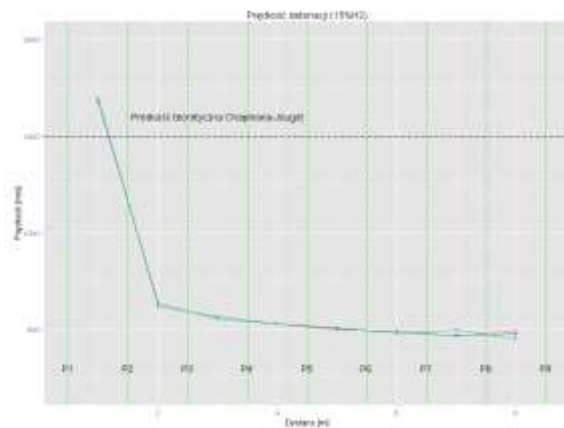
PCJ - Ciśnienie Chapmana Jouget

CJvel - prędkość propagacji fali Chapmana Jouget

Wyniki badań eksperymentalnych prowadzonych na RD9<sup>1</sup>  
 Badania eksperymentalne mieszaniny wodoru (15%) i powietrza

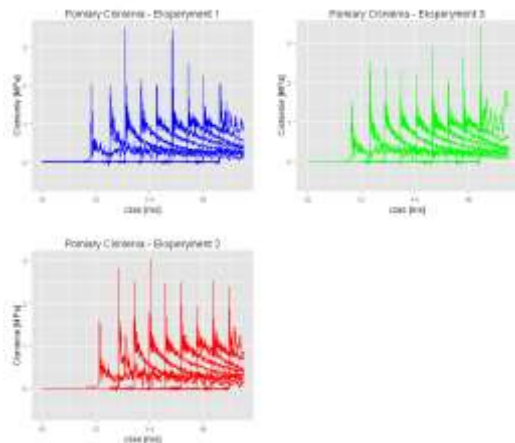


Rysunek 16 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 15%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów. Brak detonacji

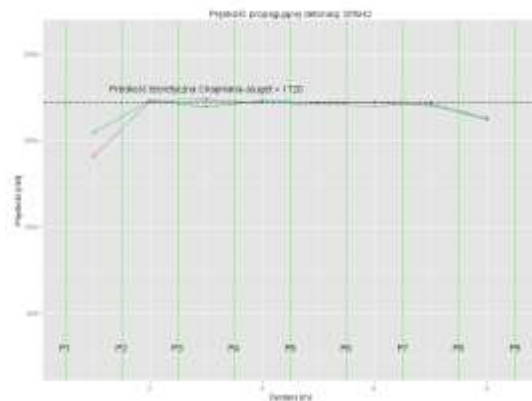


Rysunek 17 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 15%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów. Brak detonacji

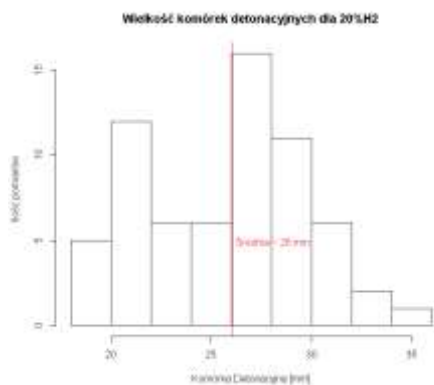
Badania eksperymentalne mieszaniny wodoru (20%) i powietrza



Rysunek 18 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 20%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów. Detonacja



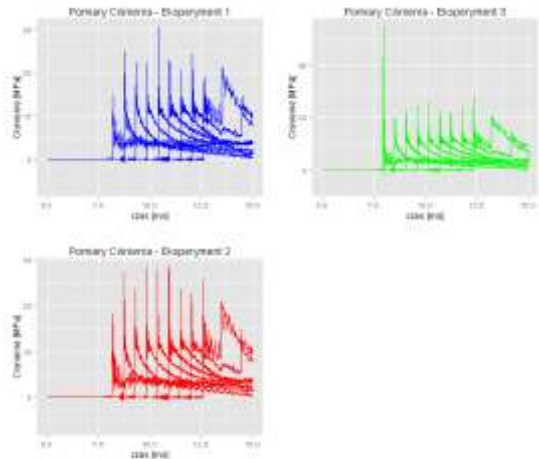
Rysunek 19 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 20%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów. Detonacja



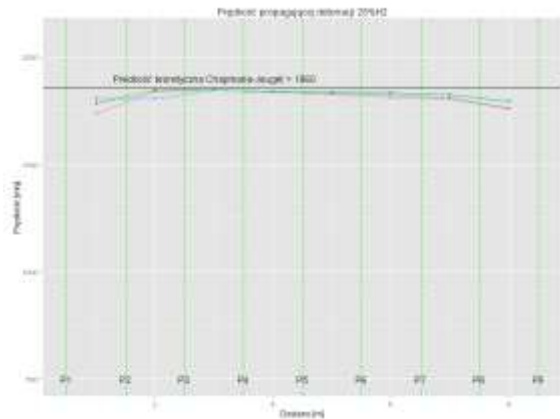
Rysunek 20 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszaniny 20%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów

<sup>1</sup> rura detonacyjna o długości 9m i średnicy wew. 0,17m

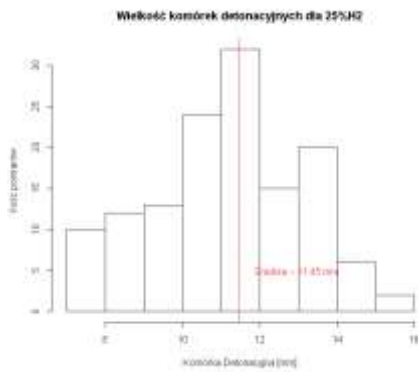
Badania eksperymentalne mieszaniny wodoru (25%) i powietrza



Rysunek 21 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 25%H2 w powietrzu dla trzech eksperymentów. Detonacja

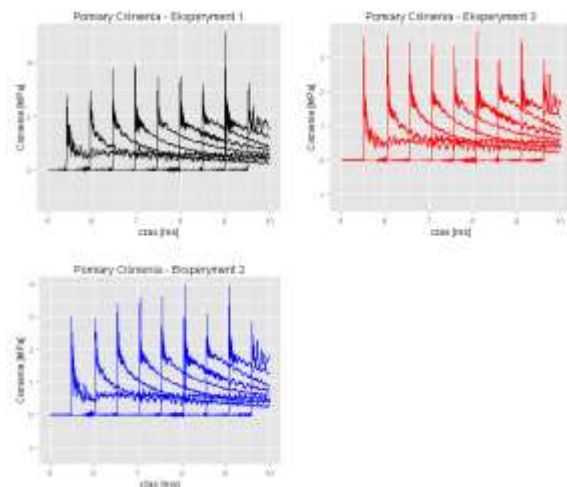


Rysunek 22 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 25%H2 w powietrzu dla trzech eksperymentów. Detonacja

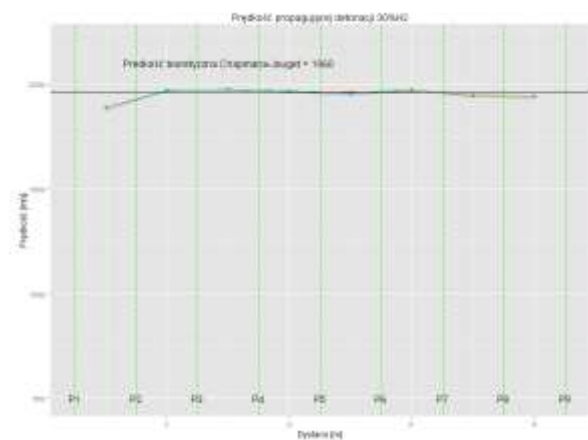


Rysunek 23 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszaniny 25%H2 w powietrzu dla trzech eksperymentów

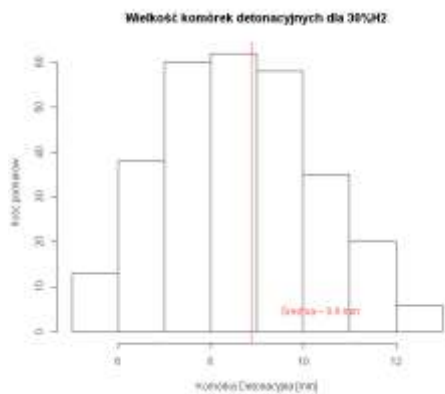
Badania eksperymentalne mieszaniny wodoru (30%) i powietrza



Rysunek 24 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 30%H2 w powietrzu dla trzech eksperymentów. Detonacja

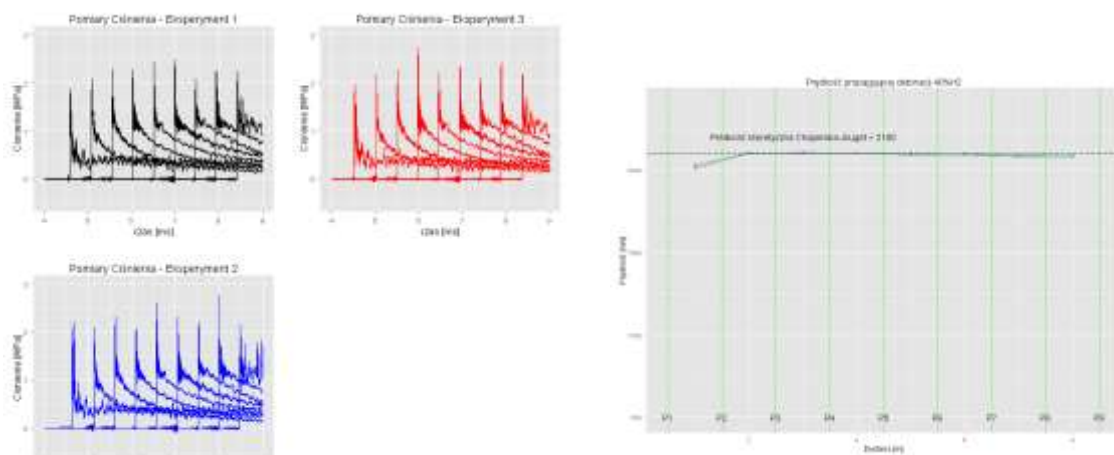


Rysunek 25 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 30%H2 w powietrzu dla trzech eksperymentów. Detonacja



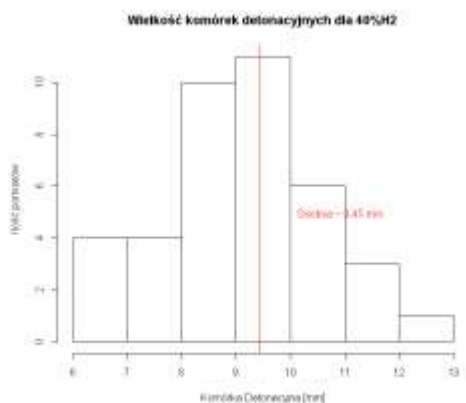
Rysunek 26 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszaniny 30%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów

Badania eksperymentalne mieszaniny wodoru (40%) i powietrza



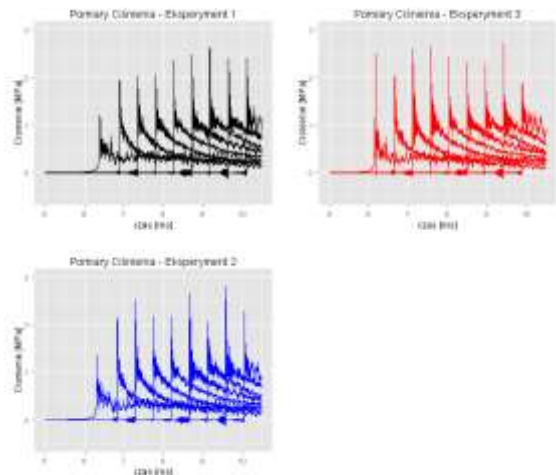
Rysunek 27 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 40%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów. Detonacja

Rysunek 28 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 40%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów. Detonacja

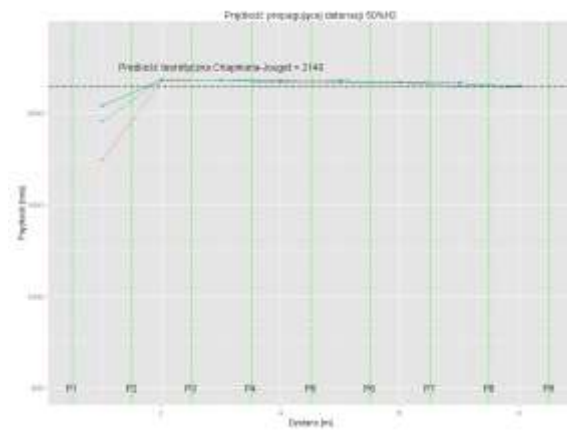


Rysunek 29 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszaniny 40%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów

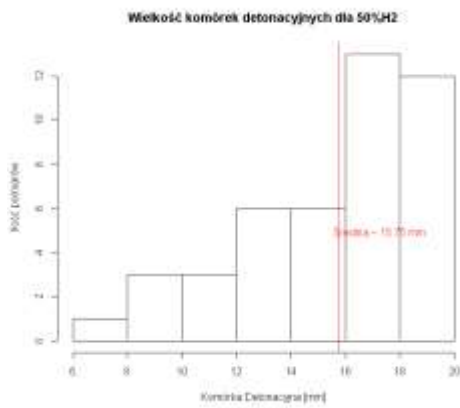
Badania eksperymentalne mieszaniny wodoru (50%) i powietrza



Rysunek 30 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 50%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów. Detonacja

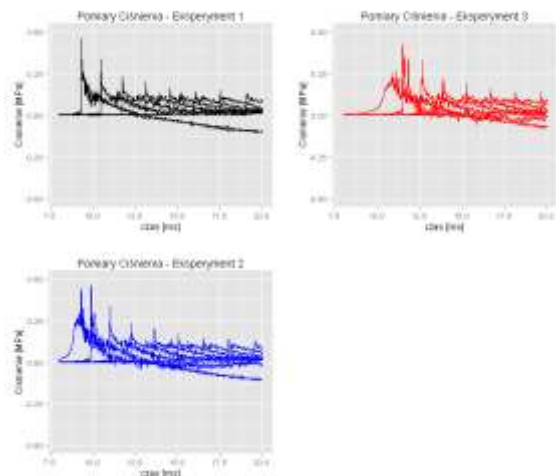


Rysunek 31 Pomiar prędkość propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 50%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów. Detonacja

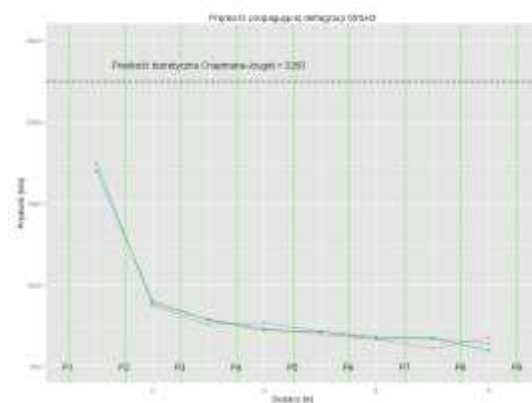


Rysunek 32 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszaniny 50%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów

Badania eksperymentalne mieszaniny wodoru (55%) i powietrza



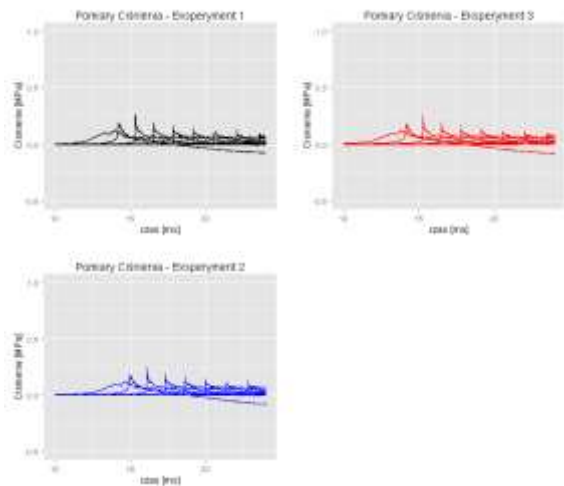
Rysunek 33 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 55%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów. Deflagracja



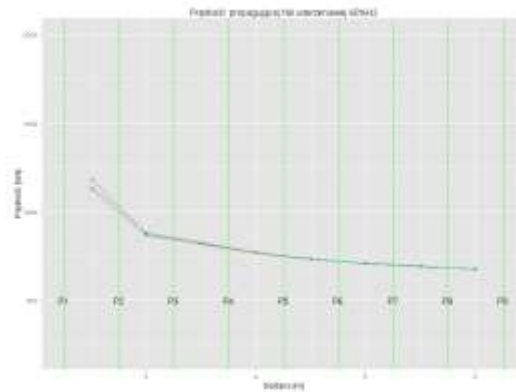
Rysunek 34 Pomiar prędkość propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 55%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów. Deflagracja



### Badania eksperymentalne mieszanki wodoru (60%) i powietrza

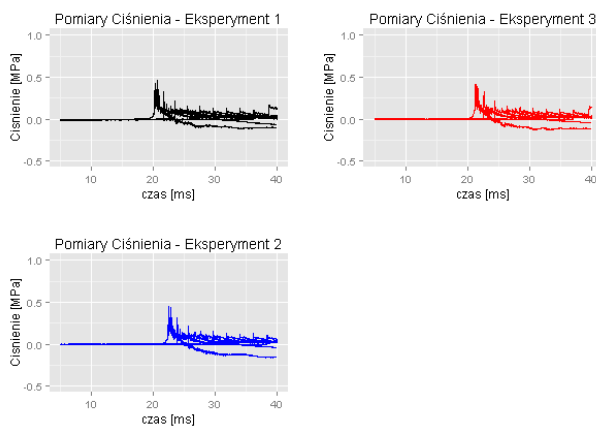


Rysunek 35 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaniu 60%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów. Deflagracja

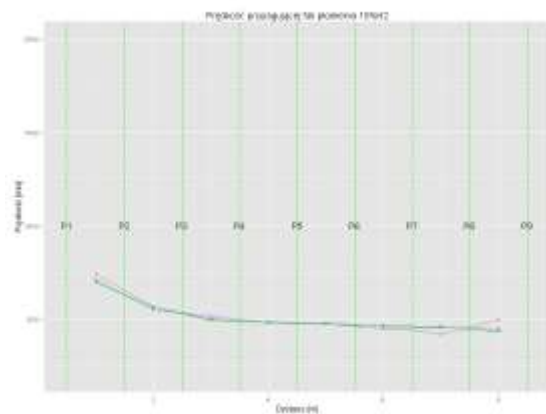


Rysunek 36 Pomiar prędkość propagującej fali uderzeniowej w mieszaniu 60%H<sub>2</sub> w powietrzu dla trzech eksperymentów. Deflagracja

### Badania eksperymentalne mieszanki wodoru (15%) i tlenu

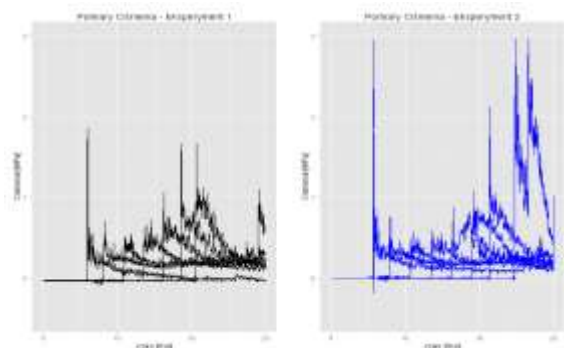


Rysunek 37 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaniu 15%H<sub>2</sub> w tlenie dla trzech eksperymentów. Deflagracja

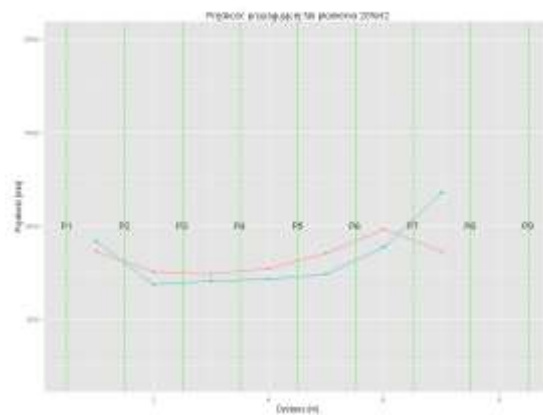


Rysunek 38 Pomiar prędkość propagującej fali uderzeniowej w 15%H<sub>2</sub> w tlenie dla trzech eksperymentów. Deflagracja

### Badania eksperymentalne mieszanki wodoru (20%) i tlenu

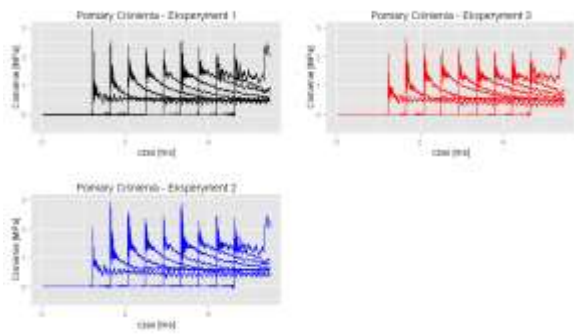


Rysunek 39 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaniu 20%H<sub>2</sub> w tlenie dla dwóch eksperymentów. Deflagracja

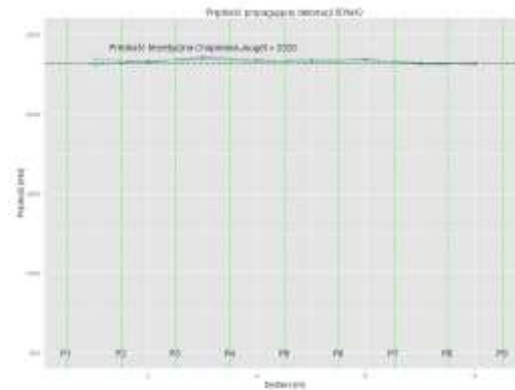


Rysunek 40 Pomiar prędkość propagującej fali uderzeniowej w 20%H<sub>2</sub> w tlenie dla dwóch eksperymentów. Deflagracja

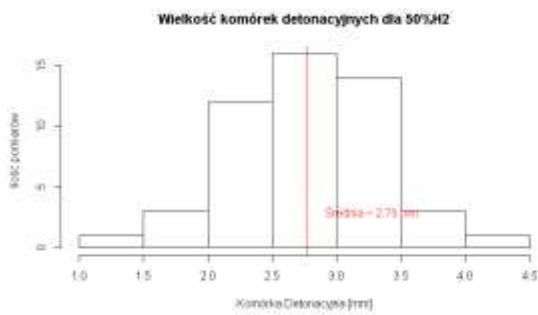
Badania eksperymentalne mieszaniny wodoru (50%) i tlenu



Rysunek 41 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 50%H<sub>2</sub> w tlenie dla trzech eksperymentów. Detonacja

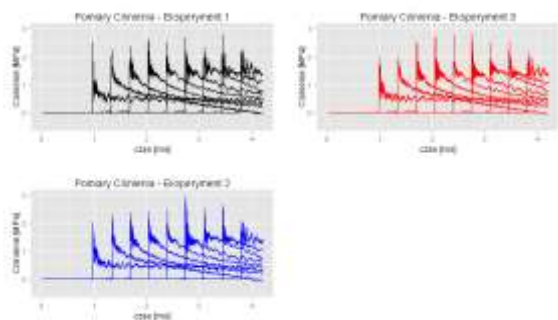


Rysunek 42 Pomiar prędkość propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 50%H<sub>2</sub> w tlenie dla trzech eksperymentów. Detonacja

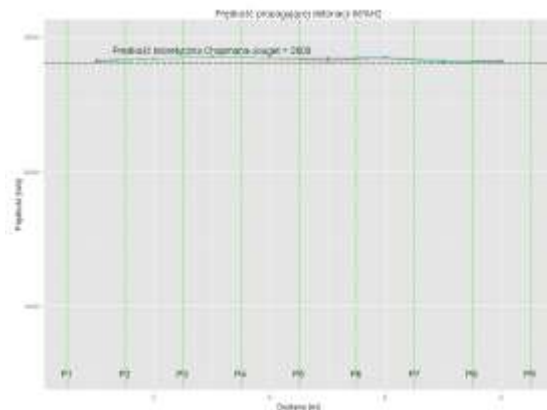


Rysunek 43 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszaniny 50%H<sub>2</sub> w tlenie dla trzech eksperymentów

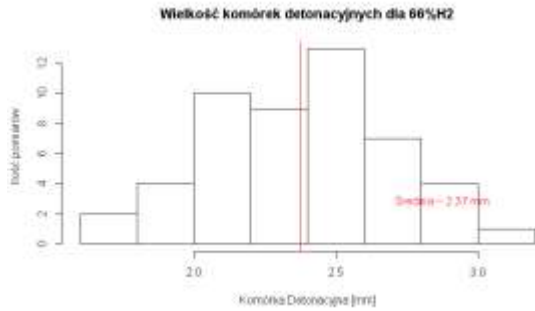
Badania eksperymentalne mieszaniny wodoru (66%) i tlenu



Rysunek 44 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 66%H<sub>2</sub> w tlenie dla trzech eksperymentów. Detonacja

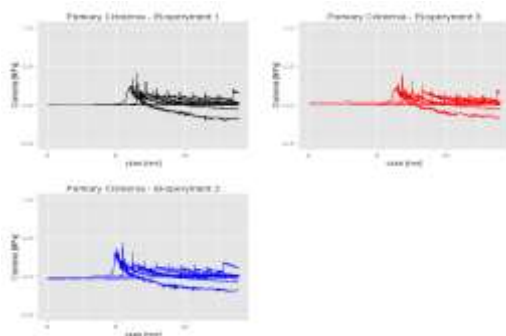


Rysunek 45 Pomiar prędkość propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 66%H<sub>2</sub> w tlenie dla trzech eksperymentów. Detonacja

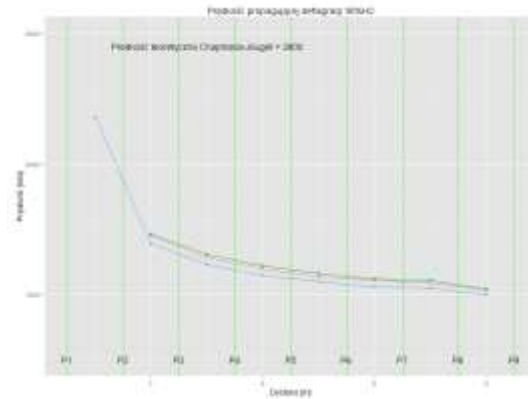


Rysunek 46 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszaniny 66%H<sub>2</sub> w tlenie dla trzech eksperymentów

Badania eksperymentalne mieszaniny wodoru (90%) i tlenu

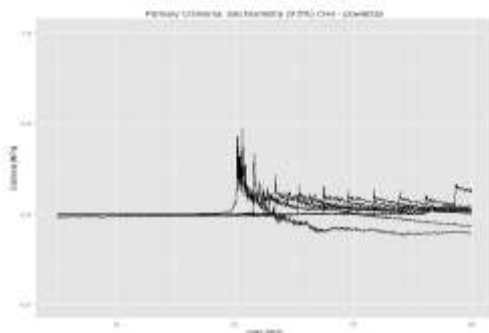


Rysunek 47 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 90%H<sub>2</sub> w tlenie dla trzech eksperymentów. Deflagracja

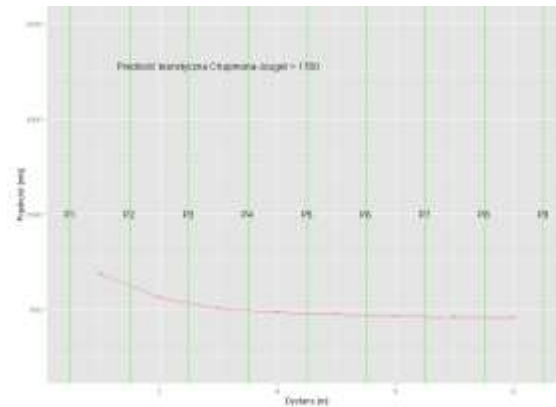


Rysunek 48 Pomiar prędkość propagującej fali uderzeniowej w 90%H<sub>2</sub> w tlenie dla trzech eksperymentów. Deflagracja

Badania eksperymentalne mieszaniny metanu (9,5%) i powietrza

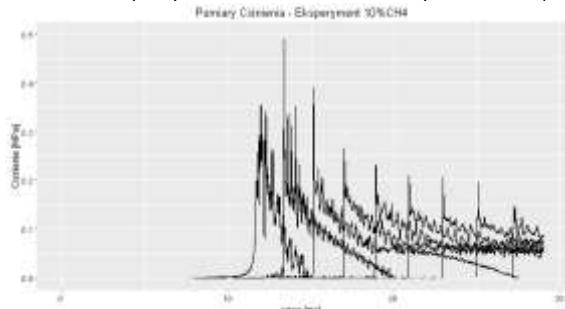


Rysunek 49 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 9.5%CH<sub>4</sub> w powietrzu. Deflagracja

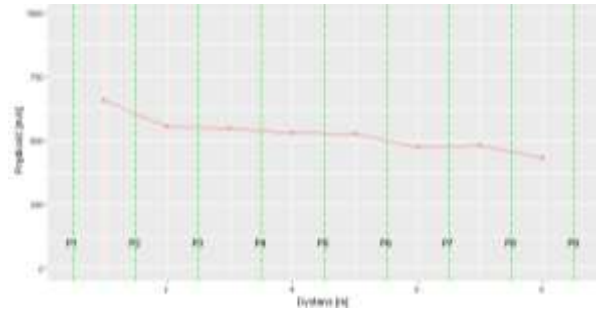


Rysunek 50 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 9.5%CH<sub>4</sub> w powietrzu. Deflagracja

## Badania eksperymentalne mieszanki metanu (10%) i tlenu

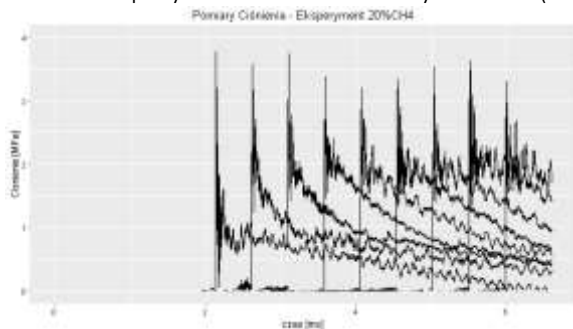


Rysunek 51 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszance 10%CH<sub>4</sub> w tlenie. Deflacja

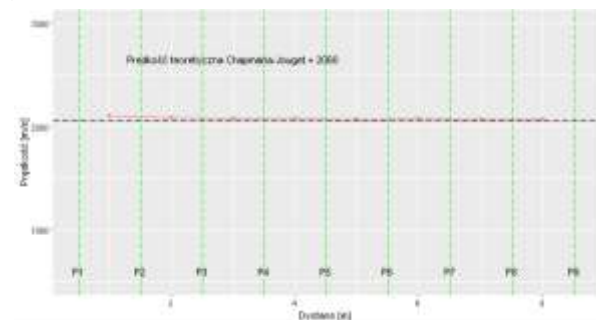


Rysunek 52 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszance 10%CH<sub>4</sub> w tlenie. Deflacja

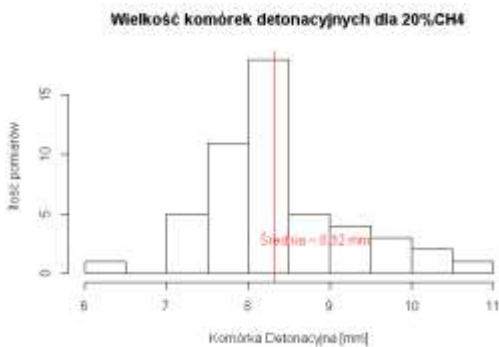
## Badania eksperymentalne mieszanki metanu (20%) i tlenu



Rysunek 53 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszance 20%CH<sub>4</sub> w tlenie. Detonacja

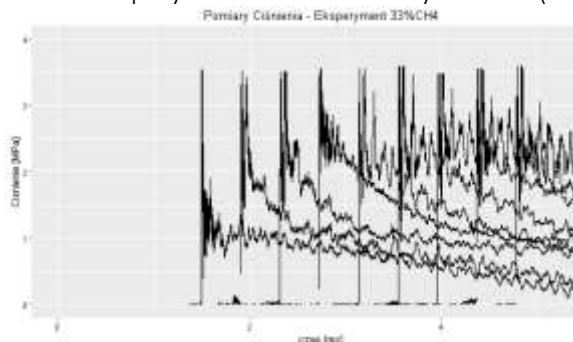


Rysunek 54 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszance 20%CH<sub>4</sub> w tlenie. Detonacja

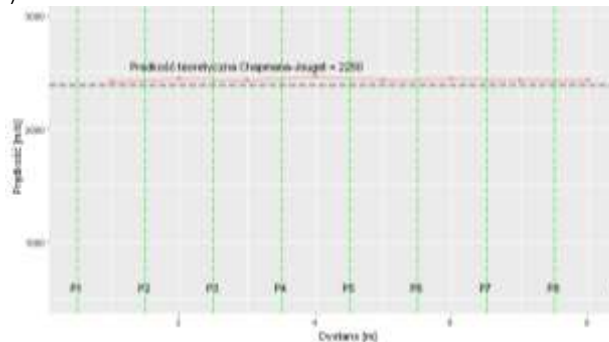


Rysunek 55 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszanki 20%CH<sub>4</sub> w tlenie.

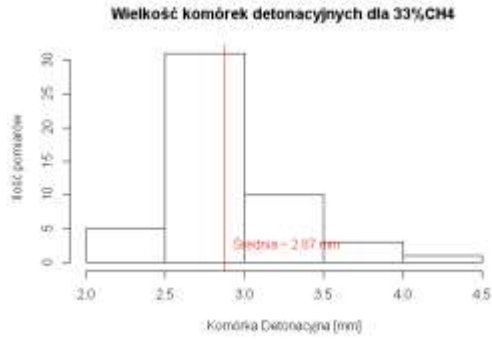
## Badania eksperymentalne mieszanki metanu (33%) i tlenu



Rysunek 56 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszance 33%CH<sub>4</sub> w tlenie. Detonacja

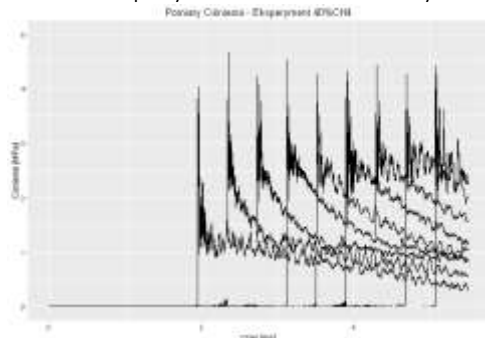


Rysunek 57 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszance 33%CH<sub>4</sub> w tlenie. Detonacja

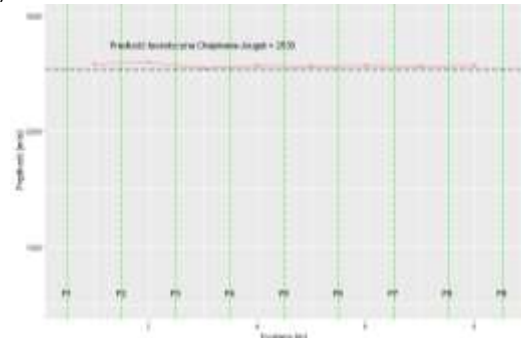


Rysunek 58 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszaniny 33%CH4 w tlenie.

Badania eksperymentalne mieszaniny metanu (40%) i tlenu



Rysunek 59 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 40%CH4 w tlenie Detonacja

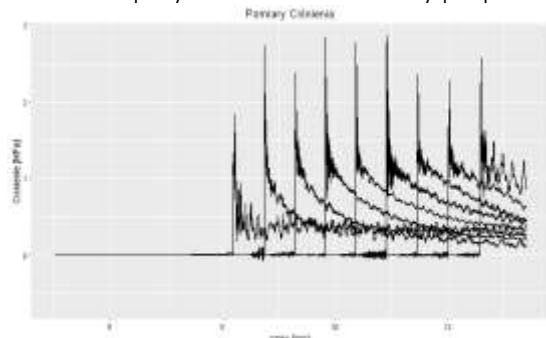


Rysunek 60 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 40%CH4 w tlenie. Detonacja

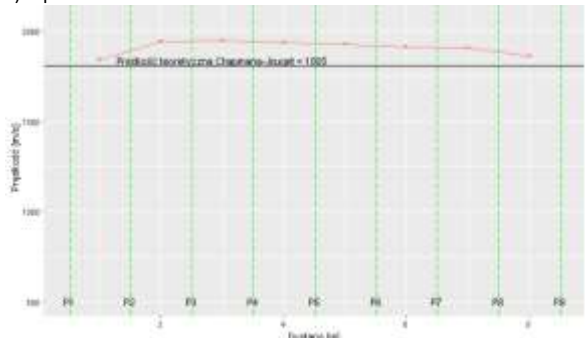


Rysunek 61 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszaniny 40%CH4 w tlenie.

Badania eksperymentalne mieszaniny propanu (4.0%) i powietrza



Rysunek 62 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 4.0% C3H8 w powietrzu. Detonacja

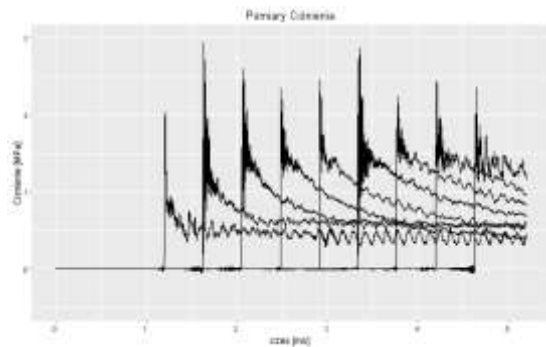


Rysunek 63 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 4.0% C3H8 w powietrzu. Detonacja

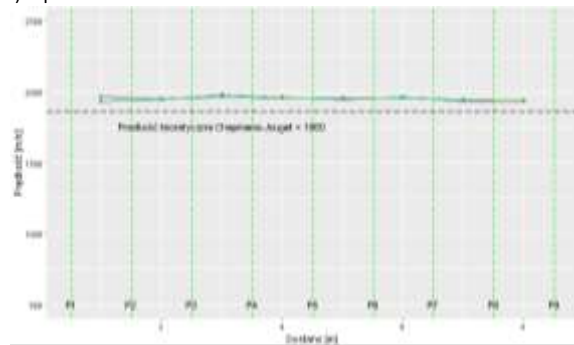


Rysunek 64 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszanki 4% C3H8 i powietrza

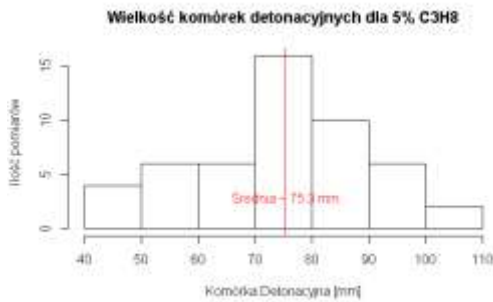
Badania eksperymentalne mieszanki propanu (5.0%) i powietrza



Rysunek 65 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszance 5.0% C3H8 w powietrzu. Detonacja

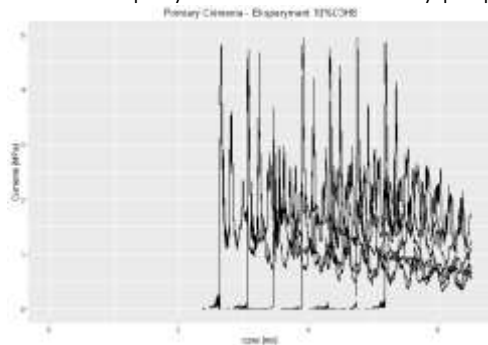


Rysunek 66 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszance 5.0% C3H8 w powietrzu. Detonacja

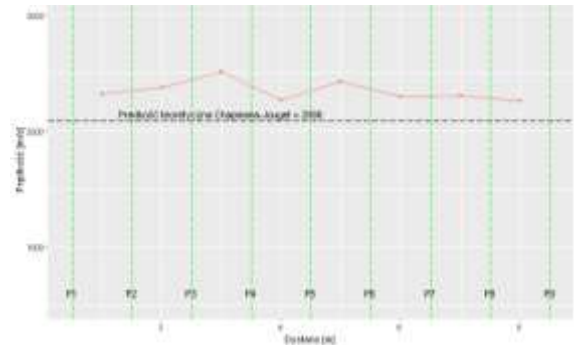


Rysunek 67 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszanki 5,0% C3H8 i powietrza

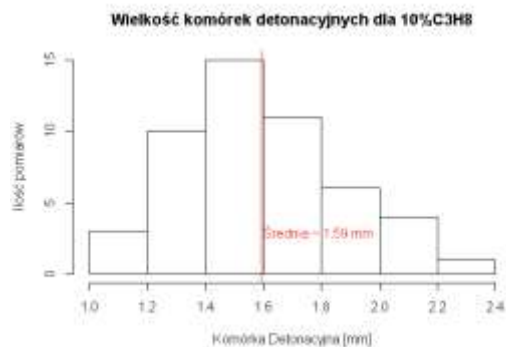
Badania eksperymentalne mieszanki propan (10%) i tlenu



Rysunek 68 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszance 10% C3H8 w tlenie.

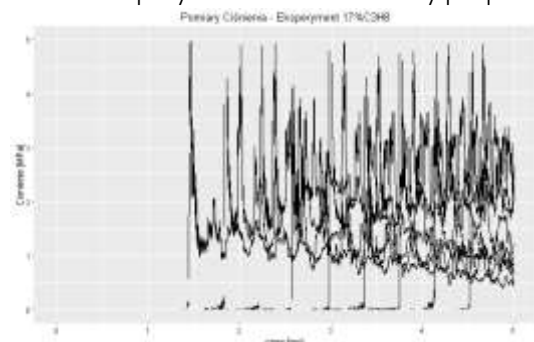


Rysunek 69 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszance 10% C3H8 w tlenie. Detonacja

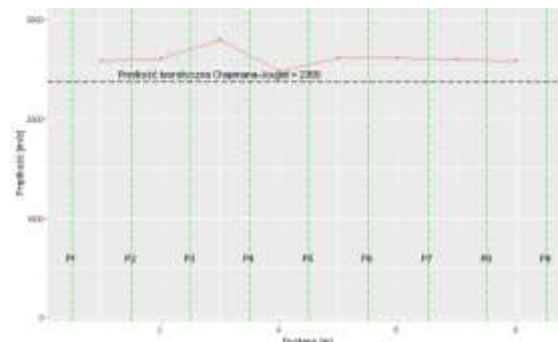


Rysunek 70 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszanki 10% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> w tlenie.

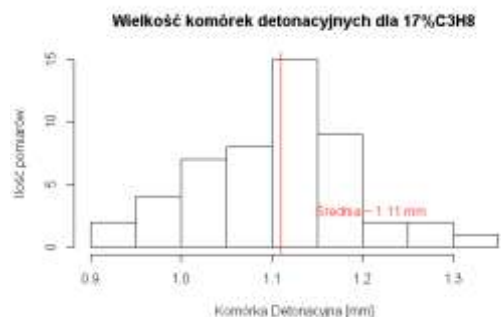
### Badania eksperymentalne mieszanki propan (17%) i tlenu



Rysunek 71 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszance 17% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> w tlenie.

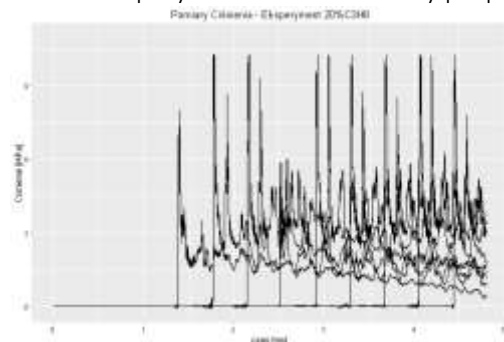


Rysunek 72 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszance 17% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> w tlenie. Detonacja

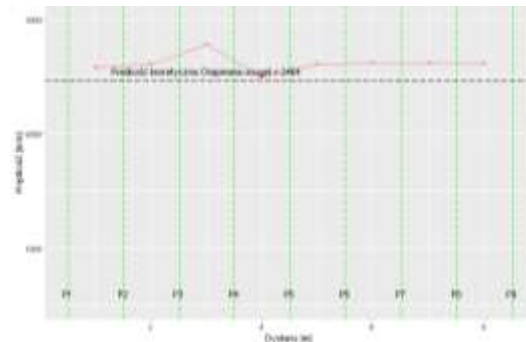


Rysunek 73 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszanki 17% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> w tlenie.

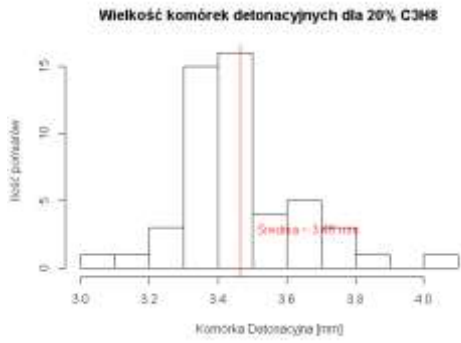
### Badania eksperymentalne mieszanki propan (20%) i tlenu



Rysunek 74 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszance 20% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> w tlenie.

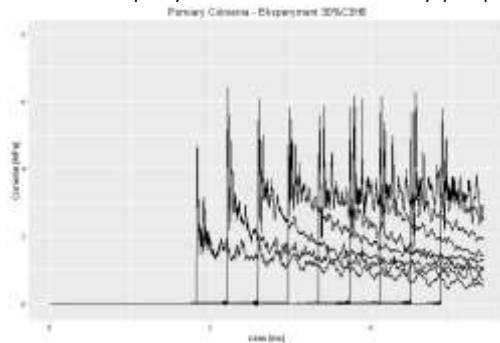


Rysunek 75 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszance 20% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> w tlenie. Detonacja

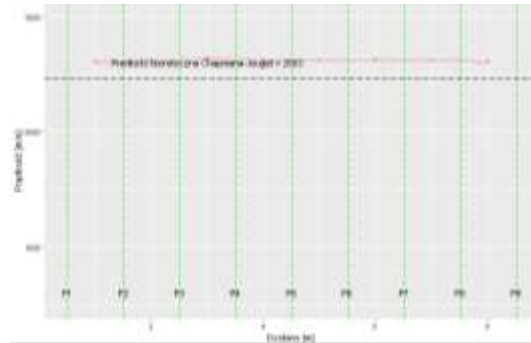


Rysunek 76 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszanki 20% C3H8 w tlenie.

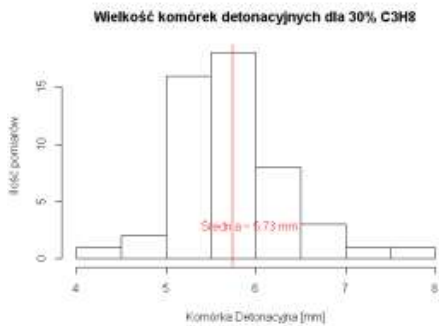
Badania eksperymentalne mieszanki propan (30%) i tlenu



Rysunek 77 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszance 30% C3H8 w tlenie.

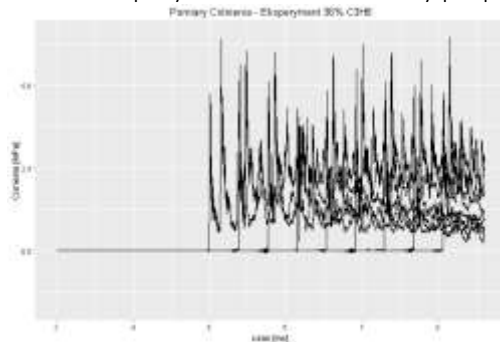


Rysunek 78 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszance 30% C3H8 w tlenie. Detonacja

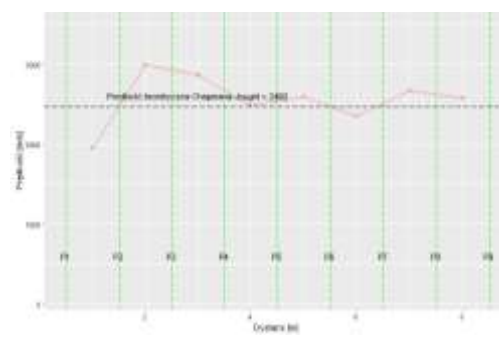


Rysunek 79 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszanki 30% C3H8 w tlenie.

Badania eksperymentalne mieszanki propan (36%) i tlenu

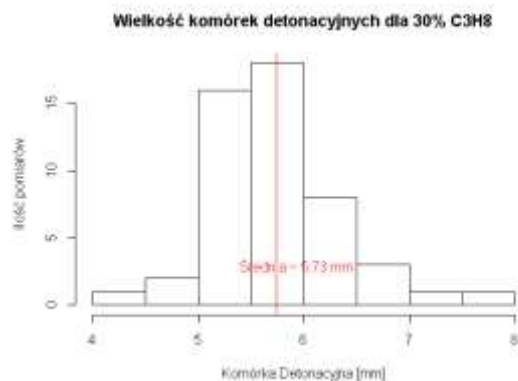


Rysunek 80 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszance 36% C3H8 w tlenie.



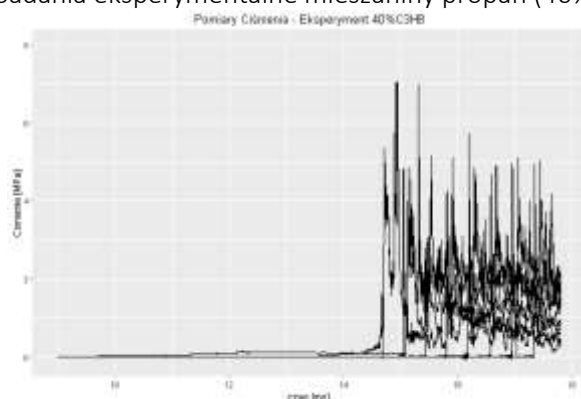
Rysunek 81 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszance 36% C3H8 w tlenie. Detonacja



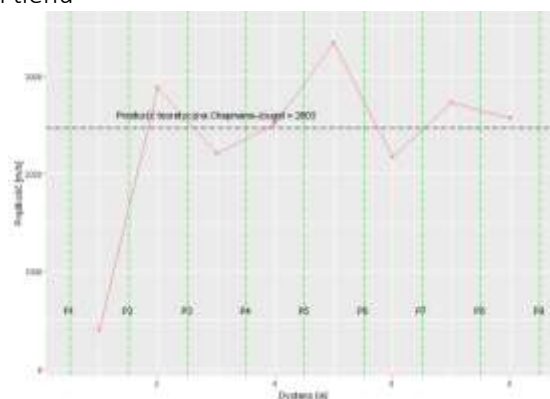


Rysunek 82 Charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych dla mieszaniny 36% C3H8 w tlenie.

### Badania eksperymentalne mieszaniny propan (40%) i tlenu



Rysunek 83 Pomiar ciśnienia propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 40% C3H8 w tlenie.



Rysunek 84 Pomiar prędkości propagującej fali uderzeniowej w mieszaninie 40% C3H8 w tlenie. Detonacja

### Podsumowanie wyników badań detonacji

Powyżej przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych detonacji mieszanin, wodór – powietrze, tlen, metan – powietrze, tlen, propan – powietrze, tlen. Określono dolną oraz górną granicę detonacji mieszanin dla określonych warunków początkowych (300K, 1 atm) oraz brzegowych (rura 9 m długości, 0.17 m średnica wewnętrzna, które wynoszą odpowiednio:

- 20-40% dla mieszaniny metan-tlen,
- 10-36% dla mieszaniny propan-tlen,
- 4-5% dla mieszaniny propan-powietrze,
- 20-50% dla mieszaniny wodór-powietrze,
- 20-90% dla mieszaniny wodór-tlen,

Dla mieszaniny stechiometrycznej metanu i powietrza (9,5%) nie uzyskano spalania detonacyjnego (deflagracja) w kanale o długości 900 cm i średnicy 17 cm.

Podczas badań zmierzono przebiegi ciśnień oraz prędkości propagacji fali detonacyjnej. Dla każdego stężenia w granicach spalania detonacyjnego zmierzono charakterystyczne wielkości komórek detonacyjnych oraz zdefiniowano standardowe odchylenia od średniej wartości.

Uzyskany materiał doświadczalny został udostępniony w postaci bazy danych na stronie [www.intexonline.pl](http://www.intexonline.pl). Zdobyty materiał umożliwił poznanie parametrów wybuchów deflagracyjnych i detonacyjnych a tym samym pozwolił na zdefiniowanie zakresów brzegowych projektowanych urządzeń zabezpieczających przed wybuchem, takich jak: prędkość działania, odporność na ciśnienia i chwilowe temperatury, czas reakcji systemu sterowania, prędkość zachodzenia reakcji spalania, dobór odpowiednich materiałów, w tym obudowy, uszczelnienia, itp., dobór materiałów tłumiących.

### 3. Testy prototypu pasywnego systemu tłumienia wybuchów w skali rzeczywistej

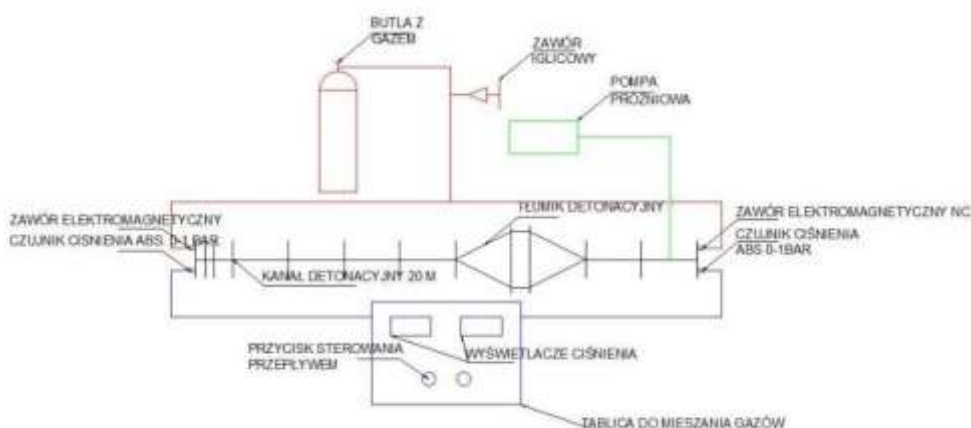
#### 3.1. Opis układu tworzenia mieszanin gazowych

Głównym problemem wykonywania mieszanin gazowych jest rozwiązanie zagadnienia uzyskania jednorodnej mieszaniny w zadanej objętości. Trudność uzyskania jednorodności wzrasta wraz ze wzrostem objętości aparatu badawczego. W rozpatrywanym układzie RD20 mamy do czynienia z objętością 2 m<sup>3</sup>, co w porównaniu z RD9 jest objętością 10 krotnie większą. Wymaga się, aby mieszanina przed zapłonem uzyskała jednorodny skład w całej objętości komory badawczej. Powinna też zostać wykonana z odpowiednią dokładnością (stężenie). Założona dokładność stężenia to 0,01% obj. Mimo, że gazy mieszają się zawsze i w każdych ilościach nie można jednoznacznie określić po jakim czasie mieszanina gazów będzie zupełnie jednorodna.

Kanał detonacyjny RD20 wyposażono w pompę próżniową, pozwalającą na usunięcia powietrza z rury przed badaniem – zastosowana pompa GVS40 o wydajności 50 m<sup>3</sup>/h, która pozwala na wytworzenie ciśnienia rzędu 4 mbar, co było oczekiwanym wynikiem. Wytworzenie podciśnienia pozwoliło na lepsze rozpraszanie się gazów wewnątrz kanału. Przed każdym badaniem/napełnianiem z kanału usuwano powietrze. Wytwarzanie przed każdym badaniem dokładnej próżni ma również tę dodatkową zaletę, że pozwala osuszyć wnętrze rury przed badaniem z pary wodnej powstałej podczas spalania.

Układ z racji stawianych przed nim wymagań, został wyposażony w podwójną linię zasilania gazem palnym. Obie linie są zasilane bezpośrednio z jednego punktu, tj. przyjęto układ, w którym butla z gazem palnym zasila tablicę rozdzielczą, na której zaworem iglicowym regulowane jest wstępnie ciśnienie i przepływ gazu. Za zaworem znajduje się rozgałęziacz i linie gwarantujące dopływ zarówno do części końcowej jak i początkowej kanału badawczego jednocześnie. Oba końce rury zostały wyposażone w piezoelektryczne czujniki podciśnienia o zakresie 0 do 1 bar (ciśnienie absolutne), tj. precyzyjne czujniki firmy Keller z serii PAA-33 X. Ciśnienie na każdym z nich odczytywane jest bezpośrednio z tablicy (na dwóch niezależnych dedykowanych do czujników wyświetlaczach). Pozwala to na zdalne sterowanie procesem zasilania rury w gazy, poprzez wciśnięcie przycisku uruchamiającego pracę elektrozaworu NC (normalnie zamkniętego). Oba czujniki jak i elektrozawory są chronione poprzez zastosowanie zaworów kulowych pomiędzy nimi a kanałem

Procedura napełniania komory zakładać wykonanie próżni w komorze do wartości 50mbar i w pierwszej kolejności podanie do odpowiedniego ciśnienia (zgodnie z prawem Daltona) gazu palnego, a następnie dopełnienie rury detonacyjnej powietrzem do 1 bar. Na rysunku poniżej przedstawiono w sposób schematyczny ideową rozwiązanie opisanego wyżej układu. Układ wytwarzania mieszanin pozwalana na ciągłe wytwarzanie mieszaniny wybuchowej wewnątrz kanału badawczego przed zapłonem i po zapłonie.



Rysunek 85 Ideowy schemat układu do wykonywania mieszanin gazowych w RD20

Przeprowadzenie testów spalania detonacyjnego z wykorzystaniem na RD20 przewidziano dla mieszanin metanu, propanu i wodoru z powietrzem. Badaniom poddano mieszaniny w stężeniach

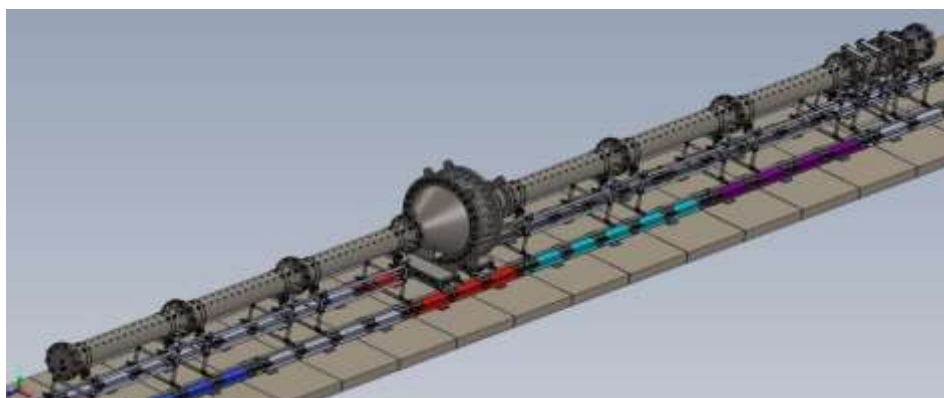
stechiometrycznych tj. najbardziej reaktywnych. Zgodnie z rozpatrzoną teorią dotyczącą gazów można zaproponować na podstawie prawa Daltona i równań stechiometrycznych następujące mieszaniny, których zbiorcze zestawienie zamieszczono w poniższej tabeli.

Tabela 10 Zbiorcze zestawienie proponowanych mieszanin do badań wg metody ciśnień cząstkowych

lp.	Mieszanina	Stężenie %	Ciśnienie składnika palnego [bar]
1	wodór-powietrze	stechiometryczne	0,296
2	metan-powietrze	stechiometryczne	0,0906
3	propan-powietrze	stechiometryczne	0,0403

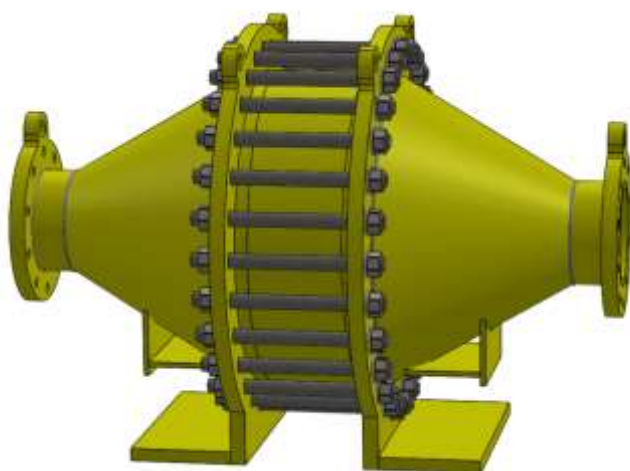
### 3.2. Opis prototypu pasywnego systemu tłumienia wybuchów

Prototyp pasywnego systemu tłumienia wybuchów umieszczono w sposób niżej przedstawiony na stanowisku badawczym RD20.



Rysunek 86 Rysunek 3d na stanowisko badawcze RD20

Tłumik detonacyjny (prototyp pasywnego systemu tłumienia wybuchów) przedstawiony na poniższym rysunku. Urządzenie zostało wykonane ze stali węglowej i stanowi integralną część układu RD20<sup>2</sup>.



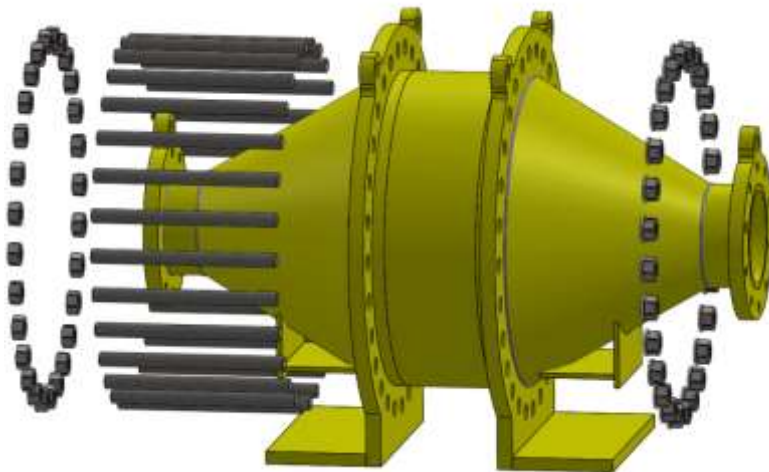
<sup>2</sup> rura detonacyjna o długości 20 m i średnicy wewnętrznej 0,35m

Rysunek 87 Tłumik detonacyjny (widok ogólny z zewnątrz)

Tłumik składa się z niżej wymienionych części:

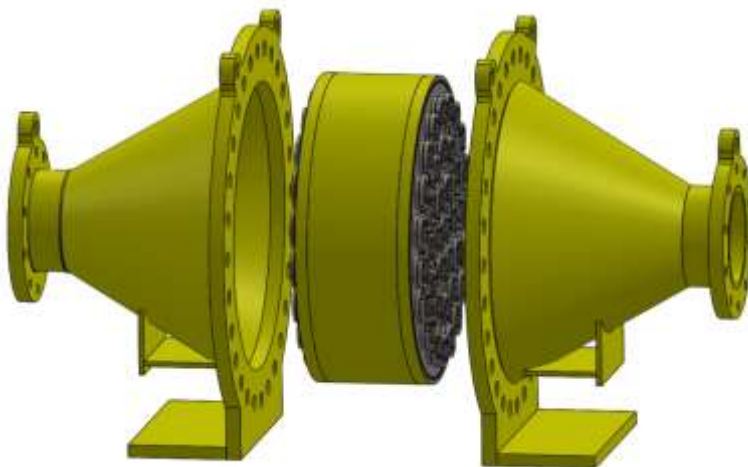
- zewnętrznych dwóch bliźniaczych kołnierzy, wyposażone we flansze pozwalające na podłączenie tłumika do RD20 oraz służące do wprowadzenia fali wybuchu do środka tłumika, w tym jego wstępnego rozprężenia,
- środkowego pierścienia zawierającego wpusty, w których umieszcza się układy tłumiące,
- wkłady tłumiące w liczbie 38 sztuk oraz śrubunki wraz z zintegrowaną podstawą z możliwością regulacji w pionie i poziomie.

Na rysunku przedstawiono elementy śrubunku jako element wiążący dwa bliźniacze kołnierze.



Rysunek 88 Elementy śrubunku tłumika detonacji

Poniżej na rysunku przedstawiono widok tłumika po obustronnym odjęciu kołnierzy. W centralnej części jest widoczny walec z umieszczonymi wewnątrz elementami tłumiącymi. Całość układu jest integralną jednolitą bryłą. Walec z tłumikami umieszczany jest pomiędzy stożkami i dociskany siłą wywieraną wskutek skręcenia śrub, o wartości momentu 1700 Nm. Z uwagi na możliwość powstania wewnątrz tłumika ciśnienia do 10 MPa (ciśnienie dynamiczne generowane przez falę detonacyjną po rozprężeniu) zastosowano uszczelkę typu o-ring podwójną, pozwalającą na zachowanie szczelności również w sytuacji nie zachowania reżimu skręcenia śrubunku jednakową wartością momentu.

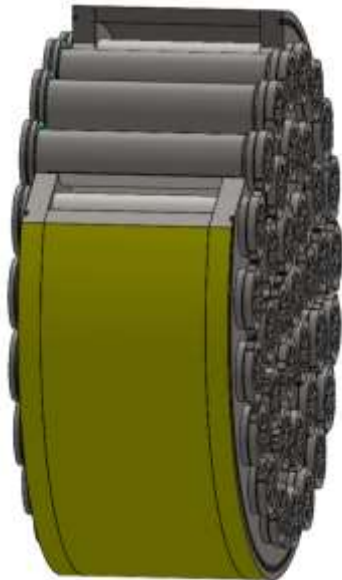


Rysunek 89 Centralna część tłumika detonacyjnego

Elementem roboczym tłumika, tj. przerywającym spalanie detonacyjne jest zestaw 38 wkładów (tłumików) posiadających możliwość wymiany tzw. wypełnienia roboczego. W rozpatrywanej wersji

zastosowano stalowe cylindry, których wewnątrz zostało wypełnione kulkami wykonanymi z utwardzonej stali o średnicy  $\varnothing 1\text{mm}$ . Z obu stron wkład jest zamknięty warstwą siatki stalowej zabezpieczającej przed przemieszczaniem się kulek oraz wydostaniem się na zewnątrz przede wszystkim w trakcie przechodzenia przez tłumik fali płomienia i ciśnienia.

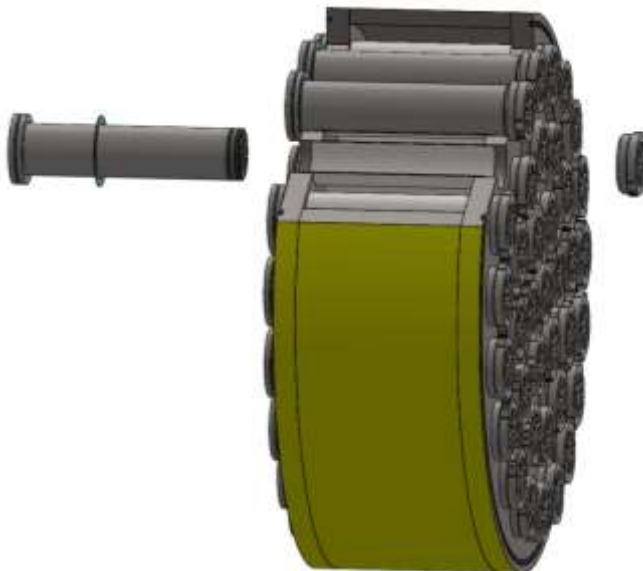
Na rys przedstawiono koncepcję rozmieszczenia wkładów w cylindrze oraz sposób ich zamocowania.



Rysunek 90 Widok z boku na cylinder oraz fragment wkładów tłumiących



Rysunek 91 Widok od frontu na cylinder z 38 wkładami tłumiącymi



Rysunek 92 Sposób mocowania wkładów tłumiących w cylindrze

Istotną kwestią jest zapewnienie bezwzględnej szczelności na połączeniu kołnierzy wkładów tłumiących oraz płaszczyzny cylindra. W związku z tym zastosowano uszczelki płaskie wykonane z materiału zapewniającego hermetyczność układu się pod wpływem siły nacisku dokręcanej nakrętki (widocznej po prawej stronie cylindra) oraz w zmiennych warunkach ciśnienia (próżnia i nadciśnienie wybuchu).

Na rysunkach poniżej szczegółowo przedstawiono pojedynczy element tłumiący, wypełniony stalowymi kulkami. Od przodu widoczny element dociskowy wraz uszczelnieniem gambitowym (kolor niebieski w tylnej części wkładu). Po prawej stronie widoczny element nakręcany spełniający funkcję docisku materiału tłumiącego (wkład kulkowy).



Rysunek 93 Kompletny wkład tłumika



Rysunek 94 Wkład po odjęciu elementu dociskowego (z prawej strony)

Na rysunku poniżej przedstawiono rozłożony wkład tłumiący z widocznym cylindrem (element nośny), wkładem z kulek stalowych oraz siatkami zabezpieczającymi wraz z elementem dociskowym.



Rysunek 95 Wkład po rozłożeniu

Na rys. 21 przedstawiono szczegółowo element wypełnienia. Zastosowany układ siatek ma za zadanie utrzymać w całości zespół kulek.



Rysunek 96 Roboczy element wkładu (kulki o średnicy 1mm)

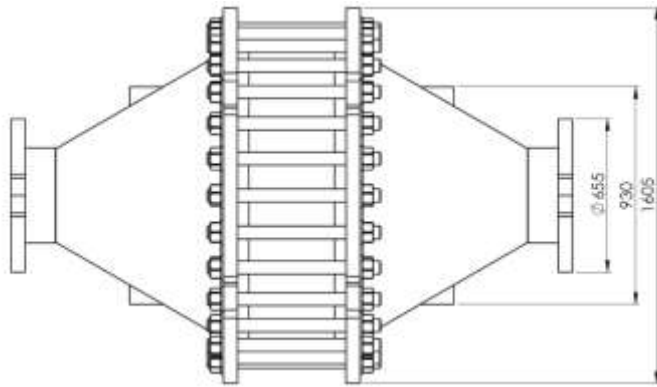
Po zastosowaniu kulek o średnicy 1mm otrzymano mierzalną szczelinę bezpieczeństwa 0,36mm<sup>34</sup>. Minimalne szczeliny bezpieczeństwa (ozn. MESG) mają wymiary odpowiednio:

- wodór, MESG=0,29mm (grupa gazu IIC wg IEC),
- propan, MESG=0,92mm (grupa gazu IIA wg IEC).

Zasadne jest przyjęcie założenia, że zastosowany wkład tłumiący w przerywaczu detonacji będzie spełniał swoje przeznaczenie dla gazów, których szczelina gasząca jest co najmniej większa niż uzyskana przy zastosowaniu kulek o średnicy 1mm. Schemat wymiarujący tłumik przedstawiono na rysunku poniżej.

<sup>3</sup> Deflagration and detonation flame arresters-Stanley S. Gossel – AIChE Industry Technology ALLIANCE, NY - 2002

<sup>4</sup> Mierzalna średnicy oznacza największy mieszalny prześwit wolnej szczeliny



Rysunek 97 Zwymiarowanie tłumika

Na rysunkach poniżej przedstawiono widok na rzeczywisty układ badawczy oraz wkłady wypełniające tłumik detonacji.



Rysunek 98 Widok w ogólnym ujęciu na prototyp



Rysunek 99 Widok na wkłady tłumiące od strony oddziaływania frontu spalania detonacyjnego



Rysunek 100 Widok na rozdzielony prototyp, widoczne wolne miejsca służące do umieszczenia w nich wkładów tłumiących



Rysunek 101 Widok na kołpak ochrony pojedynczego wkładu tłumika znajdujący się od strony chronionej



Rysunek 102 Widok na kołpak ochrony pojedynczego wkładu tłumiącego znajdujący się od strony niechronionej. Widoczne na pierwszym planie system dociskowy.

### 3.3. Opis wyników badań z zastosowaniem różnego typu przeszkód w RD20

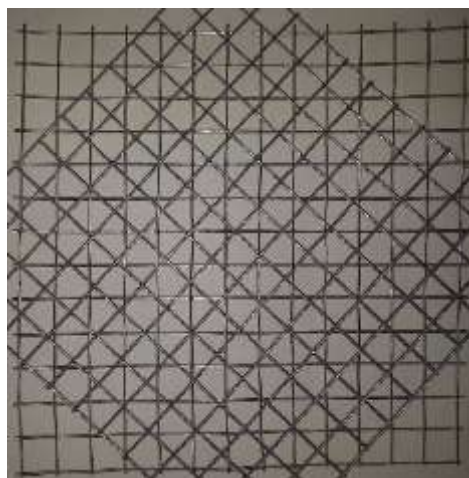
Badania wpływu przeszkód przeprowadzono dla trzech gazów palnych metan, propan i wodór w stężeniu stechiometrycznym dla dwóch długości przeszkód  $x=1\text{m}$  i  $y=2\text{m}$ . Badanie wykonano 10 krotnie dla każdego gazu (w mieszaninie stechio). Przemieszczanie się fali ciśnienia monitorowane było przez układ czujników ciśnienia (10 szt.) podłączonych do systemu akwizycji danych, który czytywał dane z częstotliwości 300 kHz. Czujniki ciśnienia zostały umieszczone w określonych odległościach od siebie w górnej części kanału. Za każdym razem ciśnienie mieszaniny stechiometrycznej przed zapłonem wynosiło 1 bar. Zapłon realizowany był za pomocą spłonki chemicznej. Mieszanina gazu uzyskiwana była za pomocą ciśnień cząstkowych.

Układ przeszkód zbudowany był w oparciu o konstrukcję obręczy połączonych równoległymi prętami, na których umieszczono równoległe względem siebie siatki w kształcie kwadratu o bok 0,35 m. Siatki znajdowały się od siebie w odległości 0,01 m. Siatka wykonana z drutu ocynkowanego o średnicy 0,001 m o oku siatki o wymiarach 0,005x0,005 m. Celem badania było określenie możliwości uzyskania detonacji w tym pomiaru generowanych przyrostów ciśnień i prędkości fali ciśnienia.

Poniżej na rysunku przedstawiono układ przeszkód umieszczony w RD20 od strony zapłonu oraz naprzemienny sposób ułożenia siatek zastosowanych jako przeszkody (widok z góry). Zastosowanie dwóch długości przeszkód wynika z konieczności ustalenia warunków brzegowych umożliwiających osiągnięcie stanu detonacji w mieszaninie gazowej w danym układzie badawczym.

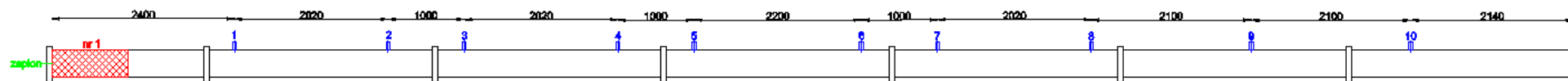


Rysunek 103 Widok z góry na zbudowaną sekcję przeszkody o długości 1 m

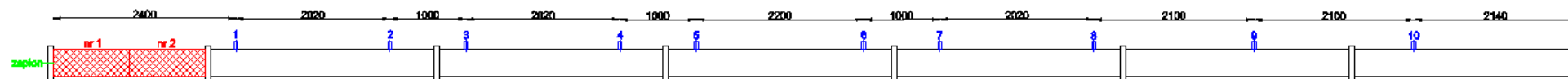


Rysunek 104 Widok sposobu ułożenia siatek w naprzemienny sposób





Rysunek 105 Stanowisko badawcze wyposażone w 1 sekcję przeszkód



Rysunek 106 Stanowisko badawcze wyposażone w 2 sekcje przeszkód

Poniżej w tabelach przedstawiono uzyskane wyniki ciśnień i prędkości z zastosowaniem układu ww. przeszkód.

Tabela 11 Wartości prędkości oraz ciśnień dla metanu – układ 1 przeszkód

Nr czujnik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ciśnienie [bar]	0,58	0,59	0,66	0,56	0,47	0,57	0,55	0,48	0,43	0,38
Prędkość [m/s]	267	337	333	505	500	550	500	505	525	350
Prędkość średnia [m/s]	437									

Tabela 12 Wartości prędkości oraz ciśnień dla metanu – układ 2 przeszkód

Nr czujnik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ciśnienie [bar]	0,61	0,67	0,63	0,60	0,53	0,62	0,51	0,39	0,42	0,43
Prędkość [m/s]	300	404	500	673	625	688	625	631	477	300
Prędkość średnia [m/s]	552									

Tabela 13 Wartości prędkości oraz ciśnień dla propanu – układ 1 przeszkód

Nr czujnik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ciśnienie [bar]	0,83	1,08	1,16	1,14	1,22	1,45	1,14	1,18	1,11	0,89
Prędkość [m/s]	480	631	714	842	909	1048	1000	962	955	553
Prędkość średnia [m/s]	809									

Tabela 14 Wartości prędkości oraz ciśnień dla propanu – układ 2 przeszkód

Nr czujnik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ciśnienie [bar]	2,02	2,28	3,02	2,56	2,81	2,74	2,51	2,97	2,84	2,50
Prędkość [m/s]	1200	1836	1923	1853	1887	1897	1818	1726	1765	1603

Prędkość średnia [m/s]	1751
------------------------	------

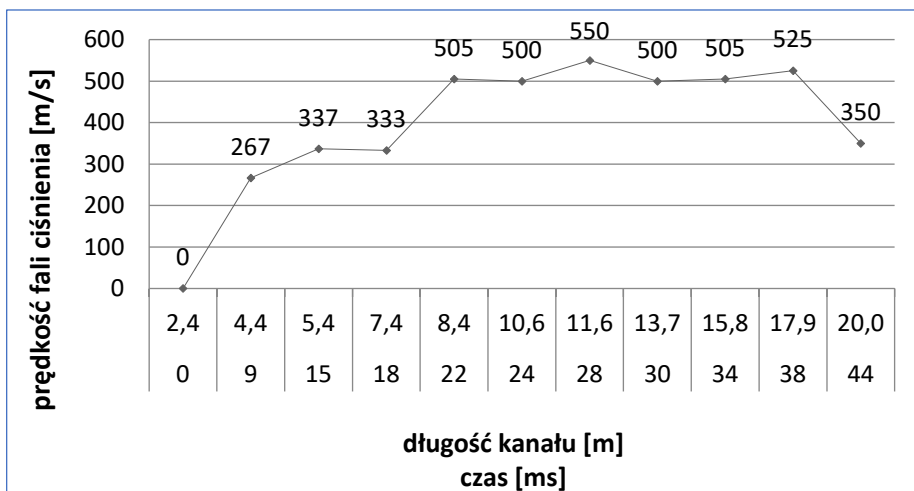
Tabela 15 Wartości prędkości oraz ciśnień dla wodoru – układ 1 przeszkód

Nr czujnik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ciśnienie [bar]	2,82	3,44	4,02	4,39	3,88	3,72	3,86	3,29	3,69	3,48
Prędkość [m/s]	1538	2061	1923	1980	1961	2018	1887	1980	1927	1909
Prędkość średnia [m/s]	1919									

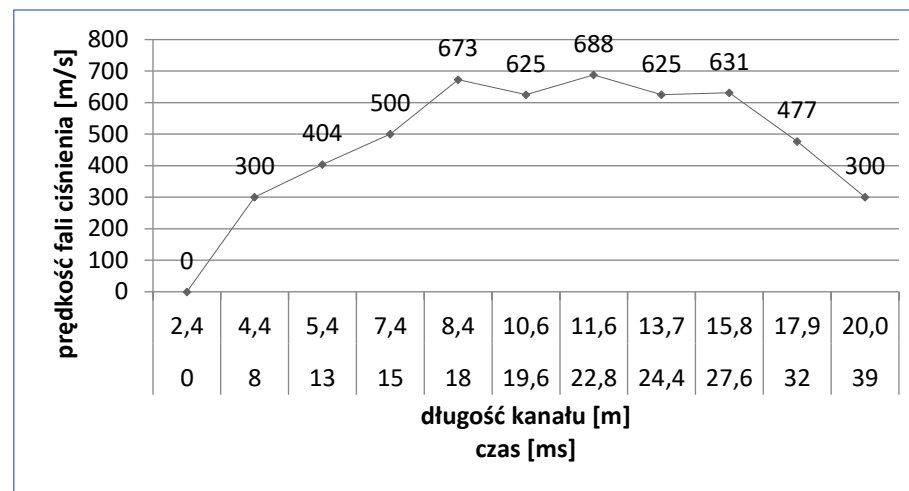
Tabela 16 Wartości prędkości oraz ciśnień dla wodoru – układ 2 przeszkód

Nr czujnik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ciśnienie [bar]	3,16	3,39	4,52	4,62	4,92	4,73	3,99	3,67	4,22	3,55
Prędkość [m/s]	1644	2244	2041	1924	1961	1982	1923	1942	1944	1909
Prędkość średnia [m/s]	1951									

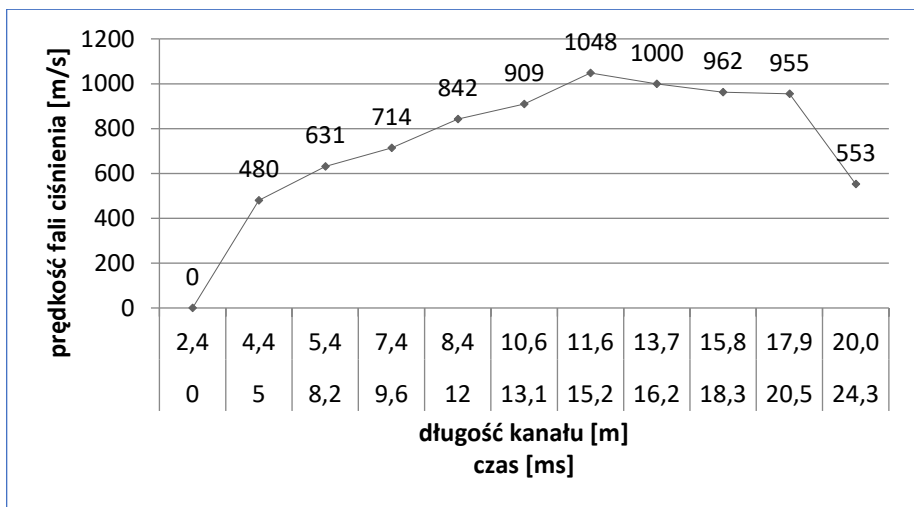
Na poniższych wykresach przedstawiono profile prędkości dla poszczególnych mieszanin gazów stecho dla przeszkód w układzie 1 i 2.



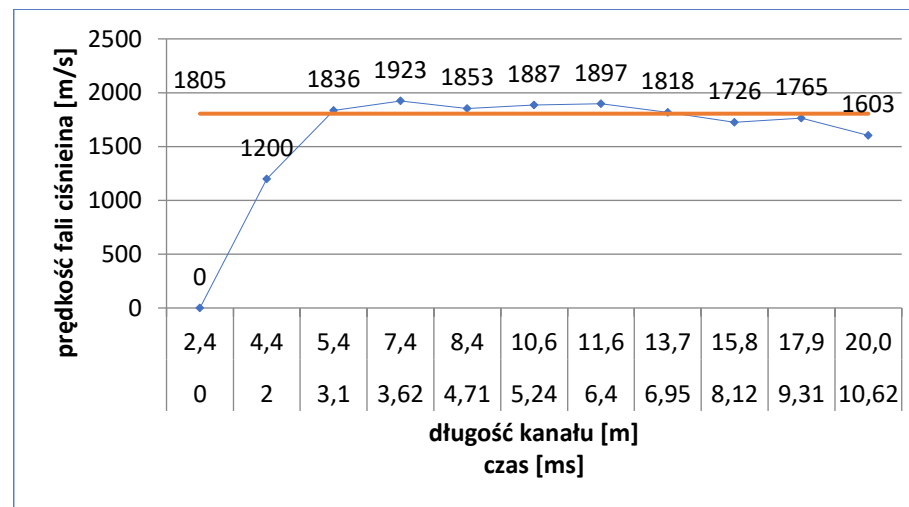
Rysunek 107 Metan – powietrze układ przeszkód 1



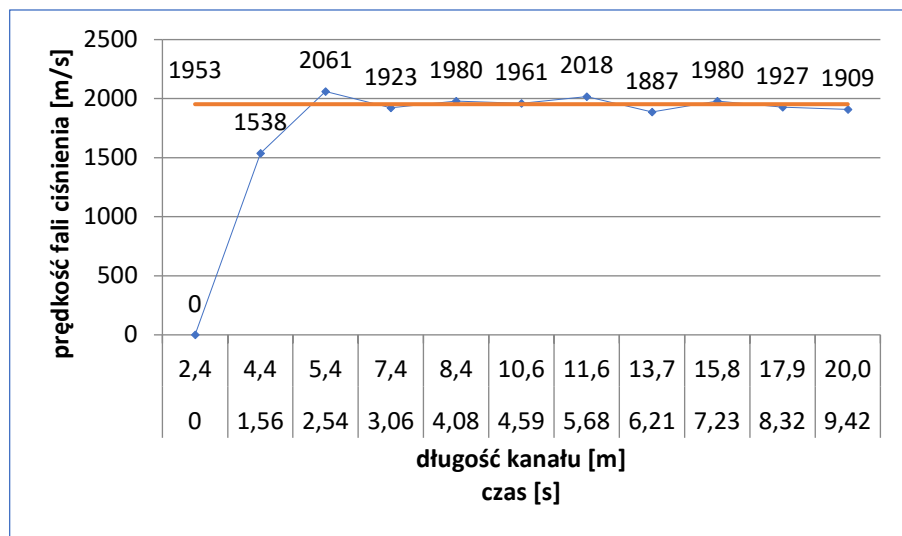
Rysunek 108 Metan – powietrze układ przeszkód 2



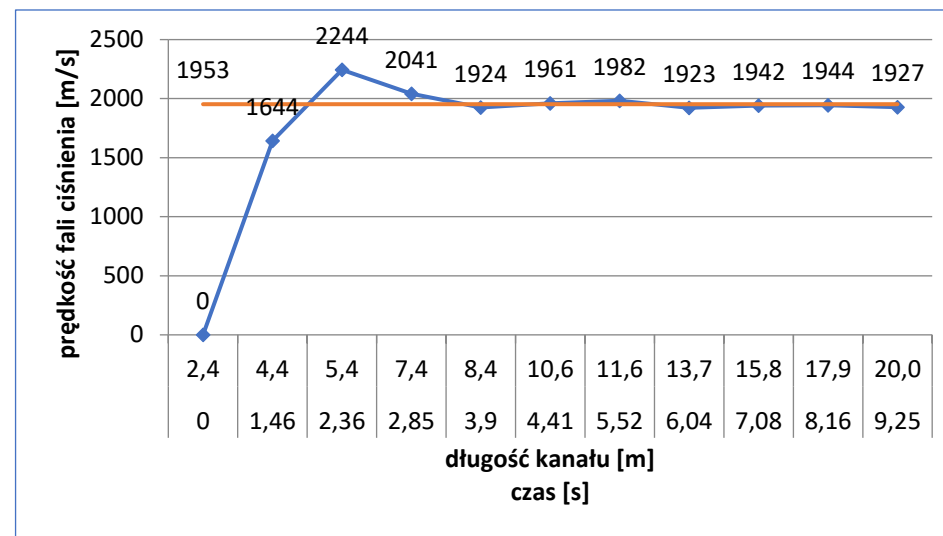
Rysunek 109 Propan – powietrze układ przeszkód 1



Rysunek 110 Propan – powietrze układ przeszkód 2 (czerwona linia prędkość Chapmana-Jouget)



Rysunek 111 Wodór – powietrze układ przeszkód 1 (czerwona linia prędkość Chapmana-Jouget)

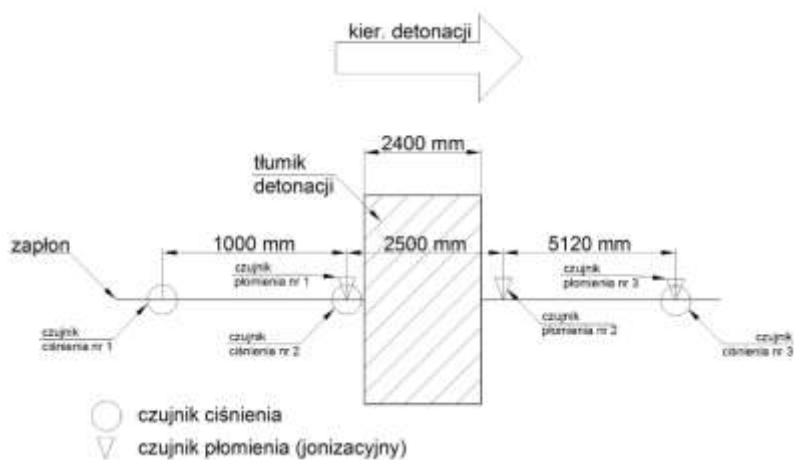


Rysunek 112 Wodór – powietrze układ przeszkód 2 (czerwona linia prędkość Chapmana-Jouget)

Przeprowadzono badania przebiegów spalania w kanale detonacyjnym mieszanin propanu, metanu i wodoru z powietrzem w stężeniu stechiometrycznym. Badania określiły warunki wpływu przeszkód na uzyskanie spalania detonacyjnego dla określonego gazu. Dla mieszaniny metanu i powietrza w układzie przeszkód 1 i 2 nie uzyskano spalania detonacyjnego. Dla mieszaniny propanu i powietrza w układzie przeszkody 1 nie uzyskano detonacji. Detonacja została uzyskana dla propanu i powietrza w układzie przeszkód 2 oraz dla wodoru i powietrza w układzie przeszkód 1 i 2. Analizując dane można wyciągnąć wniosek, że na całej długości w mieszaninie metanu zachodziło spalanie deflagracyjne. Podobna sytuacja zachodzi przy zastosowaniu przeszkód w układzie 2. W tym przypadku prędkości fali ciśnienia są wyższe, jednakże nadal jest to spalanie deflagracyjne. W obu ww. przypadkach stabilizacja prędkości spalania zachodzi na długości 8.4 – 15.8 m kanału. Widoczny jest także dłuższy „rozbieg” profilu prędkości w fazie początkowej. Prędkość także spada w końcowym odcinku kanału. Mieszanina propanu i powietrza w układzie przeszkody 1 nie detonuje. Zachodzi spalanie deflagracyjne z dłuższym niż w metanie odcinkiem przyspieszania fali ciśnienia. Prędkość max wynosi ok 1000 m/s i utrzymuje się na odcinku o długości ok. 6 m. W końcowym odcinku kanału prędkość spada o ok. połowę. Dla przypadku mieszaniny propanu w układzie przeszkody 2 zachodzi spalanie detonacyjne. Widoczne jest szybkie rozpędzanie czoła fali ciśnienia w początkowej fazie spalania. Prędkość detonacji jest osiągnięta po odległości 4.4 m. Na wcześniejszym odcinku dochodzi do zjawiska DDT. Prędkość detonacji utrzymuje się na długości ok 9 m. W odległości 6.3 m od końca kanału prędkość spada poniżej prędkości teoretycznej C-J, jednakże nadal jest bliska wartości teoretycznej. W przypadku mieszanin wodoru i powietrza prędkość detonacji jest osiągnięta zarówno w układzie przeszkód 1 jak i 2. W przypadku układu 2 widoczna jest zwiększona wartość prędkości w stosunku do jej teoretycznej wartości. Prawdopodobnie jest to spowodowane zjawiskiem „przegonienia” detonacji i spalania detonacyjnego tzw. niestabilnego. Praktycznie od 7.4 m długości kanału uzyskuje się zbliżone wyniki prędkości doświadczalnej z jej wartością teoretyczną. Praktycznie do końca odcinka kanału prędkość utrzymuje wartość teoretyczną.

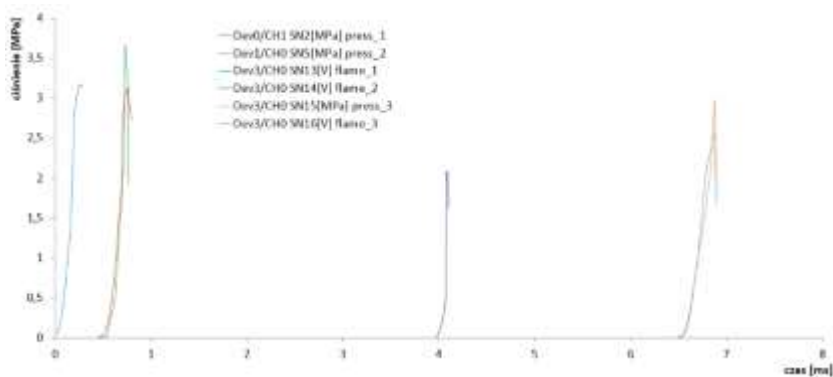
### 3.4. Opis wyników badań prototypu pasywnego systemu tłumienia wybuchów w skali rzeczywistej

Wg założeń wstępnych przyjęto, że dla każdego gazu tj. metanu, propanu i wodoru przeprowadzone zostaną badania przerywacza detonacji. Z uwagi jednak, na fakt, iż wcześniejsze badania na kanale detonacyjnym wykazały, że do detonacji w kanale można doprowadzić w mieszaninach stechio z udziałem gazu propanu lub wodoru to podjęto decyzję, że testy tłumika zostaną wykonane dla dwóch gazów z pominięciem metanu. Przyjęto, że dla wykazania skuteczności tłumika, badania będą wykonywane tak długo, aż wkład tłumika straci właściwości przerywania detonacji. Następnie dokonywano wymiany wkładu poprzez jego usunięcie (stalowe kulki o średnicy 1 mm/śrut), wymianę z uzupełnieniem, a następnie ponowne umieszczenie (przesypanie i ubicie) wewnątrz każdego z 38 wkładów tłumika. Testy prowadzono dla 2 gazów: propan i wodór w stężeniu stechiometrycznym odpowiednio: 4,03% i 29,58%. Wykonano 3 serie po 8 badań dla propanu i 3 serie po 2 badania dla wodoru przy zachowaniu każdorazowo wystąpienia spalania detonacyjnego przed tłumikiem detonacji. Przemieszczanie się fali ciśnienia i płomienia monitorowane było przez układ czujników ciśnienia i jonizacyjnych podłączonych do systemu akwizycji danych. Zmiany napięcia z czujników ciśnienia nr 1 i 2 szczytowane były z częstotnością 100-300 kHz z uwagi na oczekiwanie detonacji. Zmiany napięcia z czujnika ciśnienia nr 3 szczytowany był z częstotnością 10-50 kHz dla propanu i 100 – 300 Hz dla wodoru. Czujniki ciśnienia i jonizacyjne zostały umieszczone w określonych odstępach od siebie w górnej części kanału. W momencie zapłonu ciśnienie mieszaniny gazu palnego i powietrza wynosiło 1 bar. Zapłon za pomocą spłonki pirotechnicznej. Mieszanina gazu uzyskiwana była za pomocą ciśnień cząstkowych. Na początku kanału, od strony źródła zapłonu zastosowano układ przyspieszacza (przeszkód) w celu osiągnięcia stabilnej detonacji w całym kanale na wejściu do tłumika. Poniżej na rysunku przedstawiono schemat stanowiska badawczego wraz z rozmieszczeniem punktów pomiarowych szczytujących sygnały odpowiedzialne za prawidłowy przebieg procesu.

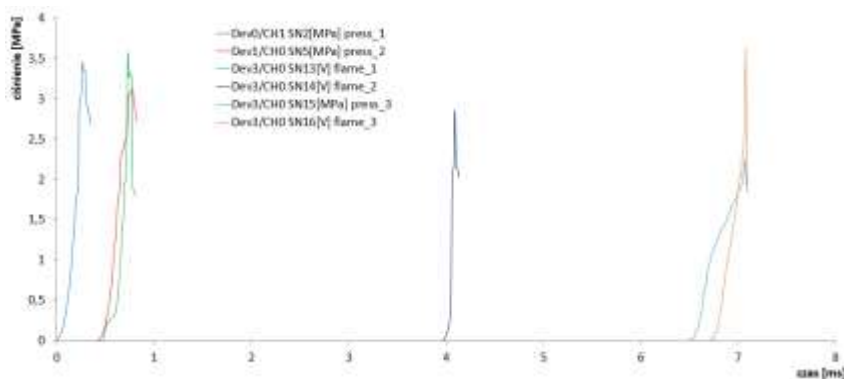


Rysunek 113 Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na stanowisku badawczym (bez skali)

Poniżej na wykresach przedstawiono wyniki badań dla tłumienia detonacji mieszaniny propan, wodór i powietrze przez prototyp. Na wykresach przedstawiono przyrosty ciśnień wyrażone w jednostkach MPa w czasie oraz zmianę napięcia generowaną wskutek jonizacji gazu znajdującego w kanale detonacyjnym także w funkcji czasu. Wartość napięcia należy traktować jako bezwymiarową, tj. bez określenia jednostek fizycznych. Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że pik napięcia z czujnika jonizacji określony jako mała wartość napięcia oznacza, że brak jest wystąpienia spalania (brak rejestracji fali płomienia). Wysoki pik oznacza przejście fali spalania (rejestracja płomienia). Spalanie detonacyjne od spalania deflagracyjnego można także rozróżnić po rejestracji braku zbieżności odczytu czujników jonizacyjnych i ciśnienia. W przypadku spalania deflagracyjnego falą, która poprzedza zjawisko wybuchu jest fala ciśnienia. W przypadku detonacji fala spalania i ciśnienia znajdują się praktycznie w jednej płaszczyźnie. Każdy poszczególny wykres stanowi uśrednienie badań z każdej serii



Rysunek 114 Zarejestrowane przyrosty ciśnienia i napięcia dla mieszaniny stechio wodór powietrze (test nr 1-3 serie)

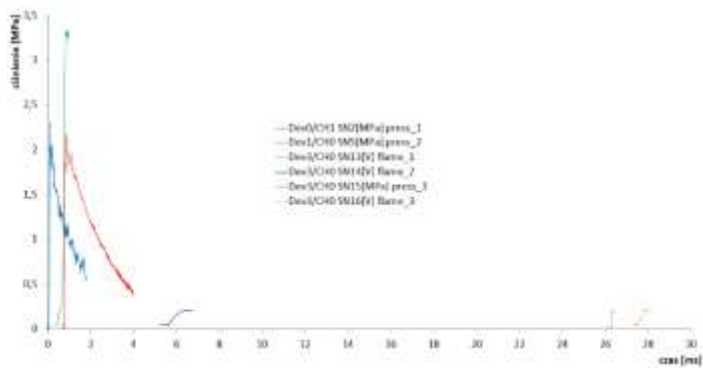


Rysunek 115 Zarejestrowane przyrosty ciśnienia i napięcia dla mieszaniny stechio wodór powietrze (test nr 2-3 serie)

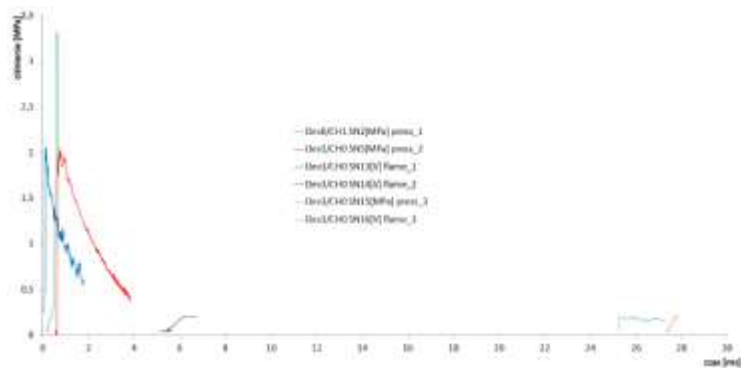
Z powyższych wyników widać, że zastosowany wkład tłumika detonacyjnego nie przerwał spalania detonacyjnego w mieszaninie powietrza i wodoru. W teście nr 1 czujnik ciśnienia press\_1 i press\_2 oraz czujników jonizacyjny flame\_1 zarejestrowały przebieg spalania detonacyjnego przed wlotem do tłumika. Na wylocie z tłumika do kanału czujnik flame\_2 wykrył płomień, widoczne jest to po dużym przyroście napięcia zarejestrowanym przez ww. czujnik. W dalszej części spalanie przeszło w spalanie detonacyjne. Na odcinku 5120 mm, tj. pomiędzy czujnikami flame\_2 oraz zestawem press\_3 i flame\_3 prędkość spalania osiągnęła 1992,2 m/s. W teście nr 2 sytuacja wyglądała identycznie z różnicą prędkości, która w tym przypadku wyniosła 1855 m/s.

Zapłon mieszaniny wodoru i powietrza za tłumikiem spowodowany był gwałtownym przejściem fali spalania przez wkład i zapoczątkowaniem spalania mieszaniny za tłumikiem. Dodatkowo można zauważyć, że pomiędzy czujnikami flame\_1, press\_2 oraz flame\_2 prędkość spalania wyniosła 744 m/s, czyli było to spalanie deflagracyjne. Przejście do detonacji prawdopodobnie zapoczątkowane było silnym wyrzutem płomienia za tłumikiem o wysokiej skumulowanej energii, która doprowadziła do zapoczątkowania spalania detonacyjnego w dalszej części kanału. Po rozebraniu wkładów nie stwierdzono uszkodzeń mogących powstać pod wpływem spalania lub ciśnienia. Ten sam wkład został zastosowany do badań tłumika z gazem propan.

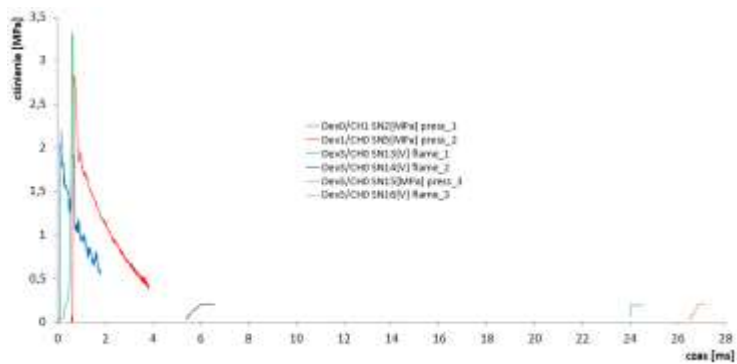
Poniżej przedstawiono zarejestrowane przebiegi ciśnienia i płomienia w mieszaninie propan-powietrze.



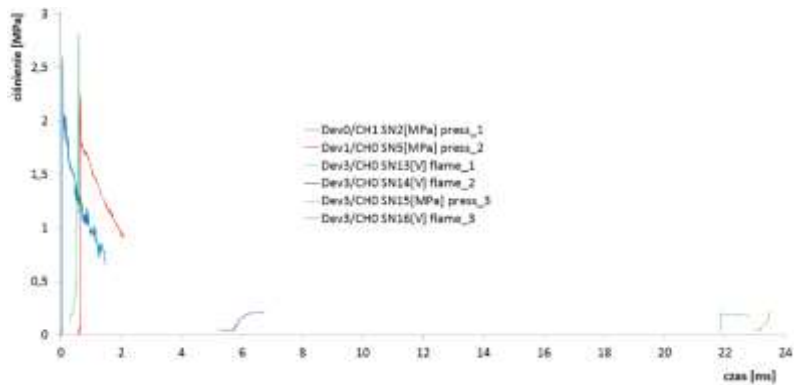
Rysunek 116 Zarejestrowane przyrosty ciśnienia i napięcia dla mieszaniny stechio propan powietrze (test nr 1-3 serie)



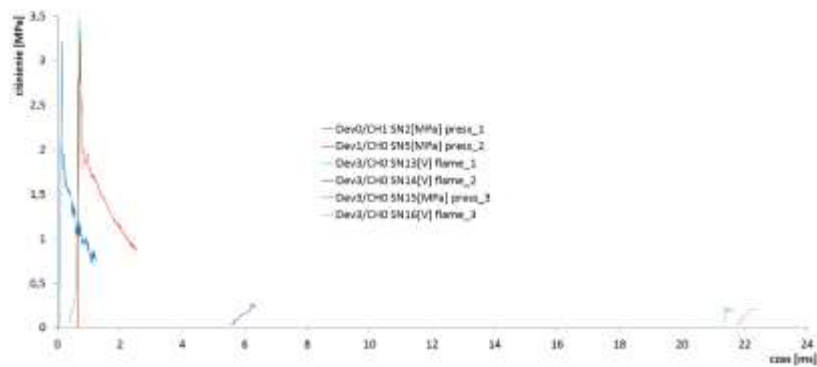
Rysunek 117 Zarejestrowane przyrosty ciśnienia i napięcia dla mieszaniny stechio propan powietrze (test nr 2-3 serie)



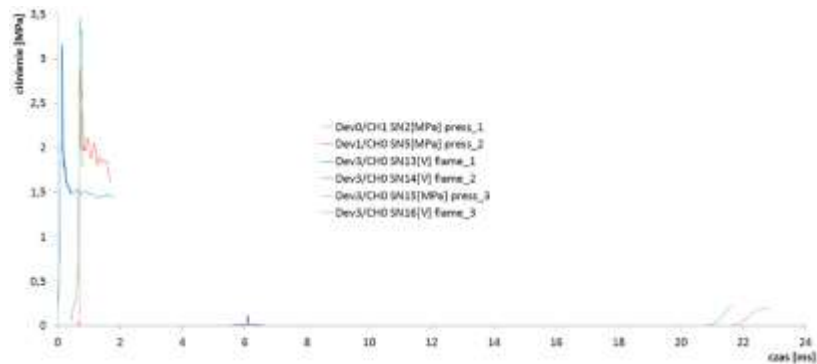
Rysunek 118 Zarejestrowane przyrosty ciśnienia i napięcia dla mieszaniny stechio propan powietrze (test nr 3-3 serie)



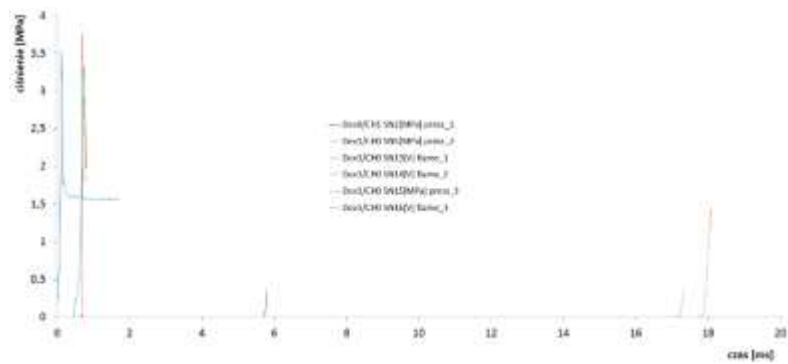
Rysunek 119 Zarejestrowane przyrosty ciśnienia i napięcia dla mieszaniny stechio propan powietrze (test nr 4-3 serie)



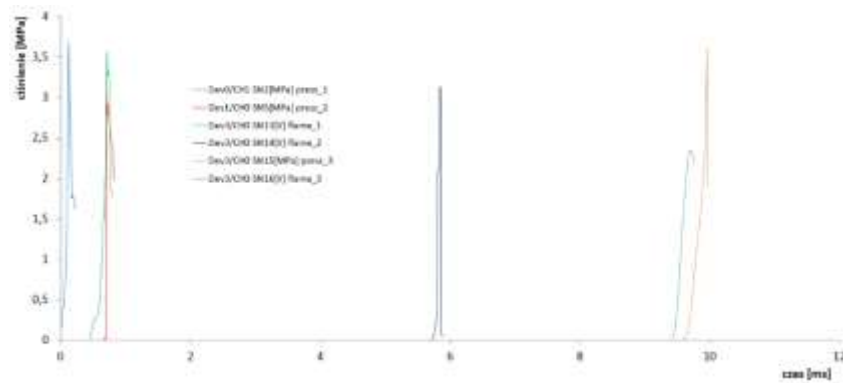
Rysunek 120 Zarejestrowane przyrosty ciśnienia i napięcia dla mieszaniny stecho propan powietrze (test nr 5-3 serie)



Rysunek 121 Zarejestrowane przyrosty ciśnienia i napięcia dla mieszaniny stecho propan powietrze (test nr 6-3 serie)



Rysunek 122 Zarejestrowane przyrosty ciśnienia i napięcia dla mieszaniny stecho propan powietrze (test nr 7-3 serie)



Rysunek 123 Zarejestrowane przyrosty ciśnienia i napięcia dla mieszaniny stecho propan powietrze (test nr 8-3 serie)



Z powyższych wyników wynika, że zastosowany wkład tłumika detonacyjnego przerwał spalanie detonacyjne w 7 kolejnych testach na 8 testów. W teście nr 1-6 czujnik ciśnienia press\_1 i press\_2 oraz czujników jonizacyjny flame\_1 zarejestrowały przebieg spalania detonacyjnego przed wlotem do tłumika. Na wylocie z tłumika do kanału czujnik flame\_2 nie wykrył płomienia. Widoczne jest to po niewielkim przyroście napięcia zarejestrowanym przez ww. czujnik. W dalszej części spalanie nie zachodziło w mieszaninie, zarejestrowano jedynie niewielki przyrost ciśnienia. Na odcinku 5120 mm, tj. pomiędzy czujnikami flame\_2 oraz zestawem press\_3 i flame\_3 prędkość przemieszczania się wyłącznie fali ciśnienia, w postaci sprężonej mieszaniny gazów wynosiła w granicach od 247,8 do 343,6 m/s. W teście nr 7 fala spalania detonacyjnego została przerwana przez wkład tłumika (brak zarejestrowanego płomienia przez czujnik flame\_2), jednakże w dalszej części kanału doszło do ponownego zapłonu mieszaniny i spalania się jej w pozostałej objętości. Jak wskazują badania przeanalizowane w literaturze to do tego zjawiska mogło dojść wskutek samozapłonu mieszaniny w wyniku jej sprężenia adiabatycznego.

W teście nr 8 nie doszło do przerywania fali detonacyjnej przez wkład tłumika. Widoczne jest zarejestrowanie sygnału napięcia o dużej wartości na czujniku flame\_2. W dalszej kolejności rejestruje się także przyrost ciśnienia o wartości porównywalnej z wartością ciśnienia detonacji oraz przejście płomienia. Prędkość z jaką fala spalania przemieściła się od czujnika flame\_2 do zestawu press\_3 i flame\_3 wynosiła 1462,8 m/s, czyli była bliska prędkości detonacji i rosła dalej.

W tabeli poniżej przedstawiono uzyskane parametry ciśnienia oraz określono przejście płomienia w różnych punktach pomiarowych dla mieszanin propan powietrze.

Tabela 17 Wykaz uzyskanych ciśnień oraz przejścia płomienia przez tłumik detonacji

Nr testu	Ciśnienie czujnik nr 1	Ciśnienie czujnik nr 2	Ciśnienie czujnik nr 3	Płomień czujnik nr 1	Płomień czujnik nr 2	Płomień czujnik nr 3	Uwagi
	MPa	MPa	MPa	tak/nie	tak/nie	tak/nie	
1	2,32	2,28	0,2	tak	nie	nie	spalanie przerwane
2	2,03	2,44	0,18	tak	nie	nie	spalanie przerwane
3	2,20	2,87	0,19	tak	nie	nie	spalanie przerwane
4	2,59	2,32	0,19	tak	nie	nie	spalanie przerwane
5	3,20	3,26	0,18	tak	nie	nie	spalanie przerwane
6	3,12	2,95	0,22	tak	nie	nie	spalanie przerwane
7	3,52	3,74	0,32	tak	nie	tak	spalanie przerwane, za tłumikiem doszło do ponownego zapłonu
8	3,69	3,26	2,33	tak	tak	tak	brak przerywania spalania detonacyjnego

W tabeli poniżej przedstawiono średnią prędkość z jaką zachodziło przemieszczanie się fali ciśnienia w mieszaninie palnej propanie pomiędzy czujnikami flame\_2 do zestawu press\_3 i flame\_3.

Tabela 18 Prędkość średnia pomiędzy czujnikami flame\_2 do zestawu press\_3 i flame\_3

Nr testu	Średnia pomiędzy czujnikami flame_2 do zestawu press_3 i flame_3.	Uwagi
	m/s	
1	247,8	fala ciśnienia
2	260,3	fala ciśnienia
3	275,8	fala ciśnienia
4	318,2	fala ciśnienia
5	325,7	fala ciśnienia

6	343,6	fala ciśnienia
7	446,4	spalanie
8	1462,8	prawdopodobna detonacja

Z uzyskanych wartości widać, że z każdym testem prędkość przemieszczenia się fali ciśnienia rosta przechodząc w teście nr 8 do spalania bliskiemu detonacyjnemu.

Z przeprowadzonych testów wynika, że zaprojektowany tłumik spełnia swoje zadanie dla gazu propan tzn. urządzenie jest zdolne do przerywania detonacji w mieszaninie najbardziej reaktywnej tj. w stężeniu stechiometrycznym propanu z powietrzem. Przerwanie spalania detonacyjnego, bez możliwości ponownego zapłonu mieszaniny gazowej jest możliwe w badanym przypadku 6 razy z rzędu dla każdej z 3 serii.

Zastosowany stalowy śrut stanowiący wypełnienie elementów tłumiących daje szczelinę bezpieczną mierzalną o rozmiarze 0,36mm. Mając na uwadze powyższe można wyciągnąć wniosek, że tłumik spełnił by swoje zadanie do przerywania spalania detonacyjnego dla innych gazów, np. etylenu. Teoretycznie spalanie detonacyjne z użyciem mieszaniny wodoru i powietrza powinno zostać także przerwane przez zastosowany wkład tłumika. Natomiast należy mieć na względzie, że wg różnych źródeł teoretyczna szerokość szczeliny bezpiecznej jest różna dla tych samych gazów. Na przykład grupa National Electric Code za bezpieczną szczelinę dla wodoru podaje wartość  $\leq 0.45$  mm. Jednakże dane te są sporządzane dla spalania deflagracyjnego lub wręcz laminarnego, tj. średnich i niskich prędkości spalania.

Podczas badań tłumika zwrócono szczególną uwagę na staranność ułożenia zastosowanego śrutu po każdej serii, gdyż jakość wykonania tej części pracy stanowiła o powodzeniu badań. Powyższe odbywało się poprzez wsypywanie śrutu do cylindra obudowy wkładu tłumiącego o wysokości ok 10mm i starannym ułożeniu wzajemnym z wykorzystaniem wibracji. Czynność tę powtarzano aż do wypełnienia całkowitego każdego z 38 cylindrów.

## 4. Testy aktywnych systemów tłumienia wybuchów

### 4.1. Działanie systemu

W zadaniu I.2 opracowano założenia do budowy stanowisk badawczych oraz wstępną metodykę badawczą. Zadanie składało się z następujących części: analiza literaturowa, założenia do budowy stanowisk badawczych oraz wstępna metodyka badawcza.

W części dot. analizy literaturowej dokonano przeglądu literatury i norm w przedmiotowej tematyce. Pierwsze opracowanie patentowe dotyczące systemu tłumienia wybuchu pochodzi z 1912 r. i przypisuje się go niemieckiej firmie. Określano go jako „szybki suchy proszkowy środek gaszący”. II wojna światowa przyspieszyła rozwój tej metody zabezpieczenia przed wybuchem. Brytyjskie siły powietrzne stwierdziły, że 80% całkowitych strat samolotów bojowych powstało z powodu pożarów. W oparciu o ten dowód, wymagania wojskowe określiły konieczność pracy nad lekkim systemem gaśniczym o wysokiej skuteczności, który zapewni ochronę silników samolotów i ich systemów paliwowych. Podobna sytuacja miała miejsce w Niemczech. W rezultacie opracowano systemy tłumienia wybuchu, w których środek gaśniczy znajdował się trwale pod ciśnieniem w butli. W celu gwałtownego uwolnienia środka tłumiącego zastosowano zawór natychmiastowej reakcji z ładunkiem pirotechnicznym oraz zapewniono dużą średnicę otworu wlotowego do instalacji chronionej. Opracowane technologie w połączeniu z systemem detekcji płomienia lub wzrostu ciśnienia tworzą podstawę współczesnych automatycznych systemów tłumienia wybuchu stosowanych w urządzeniach i aparatach procesowych wykorzystywanych w przemyśle.

Prace dotyczące systemów tłumienia wybuchów zapoczątkowane w początkach ubiegłego stulecia w dalszym ciągu są rozwijane. Wiele ośrodków badawczych prowadzi intensywne badania obejmujące studia nad podstawowymi elementami układu. Badane są różne środki gaśnicze pod kątem ich skuteczności, konstruowane są nowe stanowiska eksperymentalne do badania skuteczności układów tłumienia, prowadzone są badania nad opracowaniem efektywnych sposobów tłumienia wybuchu różnych materiałów.

W celu ochrony przed wybuchem stosowana jest wstępna i konstrukcyjna ochrona. Wstępna ochrona przed wybuchem minimalizuje możliwość zaistnienia wybuchu, ale nie zabezpiecza przed skutkami ewentualnego wybuchu. Celem tego typu zabezpieczenia jest ograniczenie możliwości powstania atmosfery wybuchowej i/lub eliminacja potencjalnych źródeł zapłonu. Natomiast konstrukcyjna ochrona ma za zadanie ograniczenie skutków ewentualnego wybuchu. Zgodnie z dyrektywą ATEX 95 powyższy cel jest realizowany przez:

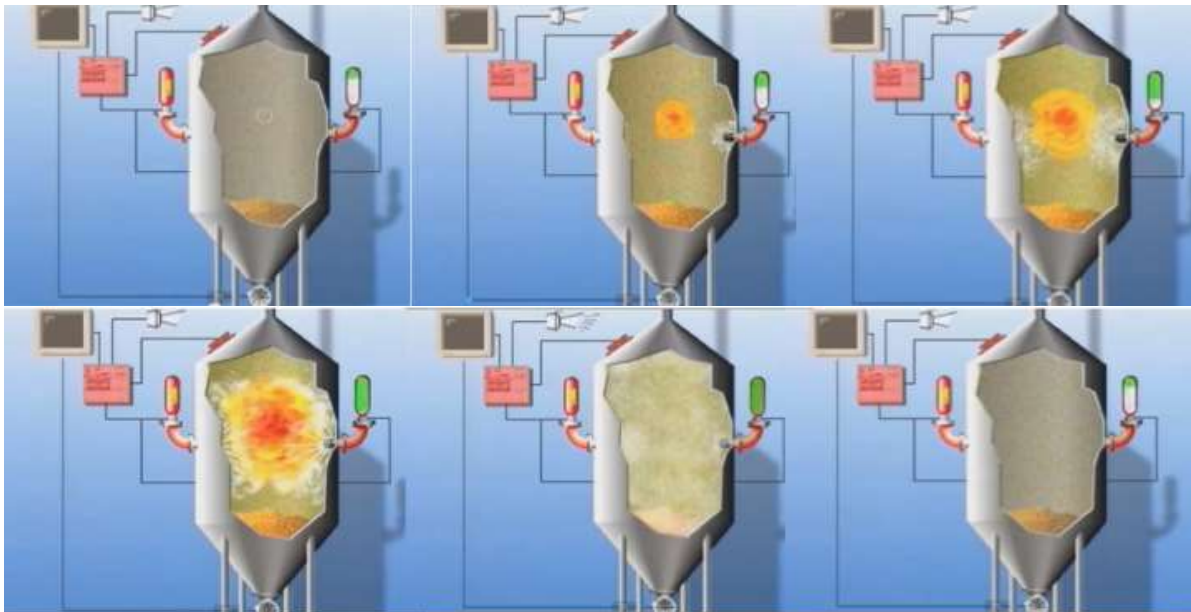
- odsprężanie wybuchu – separowanie aparatów pomiędzy sobą w sposób uniemożliwiający przedostanie się skutków wybuchu na całą instalację i jej otoczenie,
- odciążanie wybuchu – przy pomocy paneli dekompresyjnych lub rozwiązań pochodnych,
- tłumienie wybuchu – przy pomocy środków gaśniczych,
- wykonanie aparatury jako odpornej na ciśnienie wybuchu lub odpornej na uderzenie ciśnienia wybuchu – zastosowanie aparatury zdolnej wytrzymać maksymalne ciśnienie wybuchu.

Tłumienie wybuchu jest najbardziej zaawansowanym technicznie rozwiązaniem wykorzystywanym do ochrony urządzeń procesowych przed wybuchem. Aktywne tłumienie wybuchu polega na wykryciu zjawiska w początkowym stadium jego rozwoju, zaraz po zapłonie, a następnie na natychmiastowym wyładowaniu środka gaśniczego. Tego typu systemy zapobiegają zarówno powstawaniu wysokich ciśnień w wyniku wybuchu, jak również chronią przed przedostaniem się płomieni do zbiorników i urządzeń procesowych stanowiących zamknięte układy technologiczne.

Czynnik tłumiący wybuch musi być podany do chronionego urządzenia procesowego z taką szybkością, aby mógł ugasić płomień zanim zdąży powstać duży przyrost ciśnienia. Przy dzisiejszej technologii czas wyładowania środka tłumiącego wynosi około 75 – 300 ms. Ze względu na krótki czas początkowej fazy rozwoju wybuchu (30–100 ms), tłumienie wybuchu odbywa za pomocą automatycznego systemu tłumienia wybuchów. W czasie tłumienia wyróżnia się trzy fazy:

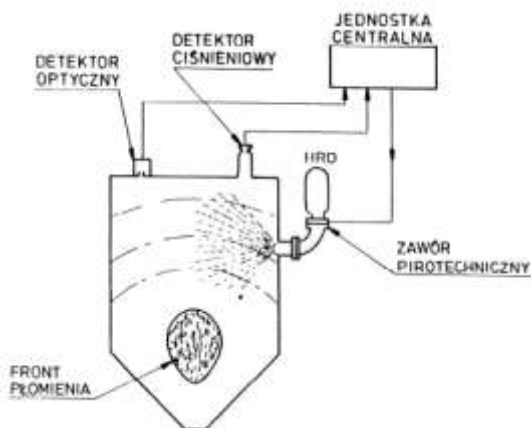
- detekcji wybuchu,
- podawania środka gaśniczego,
- oddziaływania środka gaśniczego na płomień.

Etapy procesu tłumienia przedstawiono na rysunku poniżej.



Rysunek 124 Fazy tłumienia.

Nowoczesne systemy automatycznego tłumienia składają się z detektora wybuchu, jednostki centralnej (centralki) oraz zestawu pojemników ze środkiem gaśniczym. Na rysunku poniżej przedstawiono schemat systemu tłumienia wybuchu.



Rysunek 125 Schemat systemu tłumienia wybuchów

Ważnym elementem systemu tłumienia są detektory, które służą albo do wykrycia nadciśnienia albo płomienia powstałego w wyniku początkowej fazy wybuchu. Zadaniem detektora jest możliwie wczesne wykrycie wybuchu i przekazanie sygnału do jednostki centralnej. Detektory dzieli się na ciśnieniowe i optyczne.

Czujniki ciśnienia instalowane są na zamkniętych aparatach i urządzeniach procesowych. Mogą to być czujniki progowe, które generują sygnał elektryczny, gdy zostanie przekroczona ustalona wartość ciśnienia lub czujniki szybkości przyrostu ciśnienia (rysunek poniżej), które reagują na określony wzrost wartości ciśnienia w jednostce

czasu. Niezależnie od rodzaju czujnika w przypadku przekroczenia wartości progowych sensory dynamiczne (przełączniki) wysyłają sygnał elektryczny do centrali sterującej. Zwykle stosuje się zarówno czujniki wartości progowych ciśnienia, jak i szybkości przyrostu ciśnienia, co pozwala na odpowiednie dostosowanie systemu detekcji do warunków technologicznych charakterystycznych dla danej linii produkcyjnej.



Rysunek 126 Dynamiczny czujnik ciśnienia typ MEX-3.2.  
Źródło: Kidde Brand- und Explosionsschutz GmbH

Detektory optyczne (rysunek poniżej) reagują na promieniowanie płomienia lub żarzących się cząstek. Detektory tego typu są bardzo czułe i bardzo wrażliwe na zakłócenia. Stosowane są w kanałach i rurociągach oraz w przestrzeniach zamkniętych bez dostępu światła dziennego.



Rysunek 127 Optyczne czujniki w podczerwieni typ: DG -IR -3C, IR-13.

W celu poprawy niezawodności aktywnego systemu tłumienia wybuchu stosuje się kombinację obu typów detektorów. Wykrycie wybuchu przez detektor skutkuje przekazaniem informacji do centrali sterującej, która aktywuje podanie środka tłumiącego (gaśniczego). Środek przechowywany jest w gaśnicach - butlach ciśnieniowych HRD (ang. High Rate Discharge). Powszechnie dostępne są stalowe butle o pojemności od 5 do 50 dm<sup>3</sup> (rysunek poniżej).



Rysunek 128 Butle HRD.

Wewnątrz pojemnika, nad powierzchnią materiału tłumiącego znajduje się gaz sprężony do ciśnienia 6-12 MPa lub inny system wyzwalający. Skuteczność działania takiego systemu zależy od szybkości rozpylenia materiału tłumiącego w przestrzeni chronionej. Sygnałem uruchamiającym instalację jest przyrost ciśnienia będący wynikiem rozwijającego się wybuchu lub świecenie płomienia. Wymagany czas wyładowania butli to 80–500 ms. Proszek gaśniczy transportowany jest przewodem do dyszy rozpylającej lub głowicy rozpylającej.

#### 4.2. Analiza medium gaśniczego

Skuteczność systemu tłumienia zależy od ilości środka gaśniczego wprowadzonego do chronionego urządzenia w jednostce czasu. Wydajność butli HRD w określonym układzie mocującym i z odpowiednim systemem rozpraszania powinna być zbadana doświadczalnie. Liczba i rozmieszczenie gaśnic zależy od geometrycznych rozmiarów i kształtu chronionej obudowy i ma decydujące znaczenie dla osiągnięcia najlepszego efektu tłumienia.

Środki tłumiące (gaśnicze) to substancje, które hamują procesy spalania. Każdy środek gaśniczy charakteryzuje się tym, że hamuje proces spalania za pomocą kilku mechanizmów gaszenia (tabela poniżej), jednak z reguły jeden z nich jest dominujący

Tabela 19 Mechanizmy gaszenia pożaru

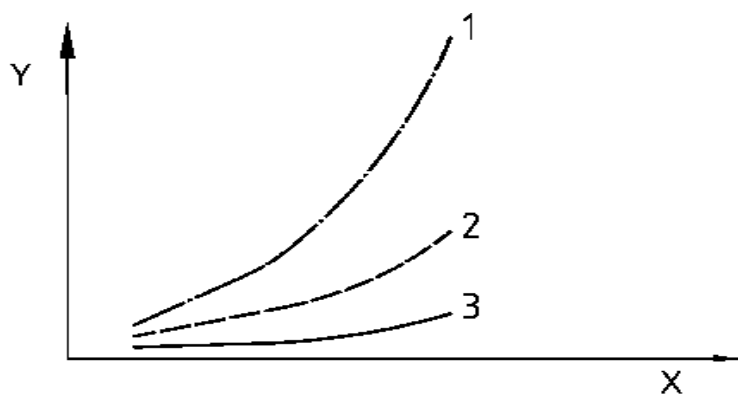
Mechanizmy gaszenia			
Chemiczne		Fizyczne	
Reakcja chemiczna hamuje proces spalania	Chłodzenie strefy spalania i obniżanie temperatury materiału palnego	Izolowanie materiału palnego od utleniacza	Obniżanie stężenia tlenu

W układach tłumiących stosowane są następujące środki gaśnicze:

- gazowe (halony, zamienniki halonów),
- ciekłe (woda),
- proszkowe (proszki gaśnicze).

Środki gaśnicze w postaci rozdrobnionego ciała stałego działają antykatalityczne na płomień (proszki węglanowe oraz fosforanowe). Niektóre wykazują również działanie izolujące poprzez tworzenie warstwy na materiale palnym (proszki fosforanowe). Proszki gaśnicze są najczęściej stosowanym środkiem tłumiącym w przemyśle. Podany w strefę wybuchu proszek gaśniczy działa na płomień aerodynamicznie, cieplnie i chemicznie. Działanie aerodynamiczne polega na wytworzeniu silnego podmuchu, a oddziaływanie cieplne polega na obniżeniu temperatury płomienia przez pochłanianie ciepła. Działanie chemiczne polega na przyspieszeniu rekombinacji rodników w płomieniu, co prowadzi do jego zgaśnięcia. Typowe proszki gaśnicze stosowane w systemach tłumienia wybuchów to: wodorowęglan sodu i fosforan amonu. Zapotrzebowanie proszku gaśniczego wymienionego typu do tłumienia wybuchów pyłowych określa się na 2–3 kg/m<sup>3</sup> chronionej objętości.

Zastosowanie środka gaśniczego zależy od jego skuteczności tłumienia wybuchu. Środek tłumiący uważa się za bardzo skuteczny w przypadku, gdy wzrost ciśnienia aktywacji  $p_a$  systemu tłumienia wybuchu prowadzi do małego wzrostu maksymalnego ciśnienia zredukowanego wybuchu  $p_{red,max}$  (rysunek poniżej).



Rysunek 129 Skuteczność środka tłumiącego  
 Mniej skuteczny środek tłumiący  
 Skuteczny środek tłumiący  
 Bardzo skuteczny środek tłumiący  
 X pa (bar)  
 Y pred,max (bar)

Podczas wyboru środka tłumiącego oprócz skuteczności gaśniczej powinno się również brać pod uwagę jego kompatybilność z procesem. W tym celu powinno się

uwzględnić:

- jego sposób reakcji z produktami procesowymi,
- stabilność temperaturową,
- poziomy toksyczności środka tłumiącego odnosząc się do dopuszczalnych stężeń w środowisku pracy.

Dodatkowo w razie konieczności powinno się określić:

- możliwość stosowania z żywnością,
- zdolność inicjowania korozji,
- wpływ na środowisko naturalne,
- możliwość usunięcia z urządzenia po wyładowaniu.

Ze względu na zastosowane surowce podziału proszków dokonuje się uwzględniając ich skład chemiczny. Wyróżnia się m.in.:

- proszki węglanowe,
- proszki fosforanowe,
- proszki mocznikowe,
- proszki chlorowe.

Skład chemiczny proszku determinuje w dużej mierze jego zastosowanie do gaszenia określonych rodzajów pożarów. Podstawowymi składnikami proszków do cieczy palnych są wodorowęglany metali alkalicznych ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{KHCO}_3$ ), węglany ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ) oraz siarczany (głównie  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ). Skład jest tak dobrany, by proszek stał się inhibitorem spalania – spowalniał je przez zakłócanie wymiany ciepła (mechanizm fizyczny) oraz hamował reakcje chemiczne zachodzące w pożarze (mechanizm chemiczny). W procesie biorą udział zarówno same stałe cząstki proszku, jak i gazowe produkty jego rozkładu bądź odparowania. Proszki na bazie węglanów stosowane są głównie do gaszenia pożarów grupy B oraz C. Proszki zawierające fosforany stosowane są do gaszenia pożarów gazów, cieczy palnych oraz ze względu na właściwości fosforanów do gaszenia pożarów ciał stałych. Proszki na bazie chlorków metali (np.  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ) znajdują zastosowanie w gaszeniu pożarów metali (grupy D). W tabeli poniżej zestawiono składniki aktywne wybranych proszków gaśniczych oraz wskazano grupy pożarów, do gaszenia których są przeznaczone.

Tabela 20 Składniki aktywne proszków gaśniczych oraz ich zastosowanie

Baza proszku gaśniczego	Wzór chemiczny	Rodzaj proszku (grupa pożarów do jakich jest stosowany)
Chlorek sodu	$\text{NaCl}$	D
Chlorek potasu	$\text{KCl}$	D
Tetraboran sodu	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	D
Wodorowęglan sodu	$\text{NaHCO}_3$	BC

Wodorowęglan potasu	KHCO <sub>3</sub>	BC
Mocznik + wodorowęglan potasu	NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub> +KHCO <sub>3</sub>	BC
Fosforan monoamonowy + siarczan amonowy	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> + (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	ABC

#### 4.2.1. Skuteczność proszków gaśniczych

Zastosowanie proszków gaśniczych do gaszenia pożarów ciał stałych (zwykle pochodzenia organicznego) tworzących podczas spalania żarzące się węgle jest uzasadnione, gdy istnieje możliwość podania proszku w postaci obłoku do wszystkich powierzchni płonącego materiału. Mechanizm działania proszków w stosunku do pożarów ciał stałych opiera się głównie na izolowaniu paliwa od tlenu z powietrza. Możliwe jest to dzięki tworzeniu szklistej warstwy polimetafosforanów na powierzchni płonącego materiału. W gaszeniu pożarów grupy A działanie inhibicyjne proszku ma mniejsze znaczenie. Potas (K) jest szeroko stosowany w produkcji proszków gaśniczych. Sole, w skład których wchodzi sód (Na), również są powszechnie stosowane do produkcji proszków gaśniczych. Szeroko stosowane jako proszki gaśnicze są węglany, chlorki, siarczany oraz fosforany.

Istotnym parametrem mającym duży wpływ na skuteczność gaśniczą jest granulacja. Im większe jest rozdrobnienie proszku, tym większa jest jego ogólna sumaryczna powierzchnia (powierzchnia właściwa). Większe rozdrobnienie powoduje zwiększenie powierzchni proszku mającej kontakt z płonącym materiałem i wolnymi rodnikami. Ponadto mniejsze ziarna w warunkach pożarowych powinny rozpadać się i odparowywać bardziej intensywnie, co powoduje szybsze uwalnianie substancji wychwytyjących wolne rodniki konieczne do podtrzymywania reakcji spalania. Istnieją jednak przeciwskazania do zbyt silnego rozdrabniania proszków gaśniczych. Podczas gaszenia pożaru zbyt małe ziarna proszku będą porywane przez gorące gazy pożarowe i unoszone poza strefę spalania przez co nie będą one brały udziału w procesie gaszenia. Bardzo małe cząstki proszku nie będą posiadały odpowiedniej energii kinetycznej, aby były w stanie penetrować do wnętrza pożaru (np. podczas podawania pod ciśnieniem gazu napędowego z gaśnicy). Na podstawie prowadzonych badań ustalono, że optymalny skład ziarnowy proszku gaśniczego powinien zawierać się w przedziale: ziarna o wielkości 20÷60 µm powinny stanowić od 60 do 80% wagowych całego proszku. Ze względu na konieczność transportu proszku przewodami, zasięg rzutu strumienia proszku oraz jego zdolności do penetrowania w głąb pożaru wskazana jest obecność frakcji o średnicy ziaren 100÷200 µm (od 10 do 15% wagowych całego proszku).

#### 4.2.2. Stężenia gaśnicze proszków

Masowe stężenie potrzebne do zgaszenia płomienia przez tego typu substancje jest rzędu 1 – 2 kg/m<sup>3</sup>. Stężenia niezbędne do ugaszenia pożaru w przypadku proszków gaśniczych inhibitujących proces spalania są kilkukrotnie mniejsze. W zależności od rodzaju proszki nie przekraczają 0,1 – 0,5 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.2.3. Metody podawania proszków gaśniczych

Skuteczność gaszenia płomieni za pomocą określonego rodzaju zdyspergowanego medium gaśniczego w tym proszku, zależy od tego jak dużą powierzchnią to medium oddziałuje na płomień. Im większa powierzchnia oddziaływania medium tym wyższa skuteczność gaszenia. Istotny zatem jest sposób podawania proszków gaśniczych do strefy spalania. Powszechnym czynnikiem nośnym umożliwiającym aplikację obłoku proszku jest azot. Rozprężanie gazu warunkuje przemieszczanie proszku i tworzenie obłoku środka.

### 4.3. Testy prototypów aktywnego systemu tłumienia wybuchem w przestrzeni otwartej

Stanowisko badawcze aktywnego systemu tłumienia w przestrzeni hemisferycznej o objętości ok. 150m<sup>3</sup> (przestrzeń nieograniczona).

Procedura badawcza:

- przygotuj komorę testową w postaci półwalca i systemy pomiarowe (stelaż rozłożony, pokryty folią, szczyty sklezione z poszyciem i całość na bokach przyciśnięta do gruntu, doczepiony tunel wprowadzający badany gaz, ustawione czujniki ciśnienia w wybranych pozycjach, ustawione źródło zapłonu w postaci układu elektrod, ustawiony wentylator mieszający z zasilaniem wyprowadzonym na zewnątrz),



- oblicz ilość gazu badanego potrzebną do badania i ustal ilość na przepływomierzu i czas napełniania,
- uruchom system pomiarowy,
- przygotuj transformator wysokonapięciowy,
- uruchom system dozowania badanego gazu i wentylator mieszający,
- podłącz źródło zapłonu do elektrod,
- uruchom akwizycję danych,
- uruchom zapłon mieszaniny,
- w przypadku badania skuteczności systemu tłumienia wybuchu zamontuj i uruchom przedmiotowy system w pierwszym kroku.

Namiot o kształcie półsferycznym, składa się ze stelaża zbudowanego z ocynkowanych lub malowanych proszkowo rur grubościennych o średnicy min. 80 mm łączonych śrubami z kształtką z blachy ocynkowanej lub malowanej proszkowo o grubości min. 8 mm. Promień stelaża namiotu nie mniejszy niż 3,0 m. Na rysunku poniżej przedstawiono ogólny schemat składowych sfery.



Rysunek 130 Sfera o objętości 150 m<sup>3</sup>

Pokrycie powinno być wykonane z folii o sumarycznym wymiarze pozwalającym na przykrycie całej powierzchni półsfery. Ilość pokryć nie mniejsza niż 15. Układ podawania gazu palnego ma za zadanie wypełnić objętość sfery gazem palnym do uzyskania stężenia stechiometrycznego. Na układ podawania gazu palnego składa się: kolektor do butli z gazami technicznymi (podłączenie 1 butli z metanem lub 3 butli z wodorem lub 2 butli z LPG), zawór sterowany zdalnie pozwalający na rozpoczęcie procedury napełniania namiotu gazem palnym i przerwania podawania w założonym czasie, min. 6 dysz rozmieszczonych po wewnętrznej stronie namiotu na kształtkach łączących rury stelaża namiotu oraz rurociągów doprowadzających gaz od tychże dysz poprzez rozdzielacz do zaworu. Rurociągi z gazem poprowadzone są po zewnętrznej stronie namiotu na rurach stanowiących stelaż namiotu. Średnica rurociągów nie mniejsza niż 3 mm oraz rurociągu pomiędzy rozdzielaczem a kolektorem nie mniejsza niż 6 mm. Długość rurociągu pomiędzy rozdzielaczem (rozdzielał na 6 rurociągów do każdej dyszy) a kolektorem nie mniejsza niż 40 m. Rozdzielacz na poszczególne dysze winien posiadać możliwość wypięcia każdej dyszy i zaślepienie przyłącza w rozdzielaczu.

Układ zapłonowy. Punkt zapłonu winien być umiejscowiony przy podłożu w środku najmniejszej klatki. Czynnikiem zapłonowym jest pirotechniczna główka zapalczą 5 kJ.

SGSP wykonywała w zadaniu III.3 testy aktywnego systemu tłumienia wybuchu w półsferze o kubaturze około 150 m<sup>3</sup>. Testy aktywnego systemu tłumienia wybuchu przestrzeni zamkniętej (zbiornik badawczy 1 m<sup>3</sup>) prowadzone były przez CNBOP.

Stanowisko zostało wyposażone w stelaż do mocowania butli wysokociśnieniowych z mechanizmem wyzwalania wyładowania proszku gaśniczego do przestrzeni badawczej. Na rysunkach przedstawiono zdjęcia z zamontowanymi butlami gotowymi do eksperymentu.



Rysunek 131 Butla zamontowana na stelażu w namiocie badawczym



Rysunek 132 Butle zamontowane na stelażu w namiocie badawczym

Stanowisko zostało zmontowane na poligonie SGSP w Nowym Dworze Mazowieckim. Całość stanowiska została wyposażona w układ podawania gazu palnego, układ sterowania wyzwalaniem butli oraz układ zapłonowy. Montaż stanowiska przebiegał etapami i został ukończony w czasie 3 tygodni od dostarczenia elementów namiotu. Układ sterowania wyzwalaniem butli był w trakcie eksperymentu kilkakrotnie modyfikowany ze względu na trudności związane z pojawianiem się sygnałów zakłóceń powstających w kilkusetmetrowych przewodach (ze względu na bezpieczeństwo odległości operatorów od stanowiska badawczego były większe niż 200 m).

Metodyka badawcza testowania aktywnego systemu tłumienia wybuchu w półsferze 150 m<sup>3</sup>.

Przedmiotowe stanowisko jest autorskim rozwiązaniem i brakowało dostępnych metodyk badawczych. Metodyka badawcza zawierająca przygotowanie stanowiska, przygotowanie eksperymentu oraz prowadzenie eksperymentu została opracowana i kilkakrotnie modyfikowana. Przyczyny zmian należy upatrywać w problemach napotkanych podczas badań w dużej skali, zachowaniu najbardziej rygorystycznych zasad bezpieczeństwa oraz optymalizacji i ograniczeniu czasowemu trwania badań testowych. Problemy natury technicznej, z jakimi przyszło się borykać wykonawcom podczas badań poligonowych, były związane z:

- trudnościami w montażu bardzo dużej instalacji namiotu,
- zapewnieniem względnie szybkiego i szczelnego pokrycia namiotu membraną, pozwalającą przygotowanie mieszaniny palnej w przestrzeni 150 m<sup>3</sup>,
- sterowaniem układu na duże odległości.

Na potrzeby niniejszego projektu zaproponowano metodykę prowadzenia badań.

Testy prowadzone były przy medium palnym: w pierwszej fazie – metan, drugiej fazie – mieszaninie LPG.

Przygotowanie stanowiska:

- montaż stelaża namiotu,
- montaż dysz i węży rozprowadzających gaz w namiocie,
- sprawdzenie szczelności systemów z gazami,
- montaż układu zapłonowego (bez założonej główki zapalczącej),
- montaż przewodów sygnałowych, zasilających,
- montaż układu pomiaru stężenia w przestrzeni badawczej.

Podłączenie układu sterowania i akwizycji:

- podłączenie układów zasilania,
- ustawienie sprzętu rejestrującego w zakresie widzialnym (również szybkiej kamery),
- sprawdzenie działania poszczególnych układów,
- przygotowanie folii pokryciowej namiotu,
- podłączenie do kolektora butli z wybranym gazem technicznym (metan w pierwszych eksperymentach, a po analizie danych, w dalszej fazie badań lpg),
- założenie główki zapalczącej do układu zapłonowego,
- przykrycie namiotu przygotowaną folią. zaciśnięcie folii pokryciowej i uszczelnienie połączenia przy podłożu folią typu stretch,
- oddalenie się na bezpieczna odległość.

Przeprowadzenie eksperymentu:

- włączenie rejestracji video (również szybkiej kamery),
- włączenie układu pomiaru stężenia gazu w przestrzeni badawczej,
- otwarcie zaworu kolektora z butlami gazów technicznych,
- zamknięcie zaworu kolektora, na podstawie odczytów stężenia i obliczeń ilości gazu potrzebnego do uzyskania założonego stężenia,
- oddalenie się na bezpieczna odległość,
- wyzwolenie zapłonu główki zapalczącej,
- zakończenie rejestracji sygnałów po całkowitym wypaleniu mieszaniny palnej z powietrzem w przestrzeni badawczej.

Zakończenie eksperymentu:

- odłączenie zasilania,
- sprawdzenie w strefie oddziaływania płomieni i fragmentów folii obecności wtórnych źródeł ognia, mogących stanowić z opóźnieniem zagrożenie pożarem,
- odłączenie butli z gazami technicznymi,
- zabezpieczenie układów sterowania i akwizycji danych oraz przewodów sygnałowych i zasilających.

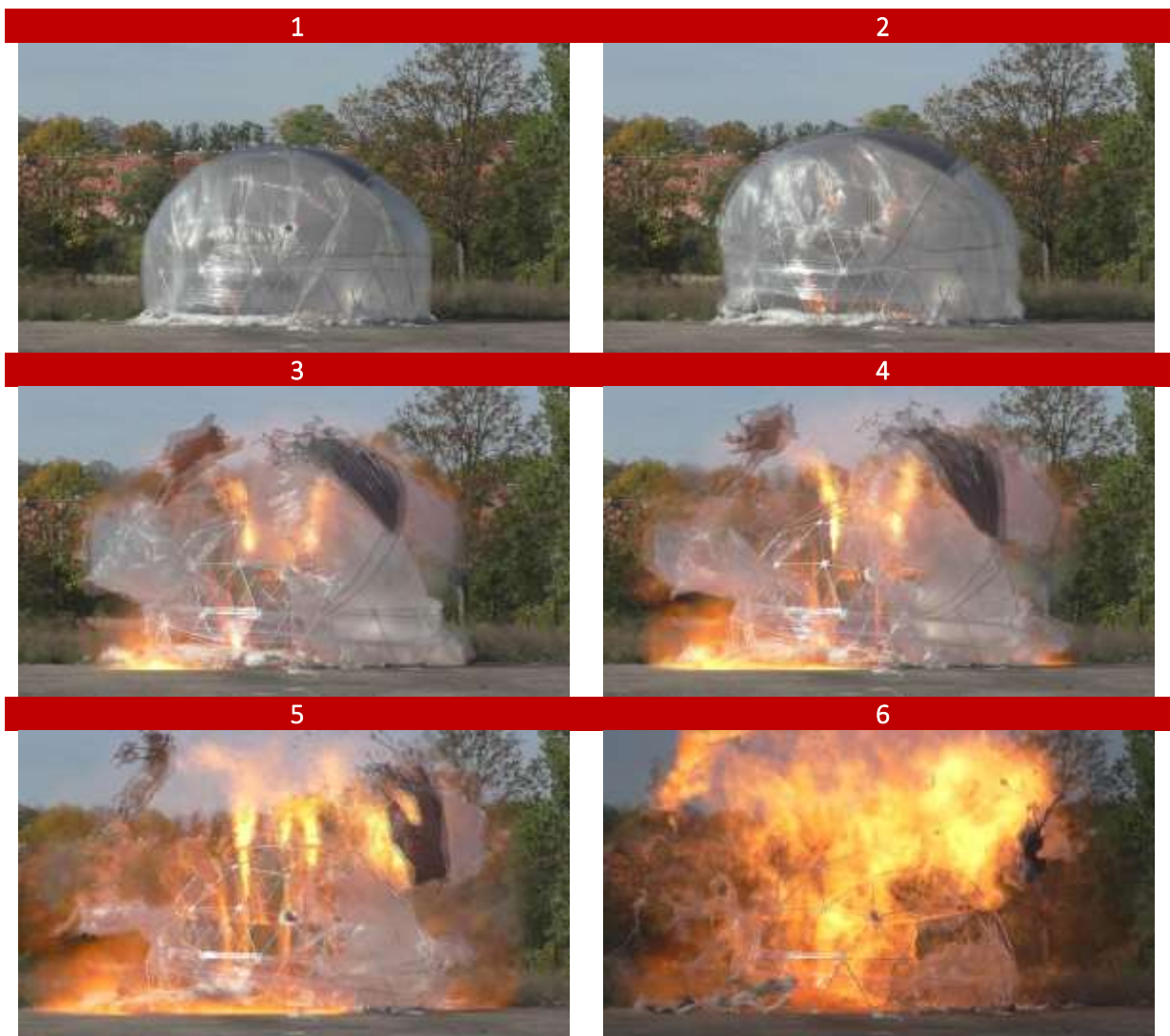
Przygotowanie stanowiska przed powtórny eksperymentem:

- sprawdzenie szczelności systemów z gazami,
- montaż układu zapłonowego (bez założonej główki zapalczącej),
- montaż przewodów sygnałowych, zasilających,
- montaż układu pomiaru stężenia w przestrzeni badawczej,
- podłączenie układu sterowania i akwizycji,
- podłączenie układów zasilania,
- ustawienie sprzętu rejestrującego w zakresie widzialnym (również szybkiej kamery),
- sprawdzenie działania poszczególnych układów,
- przygotowanie folii pokryciowej namiotu,
- podłączenie do kolektora butli z wybranym gazem technicznym (metan w pierwszych eksperymentach, a po analizie danych, w dalszej fazie badań lpg),
- założenie główki zapalczącej do układu zapłonowego,
- przykrycie namiotu przygotowaną folią. zaciśnięcie folii pokryciowej i uszczelnienie połączenia przy podłożu folią typu stretch,
- oddalenie się na bezpieczna odległość.

Wyniki badań poligonowych w dużej skali z testowania aktywnego systemu tłumienia wybuchów w pólśferze o objętości około 150 m<sup>3</sup>

Wyniki badań

W początkowej fazie badania wykonywano z mieszaniną palną metan – powietrze. Po dwóch eksperymentach (16.09.2016 r. i 20.09.2016 r.) bez zapłonu uznano, iż proces ten nie zapewnił wystarczającej szczelności i zmodyfikowano metodę pokrycia stelaża półsfery membraną. Po uzyskaniu szczelnej powłoki półsfery, wykonaniu pomiarów stężenia metanu w przestrzeni badawczej, napotkano problemy z uzyskaniem zapłonu tejże mieszaniny (metan – powietrze). Zaobserwowano wywieranie nacisku na górną część czaszy powłoki i wyraźne unoszenie jej w charakterystycznym dla balonów sposób. Uzyskano stężenie w początkowej fazie przygotowań bliskie stechiometrycznemu. W czasie stabilizacji w przestrzeni badanej, mającej na celu zminimalizować turbulencje, prawdopodobnie następowało unoszenie lżejszego metanu w powietrzu i rozwarstwianie. Nie uzyskano zapłonu mieszaniny (7.10.2016 r.). Powtórzenie eksperymentu trzykrotnie wymusiło zmianę medium palnego. Zdecydowano, iż do dalszych badań wykorzystywana będzie mieszanina propan-butan (LPG). W roku 2016 wykonano 4 eksperymenty. Pierwsze 3 z mieszaniną metan – powietrze oraz ostatni w roku 2016, a 4 w kolejności z mieszaniną LPG – powietrze. Zapłon mieszaniny uzyskano dopiero w 4 eksperymencie (14.10.2016 r.). Na poniższym rysunku przedstawiono sekwencję klatek filmowych obrazujących przebieg rozprzestrzeniania się strefy spalania po zapłonie mieszaniny LPG – powietrze (14.10.2016 r.).



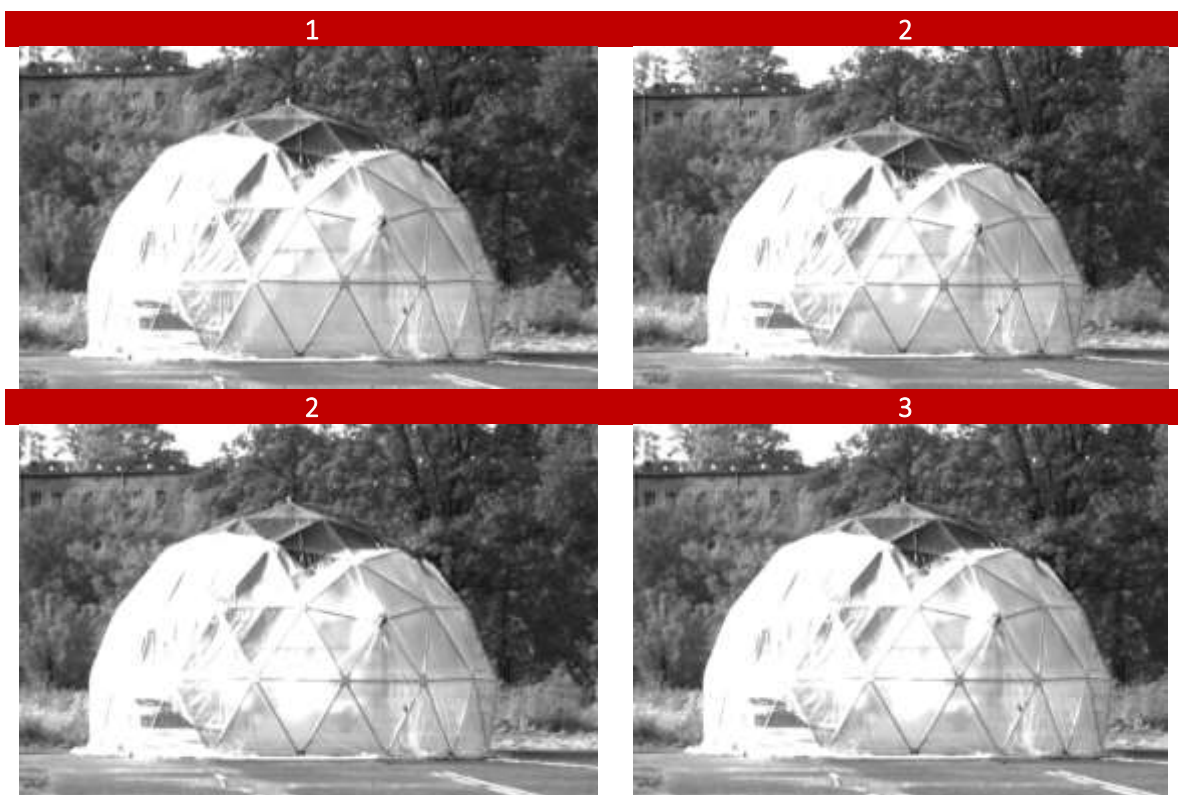
Rysunek 133 Sekwencja klatek filmowych obrazujących uruchomienie bodźca zapłonowego i rozprzestrzenianie się strefy spalania po zapłonie mieszaniny LPG – powietrze (14.10.2016 r.)

Po przerwie zimowej przystąpiono do dalszych eksperymentów. 5-ty eksperyment wykonano w dniu 12 kwietnia 2017 roku. Badanie wykonano z użyciem LPG oraz bodźcem zapłonowym w postaci główki zapalczącej 5 kJ. Uzyskano zapłon mieszaniny LPG – powietrze.

Po analizie materiału filmowego z szybkiej kamery następny eksperyment zaplanowano z użyciem aktywnego systemu tłumienia wybuchu. Użyto zbiorników o objętości 5 dm<sup>3</sup> z 1,2 dm<sup>3</sup> proszku gaśniczego i ciśnieniu azotu w butlach 35 bar. Eksperyment 6 przeprowadzono w dniu 11.05.2017 r.

W dniu 18.05.2017 r. i 6.06.2017 r. przeprowadzono 7 i 8 eksperyment. Jak w poprzedzających eksperymentach użyto jako substancji palnej LPG i wprowadzono ilość odpowiadającą stężeniu stechiometrycznemu. Użyto zbiorników o objętości 5 dm<sup>3</sup> z 2 dm<sup>3</sup> proszku gaśniczego i ciśnieniu azotu w butlach 40 bar.

Problemy wynikające z zakłóceń pojawiających się w bardzo długich przewodach sterujących wymusiły przerwę w badaniach do czasu wyeliminowania niepożądanych zjawisk generujących sygnały wystarczające do wyzwolenia układów zapłonowych i aktywacji systemu tłumienia wybuchu. Współkonsorcjant ANKO zaprojektował i wykonał nowy układ sterujący. Po wykonaniu i dostarczeniu zmodyfikowanego układu sterującego wykonano eksperyment 9 i 10, odpowiednio w dniach 5 i 11 września 2017 r. Użyto zbiorników o objętości 20 dm<sup>3</sup> z 3,7 dm<sup>3</sup> proszku gaśniczego i ciśnieniu azotu w butlach 40 bar. Na rysunku poniżej przedstawiono sekwencje klatek filmowych z przeprowadzonych badań.



Rysunek 134 Sekwencja klatek filmowych obrazujących uruchomienie bodźca zapłonowego, aktywnego systemu tłumienia wybuchu i rozprzestrzenianie się strefy spalania po zapłonie mieszaniny LPG – powietrze (11.09.2017 r.).

#### 4.4. Wyniki badań aktywnego systemu gaśniczego w sferze o obj. 150m<sup>3</sup>

W zadaniu realizowanym przez SGSP przeanalizowano wpływ medium tłumiącego na przerywanie strefy spalania. Omówiono rodzaje proszków gaśniczych, mechanizm działania tychże proszków oraz sposób podawania do strefy spalania. Scharakteryzowano wpływ stopnia rozdrobnienia na skuteczność gaśniczą. Dokonano analizy ilości

stężenia proszku gaśniczego na skuteczność gaśniczą. Na podstawie otrzymanych badań analitycznych wybrano proszek gaśniczy (fosforan i siarczan amonowy).

Analiza otrzymanych wyników w przestrzeni badanej 150 m<sup>3</sup> wskazuje, iż proces wykrycia i wyładowania proszku gaśniczego do otwartej przestrzeni jest niewystarczająco szybki. O ile wykrycie wzrostu ciśnienia i/lub płomienia w zbiorniku zamkniętym następuje szybko i umożliwia wyładowanie proszku w kierunku strefy wybuchu pyłu (badania w zbiorniku 1 m<sup>3</sup> wykonane w CNBOP w ramach projektu), to wykrycie i stłumienie wybuchu gazu, ze względu na większą szybkość propagacji wymaga zwiększenia odległości z jakiej wykrywany będzie wybuch lub zwiększenia ciśnienia gazu nośnego w aktywnym systemie tłumienia wybuchu. Badania pokazały, iż zastosowany sposób dyspersji jest skuteczny i równomiernie wypełnia przestrzeń proszkiem gaśniczym. Również nowatorskie rozwiązanie zamka uruchamiającego aktywny system tłumienia wybuchów sprawdziło się bardzo dobrze przy wielokrotnym zadziałaniu systemu. Po oględzinach poszczególnych elementów składowych żaden z elementów poddanych dużym obciążeniom nie został odkształcony i nie uwidoczniły się zmiany w wytrzymałości.

#### 4.5. Testy prototypu aktywnego systemu tłumienia wybuchów w zbiorniku o poj. 1m<sup>3</sup>

W ramach testów przeprowadzono badania wyładowania gaśnic HRD w zbiorniku badawczym o poj. 1 m<sup>3</sup> wewnątrz którego można wytworzyć powtarzalną atmosferę wybuchową powietrzno - pyłową. Wstępnie wykonano ocenę prędkości wyładowania środka gaśniczego. Proces ten został zarejestrowany za pomocą szybkiej kamery (f=1000 klatek/s). Poklatkowe zdjęcia aplikacji przedstawiają poniższe rysunki. W pierwszej kolejności badaniom poddano układ bez zastosowania dyszy. Ciśnienie robocze w gaśnicy ustalono na wartość 60 bar, a masę proszku gaśniczego 1kg. Fazy wypływu mieszaniny proszku z gazem inertnym (azot) widoczne są poniżej. Pierwsza sekwencja 4 zdjęć przedstawia kolejno (od góry z lewej strony) czasy – 25 ms, 30 ms, 40 ms, 50 ms. Następna sekwencja fotografii (od góry z prawej strony) czasy 60 ms, 70 ms, 80 ms, 90 ms, 100 ms.

Określono, że proszek gaśniczy w 90% masy wyładowywany jest w czasie poniżej 70 ms. Najbardziej intensywny wyrzut pyłu następuje około 30-40 milisekund. Po 70 ms widoczna na zdjęciu chmura porusza się i rozszerza, ale wypływ proszku jest nieznaczny. Niewielka część proszku gaśniczego pozostaje w gaśnicy i w dyszy po zakończeniu wypływu. Zgodnie z obliczeniami do czasu 75 ms uwolnieniu ulega 96% masy proszku gaśniczego ze zbiornika o poj. 5 l, a 92% ze zbiornika o poj. 20 l.

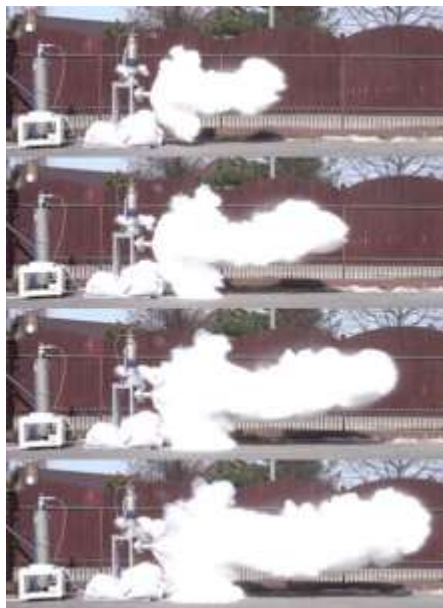


Rysunek 135 Rozproszenie strugi proszku gaśniczego bez dyszy (od góry) 25, 30, 40, 50 ms

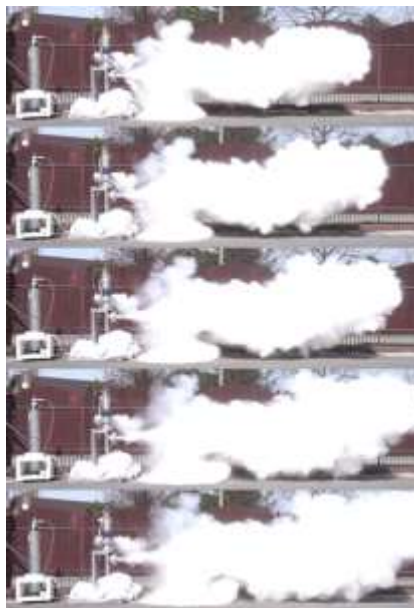


Rysunek 136 Rozproszenie strugi proszku gaśniczego bez dyszy (od góry) 60, 70, 80, 90, 100 ms

W drugim etapie wykonano badania z użyciem dyszy/dyfuzyora umieszczonej na zakończeniu wylotu z gaśnicy, której celem było rozproszenie proszku gaśniczego, przy zachowaniu warunku jak dla próby bez dyszy. Poniżej przedstawiono kształt chmury dla czasów jak wyżej.



Rysunek 137 Rozproszenie strugi proszku gaśniczego z dyszą (od góry) 25, 30, 40, 50 ms



Rysunek 138 Rozproszenie strugi proszku gaśniczego z dyszą (od góry) 60, 70, 80, 90, 100 ms

Zaobserwowano, że praktycznie cała masa proszku gaśniczego wyładowywana jest w czasie poniżej 80 ms. Porównując oba przypadki (z zastosowaną dyszą i bez niej) należy zauważyć, że zastosowanie dyszy dyspersyjnej zwalnia wyrzut proszku gaśniczego o ok. 10 ms. Jednakże w przypadku obecności dyszy daje się zaobserwować ukierunkowanie strumienia proszku na kształt pierścienia wokół dyszy. Wobec czego można wnioskować, że zastosowanie dyszy pozwala na uzyskanie bardziej równomiernego rozkładu proszku w chronionej przestrzeni.

#### 4.5.1. Badania skuteczności gaśniczej systemu HRD

Badania systemu HRD z wykorzystaniem zbiornika o objętości  $1\text{m}^3$  zakładały przeprowadzenie następujących działań:

- I. W zbiorniku o poj.  $1\text{m}^3$  doprowadzono do wybuchu mieszaniny pyłu i powietrza o znanych wartościach  $P_{\text{max}}$  i  $(dp/dt)_{\text{max}}$ .
- II. Rejestrację ciśnienia wybuchu z udziałem układu aktywnego tłumienia.
- III. Analizę działania aktywnego systemu tłumienia wybuchu na podstawie porównania krzywych ciśnienia  $p(t)$  wybuchu nietłumionego i tłumionego.
- IV. Graficzna prezentacja krzywych ciśnienia  $p(t)$  wybuchu nietłumionego i tłumionego na jednym wykresie.

Przed przystąpieniem do oceny skuteczności systemu HRD wyznaczono parametry wybuchowości dla 2 pyłów, tj. lycopodium i skrobia ziemniaczana. Uzyskano następujące wyniki:

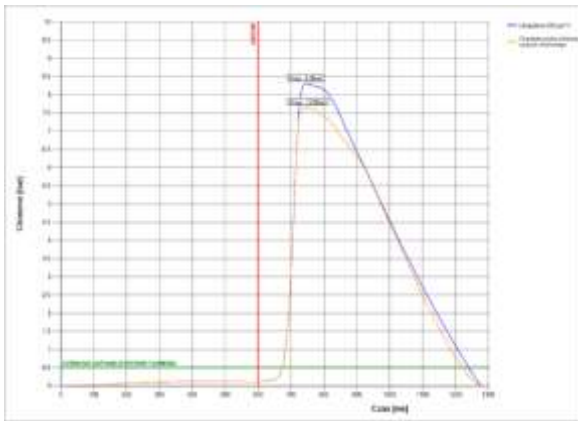
- $P_{\text{ex}} = 8,3$  [bar] i  $(dp/dt)_{\text{ex}} = 211,6$  [bar/s] – lycopodium -  $250$  [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]
- $P_{\text{ex}} = 7,74$  [bar] i  $(dp/dt)_{\text{ex}} = 196,67$  [bar/s] – lycopodium -  $500$  [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]
- $P_{\text{ex}} = 5,87$  [bar] i  $(dp/dt)_{\text{ex}} = 26,73$  [bar/s] – skrobia ziemniaczana -  $750$  [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]
- $P_{\text{ex}} = 7,4$  [bar] i  $(dp/dt)_{\text{ex}} = 59,4$  [bar/s] – skrobia ziemniaczana -  $1500$  [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]

Testy prowadzono każdorazowo przy zastosowaniu niżej wymienionych warunków:

- masa proszku gaśniczego w butli - 1 kg,
- ciśnienie napełnienia gazem inertnym – 60 bar,
- czas opóźnienia zapłonu – 600 ms,
- ciśnienie aktywacji systemu HRD – 0,5 bar,
- zapłon o energii 5 kJ,

#### Tłumienie wybuchu pyłu lycopodium w stężeniu 250 g/m<sup>3</sup>

Badaniu poddano mieszaninę lycopodium z powietrzem – stężenie pyłu 250 g/m<sup>3</sup>. Takie parametry zapewniły zredukowanie ciśnienia z  $P_{ex}=8,3$  bar do  $P_{red}=7,65$  bar. Po przekroczeniu ciśnienia aktywacji = 0,5 bar ( $t = \sim 670$  ms) uruchamiana jest gaśnica HRD. Następuje wyładowanie proszku gaśniczego do przestrzeni zbiornika 1m<sup>3</sup>. W ciągu kolejnych 30-40 ms duża część proszku zostaje wprowadzona do zbiornika i zaczyna tworzyć mieszaninę gaszącą wybuch. W tej fazie wybuch pyłu rozwija się bardzo szybko. Po 30-40 ms osiąga chwilową wartość ciśnienia 4-4,5 bar, a prędkość wzrostu ciśnienia ( $dp/dt$ ) osiąga wartość maksymalną ( $>210$  bar/s). Wybuch rozwija się bardzo szybko, a objętość zbiornika jest niewielka, co nie pozwala na podanie proszku gaśniczego odpowiednio wcześnie, aby efekt gaszenia był silniejszy. Jak widać na prezentowanym wykresie ciśnienie zredukowane (linia koloru czerwonego) ma dużą wartość, bliską maksymalnemu ciśnieniu wybuchu (linia koloru niebieskiego).

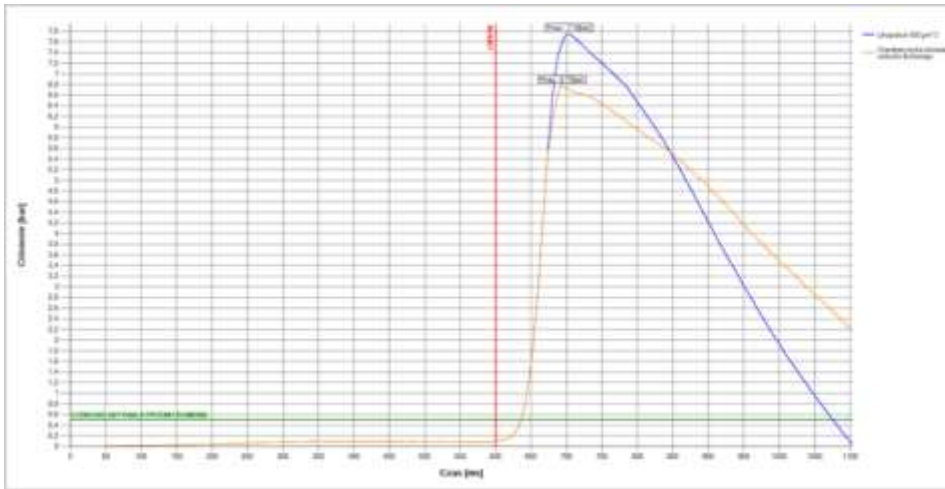


Rysunek 139 Redukcja ciśnienia wybuchu butlą HRD w stężeniu pyłu palnego lycopodium 250 g/m<sup>3</sup>

#### Tłumienie wybuchu pyłu lycopodium w stężeniu 500 g/m<sup>3</sup>

Badaniu poddano mieszaninę lycopodium z powietrzem – stężenie pyłu 500 g/m<sup>3</sup>. Takie parametry zapewniły zredukowanie ciśnienia z  $P_{ex}=7,74$  bar do  $P_{red}=6,77$  bar. Po przekroczeniu ciśnienia aktywacji = 0,5 bar ( $t = \sim 640$  ms) uruchamiana jest gaśnica HDR. Następuje wyładowanie proszku gaśniczego do przestrzeni zbiornika 1m<sup>3</sup>. W ciągu kolejnych 30-40 ms duża część proszku zostaje wprowadzona do zbiornika i zaczyna tworzyć mieszaninę gaszącą wybuch. W tej fazie wybuch pyłu rozwija się bardzo szybko. Po 30-40 ms osiąga chwilową wartość ciśnienia 4-4,5 bar, a prędkość wzrostu ciśnienia ( $dp/dt$ ) osiąga wartość maksymalną ( $\sim 200$  bar/s). Podobnie jak w przypadku koncentracji 250g/m<sup>3</sup> wybuch rozwija się bardzo szybko. Objętość zbiornika jest niewielka, a ciśnienie aktywacji (0,5 bar) jest wysokie, co nie pozwala na podanie proszku gaśniczego odpowiednio wcześnie, aby efekt gaszenia był silniejszy. Jak widać na prezentowanym wykresie ciśnienie zredukowane (linia koloru czerwonego) ma dużą wartość, bliską maksymalnemu ciśnieniu wybuchu (linia koloru niebieskiego).

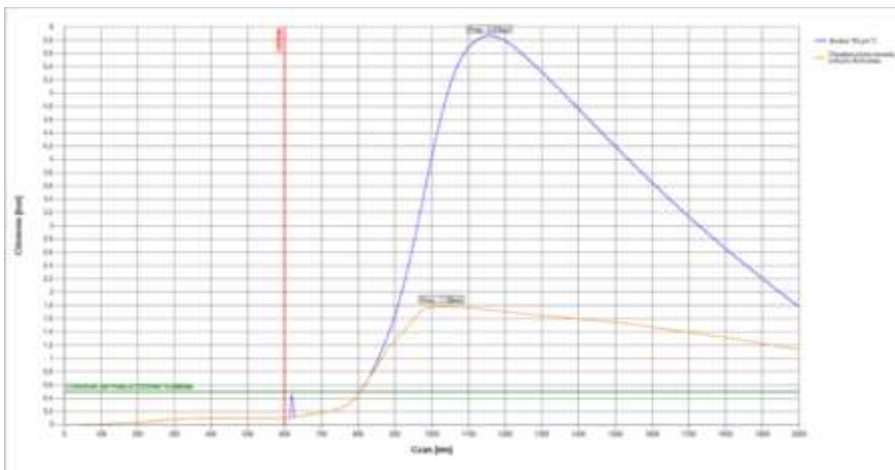




Rysunek 140 Redukcja ciśnienia wybuchu butlą HRD w stężeniu pyłu palnego lycopodium 500 g/m<sup>3</sup>

### Tłumienie wybuchu pyłu skrobi w stężeniu 750 g/m<sup>3</sup>

Badaniu poddano mieszaninę pyłu skrobi z powietrzem – stężenie pyłu 750 g/m<sup>3</sup>. Takie parametry zapewniły zredukowanie ciśnienia z  $P_{ex}=5,87$  bar do  $P_{red}=1,78$  bar. Po przekroczeniu ciśnienia aktywacji = 0,5 bar ( $t = \sim 810$  ms) uruchamiana jest gaśnica HRD. Następuje wyładowanie proszku gaśniczego do przestrzeni zbiornika 1m<sup>3</sup>. W ciągu kolejnych 30-40 ms duża część proszku zostaje wprowadzona do zbiornika i zaczyna tworzyć mieszaninę gaszącą wybuch. W tej fazie wybuch pyłu rozwija się bardzo wolno w porównaniu do likopodium. Po 30-40 ms osiąga chwilową wartość ciśnienia 1 bar, a prędkość wzrostu ciśnienia ( $dp/dt$ ) nie osiąga jeszcze wartości maksymalnej ( $\sim 27$  bar/s). Wybuch rozwija się z niską prędkością. Objętość zbiornika jest niewielka, ale przy tej prędkości ( $dp/dt$ ) pozwala to na podanie proszku gaśniczego odpowiednio wcześnie, aby efekt gaszenia był bardzo silny. Jak widać na prezentowanym wykresie ciśnienie zredukowane ma niską wartość (1,78 bar) w porównaniu do maksymalnego ciśnienia wybuchu (5,87 bar).

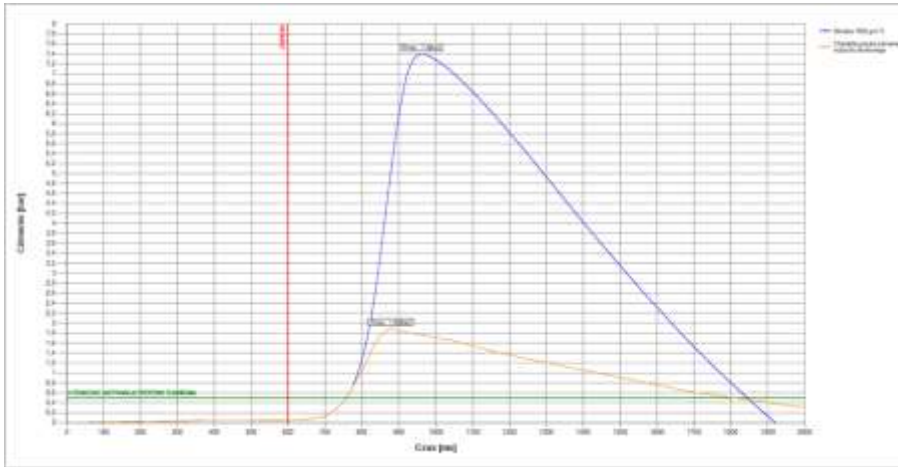


Rysunek 141 Redukcja ciśnienia wybuchu butlą HRD w stężeniu pyłu palnego skrobi 750 g/m<sup>3</sup>

### Tłumienie wybuchu pyłu skrobi w stężeniu 1500 g/m<sup>3</sup>

Badaniu poddano mieszaninę pyłu skrobi z powietrzem – stężenie pyłu 1500 g/m<sup>3</sup>. Takie parametry zapewniły zredukowanie ciśnienia z  $P_{ex}=7,4$  bar do  $P_{red}=1,88$  bar. Po przekroczeniu ciśnienia aktywacji = 0,5 bar ( $t = \sim 750$  ms) uruchamiana jest gaśnica HDR. Następuje wyładowanie proszku gaśniczego do przestrzeni zbiornika 1m<sup>3</sup>. W ciągu kolejnych 30-40 ms duża część proszku zostaje wprowadzona do zbiornika i zaczyna tworzyć mieszaninę gaszącą wybuch. W tej fazie wybuch pyłu rozwija się bardzo wolno w porównaniu do likopodium i szybciej w niż przy

koncentracji skrobi  $750\text{g/m}^3$ . Po czasie 30-40 ms ciśnienie osiąga chwilową wartość ciśnienia  $\sim 1,2$  bar, a prędkość wzrostu ciśnienia ( $dp/dt$ ) nie osiąga jeszcze wartości maksymalnej ( $\sim 59$  bar/s). Wybuch rozwija się bardzo wolno. Objętość zbiornika jest niewielka, ale przy tej prędkości ( $dp/dt$ ) pozwala na podanie proszku gaśniczego odpowiednio wcześniej, aby efekt gaszenia był bardzo silny. Jak widać na prezentowanym wykresie ciśnienie zredukowane ma bardzo małą wartość (1,88 bar) w porównaniu do maksymalnego ciśnienia wybuchu (7,4 bar).



Rysunek 142 Redukcja ciśnienia wybuchu butlą HRD w stężeniu pyłu palnego skrobi  $1500\text{g/m}^3$

### Podsumowanie i wnioski

Tłumienie wybuchu przy pomocy systemu gaśniczego HRD polega na zatrzymaniu procesu spalania w obszarze chronionym. Skuteczny system tłumiący powinien przerwać rozwijający się wybuch tak, aby nie doszło do uszkodzenia zabezpieczanego urządzenia. Zaproponowane badania skuteczności działania systemu HRD polegają na wyznaczeniu parametrów wybuchowości, tj.  $P_{\max}$  i  $(dp/dt)_{\max}$  określonego pyłu, a następnie powtórzenia badań z zastosowaniem gaszenia.

Z uwagi na ograniczoną objętość zastosowanej komory badawczej ( $1\text{m}^3$ ) dalsze prace nad oceną skuteczności tłumienia wybuchów przy pomocy systemu aktywnego należy prowadzić przy stosowaniu niżej wymienionych warunków:

- tworzyć mieszaninę pyłowo – powietrzną z pyłów o niskiej wartości  $K_{st}$ ,
- zastosować różne położenia źródła zapłonu,
- oznaczać skuteczność gaśniczą dla stałych parametrów wybuchowych określonego pyłu w funkcji ciśnienia gazu inertnego oraz masy proszku gaśniczego,
- prowadzić działania zmierzające do obniżenia progu zadziałania progu detekcji poprzez wyeliminowanie wpływu skoku ciśnienia tworzącego się w momencie wtrysku pyłu do komory badawczej.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zaprezentowany system HRD charakteryzuje się właściwym poziomem skuteczności gaśniczej w przypadku pyłów o  $K_{st} \leq 100\text{bar} \cdot \text{m/s}$ . Dla pyłu skrobi ziemniaczanej mimo wzrostu ww. wartości system charakteryzuje się stałą skutecznością w kwestii redukcji ciśnienia do wartości  $P_{\text{red}} < 2$  bar, co można uznać za zadowalający efekt.

## 5. Opracowanie modeli matematycznych, kodu numerycznego do obliczeń wybuchów deflagacyjnych oraz detonacyjnych

Obliczenia te zapewnią dostarczenie danych do doskonalenia kodu numerycznego i wypracowania jego ostatecznej formy.

### 5.1. Implementacja i walidacja kodu do symulacji numerycznych detonacji wodoru, metanu i propanu w rurze

#### 5.1.1. Wprowadzenie

Celem niniejszej pracy była walidacja kodu do symulacji detonacji stworzonego na bazie solvera ddtFoam i biblioteki OpenFoam. Porównane zostały takie parametry detonacji jak profile ciśnienia i prędkości propagacji fali detonacyjnej. Wymieniony kod pozwala na obliczenia detonacji w geometrii o kształcie 9 metrowej rury o średnicy 17 cm z użyciem następujących mieszanin: wodór-tlen, wodór-powietrze, metan-tlen, propan-tlen i propan-powietrze. Poniższy raport ukazuje jakie wyniki uzyskano i jak mają się one do eksperymentów oraz teoretycznych wartości.

#### 5.1.2. Solver

Do obliczeń numerycznych wykorzystano opensource'owy solver ddtFoam [2] do biblioteki OpenFOAM [8], który następnie zmodyfikowano rozszerzając jego możliwości obliczeniowe o mieszaniny ww. gazów. Solver ddtFoam wykorzystuje równania Naviera-Stokesa dla przepływu ściśliwego i nieustalonego. Do obliczeń członów konwekcyjnych używany jest schemat HLLC [6], który charakteryzuje się dobrym odwzorowywaniem nieciągłości w przepływach. Proces spalania modelowany jest za pomocą równania na parametr postępu spalania  $c$ . Dla  $c = 1$  mieszanina jest całkowicie spalona, a dla  $c = 0$  niespalona. Równanie prezentuje się następująco:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{c}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{c}u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}D_{eff}\frac{\partial\tilde{c}}{\partial x_j}) + \bar{\omega}_{c,def} + \bar{\omega}_{c,ign}$$

Kluczowym elementem ww. równania są człony źródłowe. Pierwszy z nich odpowiada za spalanie deflagacyjne:

$$\bar{\omega}_{c,def} = \bar{\rho}_u s_T |\nabla\tilde{c}| G$$
$$s_T = \xi s_L$$

Współczynnik  $0 < G < 1$  uwzględnia tłumienie płomienia, a  $s_T$  to szybkość płomienia turbulentnego, wyliczona mnożąc szybkość płomienia laminarnego  $s_L$  przez współczynnik zaburzenia płomienia  $\xi$ . Drugim członem źródłowym jest człon odpowiadający za samozapłon mieszaniny w czole fali uderzeniowej w przypadku wystąpienia detonacji:

$$\bar{\omega}_{c,ign} = \alpha \frac{1-\tilde{c}}{\Delta t} H(\tilde{\tau}_{high} - 1) + (1-\alpha) \frac{1-\tilde{c}}{\Delta t} H(\tilde{\tau}_{low} - 1)$$

Gdzie  $H(x)$  to funkcja Heaviside:

$$H(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$$

Współczynnik  $\alpha$  odpowiada za model pod-siatkowy, który ma zapobiegać sytuacjom, gdzie mieszanina w komórce została uznana za całkowicie przereagowaną, a fala uderzeniowa nie zdążyła jeszcze przez nią przejść.

Zastosowanie takiego modelu zmniejsza błędy wynikające z dyskretyzacji obszaru obliczeniowego.  $\alpha$  wyraża się wzorem:

$$\alpha = \frac{\bar{p} - p_{low}}{p_{high} - p_{low}}$$

$p$  jest średnim ciśnieniem panującym w całej komórce obliczeniowej,  $p_{low}$  najniższym ciśnieniem w okolicy tej komórki, a  $p_{high}$  najwyższym. Modelowanie występowania samozapłonu sprowadza się do prostego równania na współczynnik samozapłonu:

$$\tau = \frac{t}{t_{ign}}$$

Jeśli mierzony czas  $t$  równa się z czasem opóźnienia zapłonu  $t_{ign}$  następuje samozapłon mieszaniny. Na potrzeby wymienionego modelu pod-siatkowego wyprowadzone zostały parametry

$$\tilde{\tau}_{low} \text{ oraz } \tilde{\tau}_{high}$$

wynikające z podziału komórki obliczeniowej na strefę wysokiego i niskiego ciśnienia. Równania transportu opisujące te dwa parametry prezentują się jak poniżej:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{p}\tilde{\tau}_{low}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{p}\tilde{\tau}_{low}\tilde{u}_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{p}D_{eff}\frac{\partial\tilde{\tau}_{low}}{\partial x_j}) + \frac{\bar{p}}{t_{ign,low}} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\bar{p}\tilde{\tau}_{high}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{p}\tilde{\tau}_{high}\tilde{u}_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{p}D_{eff}\frac{\partial\tilde{\tau}_{high}}{\partial x_j}) + \frac{\bar{p}}{t_{ign,high}} \end{aligned}$$

Zarówno czasy opóźnień zapłonu jak i stężenia reagentów wyliczone zostały z góry za pomocą bibliotek Cantera [9] i SDToolbox [12]. Wartości te zebrano w tablice do interpolacji, aby skrócić czas potrzebny na symulacje do minimum. Każda mieszanina wymagała stworzenia osobnych tablic. Do obliczeń wykorzystano następujące mechanizmy:

- wodór-powietrze: mechanizm O Connaire [1]
- wodór-tlen: mechanizm h2o2 highT [12]
- metan-tlen: mechanizm gri30 highT [11, 12]
- propan-tlen i propan-powietrze: mechanizm Wang highT [10, 12]

W celu zaimplementowania nowych mieszanin w solverze ddtFoam dobrano również empiryczne wzory na prędkość płomienia laminarnego. Formuła dla mieszanin z wodorem jako paliwem zaimplementowana była domyślnie i bazuje na pracy [5] (korelacja Etnner). Wyrażenia dla mieszanin z paliwami w postaci metanu i propanu dobrano zgodnie z publikacją [3] (korelacje metanu i propanu). Zaimplementowano również korelacje na współczynnik wyrównania temperatury i lepkość dynamiczna w zależności od zastosowanego paliwa.

### 5.1.3. Model obliczeniowy

Symulacje testowe przeprowadzane były na siatce obliczeniowej odpowiadającej rurze detonacyjnej z eksperymentów. Była to dwuwymiarowa domena o kształcie prostokąta. Powstała siatka składała się z 382 500 komórek typu hexahedra oraz była strukturalna i ortogonalna. By uwzględnić turbulencje użyto modelu LES k-equationeddy-viscosity model [7].

### 5.1.4. Literatura

[1] Connaire M. O., Curran, H J., Simmie, J. M., Pitz, W. J. and Westbrook, C.K., A Comprehensive Modeling Study of Hydrogen Oxidation, International Journal of Chemical Kinetics, 2004

- [2] Ettner F., Vollmer K. G., Sattelmayer T., Numerical Simulation of the Deflagration-to-Detonation Transition in Inhomogeneous Mixtures, Technische Universität München, Garching, 2014
- [3] Gülder O.L., SAE Technical Paper, SAE 841000, West Coast International Meeting & Exposition, San Diego, CA, 1984
- [4] Kao S., Sheperd J. E., Numerical Solution Methods for Control Volume Explosions and ZND Detonation Structure California Institute of Technology, Pasadena, 2004
- [5] Konnov A. A., Remaining uncertainties in the kinetic mechanism of hydrogen combustion, Combustion and Flame, vol. 152, no. 4, pp. 507–528, 2008
- [6] Toro E. F., Spruce M., Speares W., Restoration of the contact surface in the HLLRiemann solver, Cranfield Institute of Technology, Cranfield, 1993
- [7] Wilcox D. C., Turbulence Modelling for CFD, DCW Industries, La Canada Flintridge, 2006
- [8] OpenFoam. The Open Source CFD Toolbox. User Guide., Version 2.1.1, 2012
- [9] <http://www.cantera.org/docs/sphinx/html/index.html#documentation>, strona internetowa, dostęp 19.06.2016
- [10] <http://ignis.usc.edu/Mechanisms/C4H6/c4h6.html>, strona internetowa, dostęp 19.06.2016
- [11] [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech), strona internetowa, dostęp 19.06.2016
- [12] [http://shepherd.caltech.edu/EDL/public/cantera/html/SD\\_Toolbox/](http://shepherd.caltech.edu/EDL/public/cantera/html/SD_Toolbox/), strona internetowa, dostęp 19.06.2016

## 5.2. Technologia oraz architektura

### 5.2.1. Technologia

Technologia Java to podstawa projektowania niemal każdego rodzaju aplikacji sieciowej — stanowi ogólnosięwiatowy standard wykorzystywany przy tworzeniu aplikacji dla urządzeń mobilnych, aplikacji wbudowywanych, gier, zawartości i treści internetowych oraz oprogramowania dla przedsiębiorstw. Społeczność ponad 9 milionów oddanych programistów przyczynia się do sprawnego tworzenia, implementacji oraz użytkowania aplikacji i usług.

### 5.2.2. Środowisko programistyczne

Program jest pisany oraz kompilowany w środowisku Eclipse. Eclipse jest darmową platformą napisaną w Javie. Dzięki zastosowaniu technologii Java, Eclipse dostępne jest dla wszystkich platform posiadających własną interpretację wirtualnej maszyny Javy, np. Linux, Windows, Solaris, OSx, QNX itp. Przy wykorzystaniu odpowiednich wtyczek, Eclipse można zastosować do innych języków dzięki czemu jest elastyczny. Specjalna licencja EPL sprawia, że każdy może wpływać na rozwój Eclipse. Pierwsza wersja Eclipse 1.0 miała swoją premierę w listopadzie 2001. Wersja 3.0 była już stosowana powszechnie przez środowisko programistyczne zarówno amatorskie jak i profesjonalne. Projekt stworzony przez firmę IBM, obecnie współpracują nad nim m.in. takie przedsiębiorstwa jak IBM, Oracle czy Intel. IBM zainwestował \$40 000 000 w prace nad Eclipse.

### 5.2.3. Wykorzystane biblioteki SWING

Główna biblioteka w Javie **do budowania GUI**. Komponenty Swing są rysowane od początku - nie korzysta ona z natywnych elementów. Dzięki temu program będzie wyglądał tak samo na wszystkich platformach, na których będzie uruchamiany. Biblioteka zakłada komponentowe podejście do budowy interfejsu użytkownika. To znaczy, że GUI składa się z niewielkich cegiełek: na szczycie będzie ramka (**JFrame**), do której dodajemy panele (**JPanel**), lub komponenty (dziedziczące po klasie **JComponent**). Dostępnych jest ogromna liczba składników takich jak przyciski, etykiety, pola tekstowe.

### 5.2.4. Architektura okien

Prawie wszystkie komponenty Swingu są komponentami lekkimi, co oznacza m.in., że: mają taki sam wygląd niezależny od platformy systemowej. W programie wykorzystano styl:

```
javax.swing.plaf.nimbus.NimbusLookAndFeel
```

Obsługa zdarzeń

W celu wywołania żadanego skutku do komponentów GUI jest dołączony kod, który jest wykonywany w chwili zajścia jednego z dotyczących ich zdarzeń. Przykładowo przycisk może reagować na kliknięcie lub najechanie myszką, a pole tekstowe na wprowadzenie tekstu. Kod obsługi zdarzenia nie jest umieszczony w klasach reprezentujących komponenty, aby uniknąć sprzężenia z klasami programu. Komponentom przekazuje się do zapamiętania obiekty implementujące specjalny interfejs. Gdy zdarzenie zachodzi komponent wywołuje odpowiednie metody zapamiętanych obiektów. Przyciski posiadają metodę `addActionListener(ActionListener)` przy pomocy, której można im przekazywać do zapamiętania obiekty implementujące interfejs `ActionListener`. W reakcji na kliknięcie przyciski wywołują metodę `actionPerformed(ActionEvent)` na wszystkich aktualnie pamiętanych obiektach. Metoda `removeActionListener(ActionListener)` pozwala usunąć jeden z uprzednio zapamiętanych obiektów. Takie rozwiązanie charakteryzuje się bardzo dużą elastycznością i jest znane jako wzorzec Obserwator (*ang. Observer*), Wydawca-Prenumeratorka (*ang. Publish-Subscribe*) oraz Delegowanie obsługi zdarzeń (*ang. Delegation Event Model*).

Pozostałe biblioteki:

- `java.net.URL`
- `java.util.Hashtable`
- `java.beans.XMLDecoder`, `XMLEncoder`
- `java.io.BufferedInputStream`
- `java.io.File`, `FileInputStream`, `FileOutputStream`
- `org.apache.commons.io.FileUtils`

#### 5.2.5. JFreeChart

Biblioteka wykorzystana w programie do budowania wykresów.

#### 5.2.6. Model współbieżności

W programie został wykorzystany model oraz technologia współbieżności. Program składa się z wielu przepływów sterowania dzięki czemu możemy wykonywać wiele czynności jednocześnie. Każdy wątek ma początek, sekwencje instrukcji i koniec. Wątek nie jest niezależnym programem, jest wykonywany jako część programu. W programie wiele wątków może być wykonywanych jednocześnie i każdy z nich może wykonywać w tym samym czasie odmienne zadania (*ang. tasks*).

#### 5.2.7. Podsumowanie

Program IntexSoft przedstawia oprogramowanie umożliwiające prowadzenie obliczeń numerycznych spalania detonacyjnego w kanałach. GUI posiada następujące funkcjonalności:

- umożliwia tworzenie geometrii oraz siatek numerycznych,
- importowanie przygotowanych geometrii do programu,
- ustawianie warunków początkowych i brzegowych silnika obliczeniowego,
- analizę wyników symulacji numerycznych zarówno 2D jak i 3D,
- zapisywanie ustawień GUI w postaci plików xml,
- program umożliwia zaawansowanym użytkownikom wprowadzanie własnych ustawień.

#### 5.2.8. Statystyki technologii programowania oraz kodu

- 9 pakietów,
- 14189 linijek kodu,
- 133 stworzonych klas,

- 939 metod.

## 6. Testowanie i walidacja oprogramowania w oparciu o dane eksperymentalne

### 6.1. Wstęp

IntexSoft powstał na potrzeby projektu pn. - Innowacyjne technologie zabezpieczeń przed wybuchem, w tym obiektów szczególnie chronionych. Oprogramowanie służy do prowadzenia symulacji spalania detonacyjnego mieszanin paliw (wodór, metan, propan) z powietrzem lub tlenem. Program zainstalowany jest w systemie operacyjnym CAELinux, którego stanowi integralną część. CAELinux jest wersją systemu operacyjnego Ubuntu, na którym zainstalowany jest między innymi OpenFoam, ddtFoam oraz solver stworzony na potrzeby projektu ddtFoamIntex. Dodatkowo OS posiada większość oprogramowania typu Open Source dla inżynierów oraz programistów.

W dokumencie opisany jest proces testowania oprogramowania oraz jego walidacja poprzez przeprowadzenie wybranych symulacji numerycznych. Wyniki obliczeń porównane są z danymi eksperymentalnymi. Celem zadania był zidentyfikowanie maksymalnej ilości błędów oprogramowania oraz ich eliminacja. Zadanie było realizowane ze współpracą osób zajmujących się budowaniem oprogramowania.

### 6.2. Testowanie oprogramowania IntexSoft

Program otwieramy poprzez plik wykonywalny *StartIntex.sh*, który znajduje się na Pulpicie, w folderze Intex.

#### 6.2.1. Powitanie

Pierwsze okienko, które pojawia się użytkownikowi na ekranie zawiera powitanie, informację o nazwie programu oraz możliwość wyboru języka. Na dzień dzisiejszy jedyną opcją jest język Polski. Następnie po wybraniu języka należy wcisnąć przycisk START aby przejść do głównej zakładki programu.

#### 6.2.2. Start

Zakładka START stanowi pierwszy etap programu. Użytkownik wybiera folder, w którym będą zapisywane wszystkie pliki związane z ustawieniami programu oraz wyniki symulacji numerycznych. Użytkownik może wskazać istniejący folder lub stworzyć nowy z poziomu aplikacji. W polu tekstowym, po zakończeniu wyboru folderu docelowego pojawi się informacja, gdzie folder się znajduje.

#### 6.2.3. Geometria

W zakładce geometria użytkownik może stworzyć własną geometrię obliczeniową. Do wyboru jest kanał o przekroju kwadratu lub prostokąta oraz rura o przekroju kołowym. Zarówno w jednym jak i w drugim przypadku użytkownik może stworzyć geometrię dwu- lub trój-wymiarową. Następnie należy sprecyzować wymiary geometrii, długość, wysokość i szerokość (kanał) lub średnicę (rura). W samej geometrii, niezależnie od przekroju można zdefiniować przeszkody oraz ich wymiary. Należy mieć na uwadze, że użytkownik zobowiązany jest do podania właściwych wymiarów przeszkód. Zdefiniowanie niewłaściwych przeszkód, np. Zamykających światło kanału może doprowadzić do błędnych wyników lub braku możliwości przeprowadzenia obliczeń.

Użytkownik posiada możliwość stworzenia własnej geometrii oraz zaimportowania jej do programu IntexSoft. Geometria powinna posiadać rozszerzenie pliku .unv lub .msh

#### 6.2.4. Mieszanina

W zakładce "Mieszanina" użytkownik dokonuje wyboru mieszaniny paliwa oraz utleniacza jaki będzie badany numerycznie. Należy określić współczynnik stechiometrii mieszaniny. Użytkownik powinien mieć świadomość jakie wartości można podać dla wybranej mieszaniny. Niefizyczne wielkości mogą skutkować błędnymi wynikami lub brakiem możliwości przeprowadzenia obliczeń. Należy wybrać warunki początkowe, ciśnienia oraz temperatury. Użytkownik definiuje również wartości ciśnienia oraz temperatury zapłonu mieszaniny palnej, jej lokalizację oraz obszar.



### 6.2.5. Siatka

Użytkownik podaje wielkość siatki obliczeniowej oraz jej rodzaj. Do wyboru jest siatka hexahedralna oraz tetrahedralna

### 6.2.6. Warunki brzegowe

W zależności od geometrii oraz jej umiejscowienia w przestrzeni użytkownik definiuje warunki brzegowe. Do wyboru są dwie opcje, "Ściana" lub "Warunek 2D" w zależności od ilości wymiarów geometrii. Użytkownik może zdefiniować położenie punktów w geometrii obliczeniowej odpowiadających czujnikom np. czujnikom ciśnienia lub temperatury. Z każdego punktu będzie można odczytać wartości np. ciśnienia, temperatury, gęstości etc. w czasie.

### 6.2.7. Modele

Użytkownik ma do wyboru dwa modele turbulencji RANS ora LES. Dodatkowo istnieć możliwość ustawienia parametrów modelu spalania turbulentnego. W GUI ustawione są wartości domyślne.

### 6.2.8. Solver

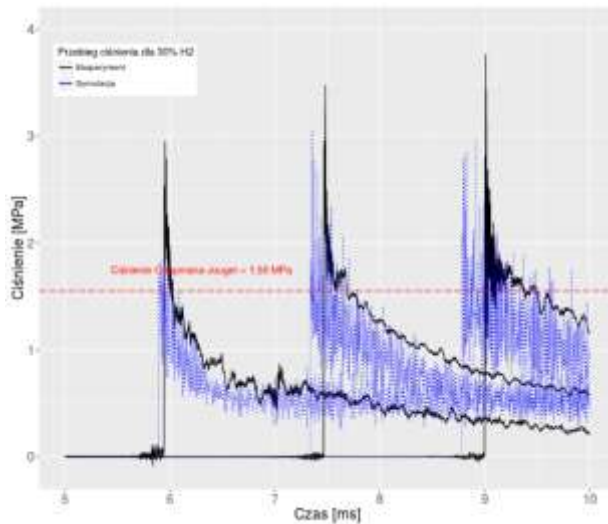
Użytkownik dokonuje ustawień solwera poprzez określenia czasu startowego, końca symulacji, kroku czasowego oraz częstotliwości zapisywanie plików wynikowych. Program umożliwia prowadzenie symulacji numerycznych na wielu procesorach. Wystarczy zaznaczyć "Obliczenia równoległe" oraz wybrać ilość rdzeni komputera. Kolejnym krokiem jest wciśnięcie przycisku Inicjalizuj, który spowoduje zapisanie wszystkich niezbędnych plików w folderze badanego przypadku (folder wybrany w zakładce START). W momencie zakończenia Inicjalizacji będzie można uruchomić symulację poprzez wciśnięcie przycisku START OBLICZEŃ. Następnie pojawi się okno, gdzie będą wyświetlane informacje o postępującej symulacji. Użytkownik w każdej chwili może zatrzymać symulację poprzez wciśnięcie przycisku STOP OBLICZEŃ.

### 6.2.9. Analiza Wyników

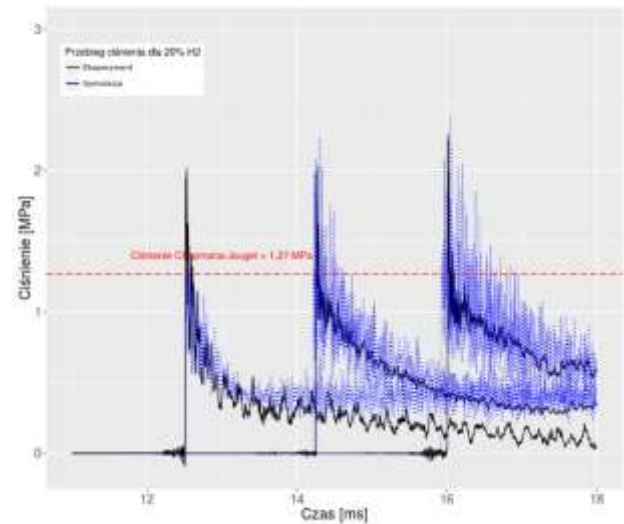
Użytkownik może wyświetlić wyniki w postaci wykresu XY poprzez wybór z listy rozwijalnej odpowiedniej zmiennej. Oś X określa czas, natomiast oś Y wybraną zmienną. Wciśnięcie przycisku WYŚWIETL WYNIKI spowoduje otwarcie okienka z programem ParaView, gdzie użytkownik może zobrazować wybrane przez siebie parametry w czasie oraz przestrzeni.

## 6.3. Wyniki symulacji numerycznych

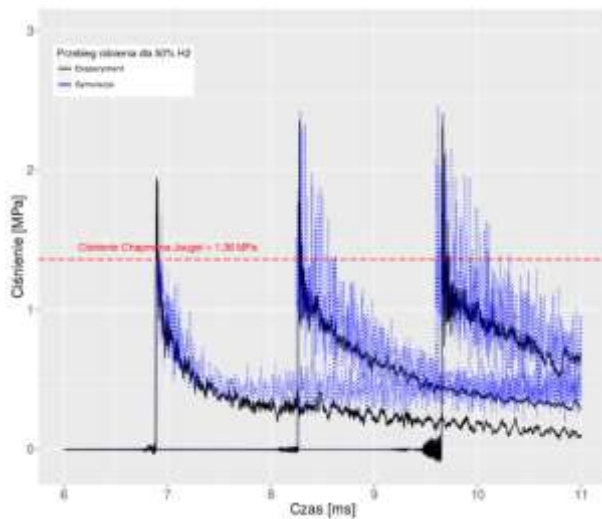
Jako przykład poniżej przedstawiono wyniki trzech symulacji numerycznych z wykorzystaniem IntextSoft w celu weryfikacji poprawności działania programu. Wyniki symulacji porównano z danymi eksperymentalnymi. Badania eksperymentalne przeprowadzono w ramach projektu Intex przez CNBOP-PIB. Tutaj założona geometria obliczeniowa jak dla RD9.



Rysunek 143 Wyniki symulacji detonacji mieszanki wodoru i powietrza (30% $H_2$ ) porównane z danymi eksperymentalnymi w kanale



Rysunek 144 Wyniki symulacji detonacji mieszanki wodoru i powietrza (20% $H_2$ ) porównane z danymi eksperymentalnymi w kanale



Rysunek 145 Wyniki symulacji detonacji mieszanki wodoru i powietrza (50% $H_2$ ) porównane z danymi eksperymentalnymi w kanale

#### 6.4. Podsumowanie

W opracowaniu przedstawiono proces testowania IntexSoft oraz przykładowe symulacje numeryczne przeprowadzone z wykorzystaniem oprogramowania. Podczas testów zgłoszono błędy, które zostały wyeliminowane z oprogramowania.

## 7. Opracowanie i walidacja wyników symulacji numerycznych przeprowadzonych w programie

### 7.1. Wstęp

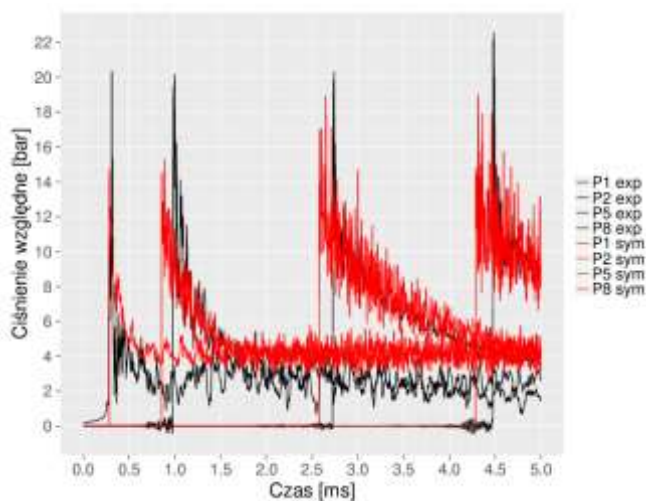
Celem zadania jest opracowanie wyników obliczeń komputerowych oraz porównanie ich z danymi eksperymentalnymi. Symulacje komputerowe zostały wykonane z wykorzystaniem programu IntexSoft, który powstał na potrzeby projektu Intex. Program oparty jest na silniku obliczeniowym OpenFoam [1] oraz bibliotece ddtFoam [2]. Zostały opracowane oraz zaimplementowane nowe modele detonacji dla mieszanin węglowodorowych, które zostały zwalidowane w niniejszym opracowaniu. Dane eksperymentalne uzyskano z badań przeprowadzonych w ramach projektu Intex w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpożarowej PIB

### 7.2. Wyniki

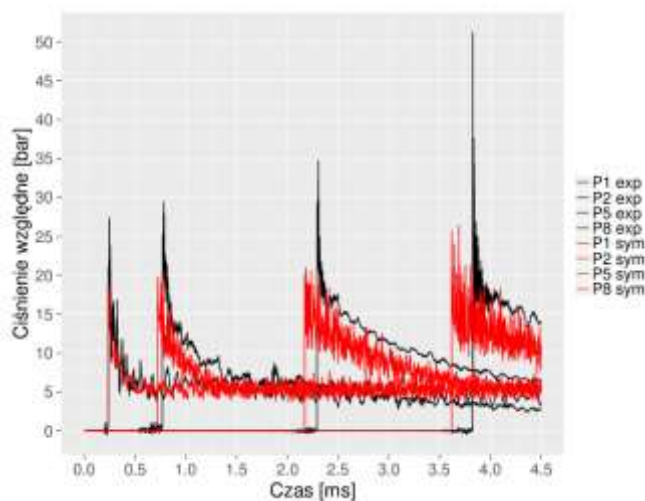
Porównane rezultaty uzyskane z symulacji jak i eksperymentów przedstawiono w dwóch formach. Jako wykres ciśnienia względnego w zależności od czasu oraz jako wykres prędkości względem pozycji fali wzdłuż rury detonacyjnej. P1, P2, P5 i P8 w opisach legend dla ciśnienia oznacza numer czujnika ciśnienia.

#### 7.2.1. Wodór-powietrze

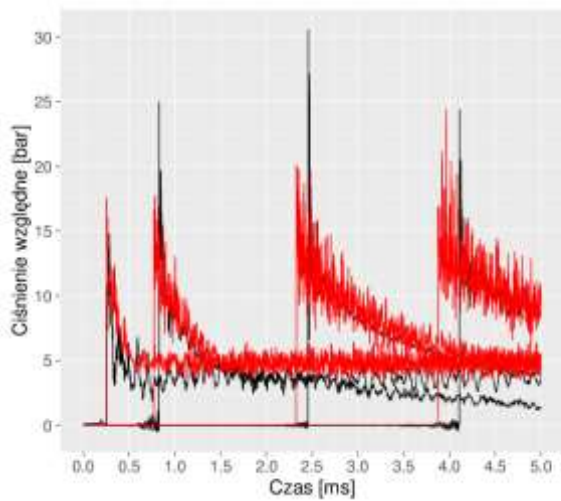
Symulacje dla mieszanin wodór-powietrze przeprowadzono dla stężeń 20, 25, 30, 40 i 50% wodoru w powietrzu. Poniżej przedstawiono porównawcze wykresy ciśnienia dla wybranych czujników oraz wykresy porównujące prędkości uzyskane drogą eksperymentów i symulacji:



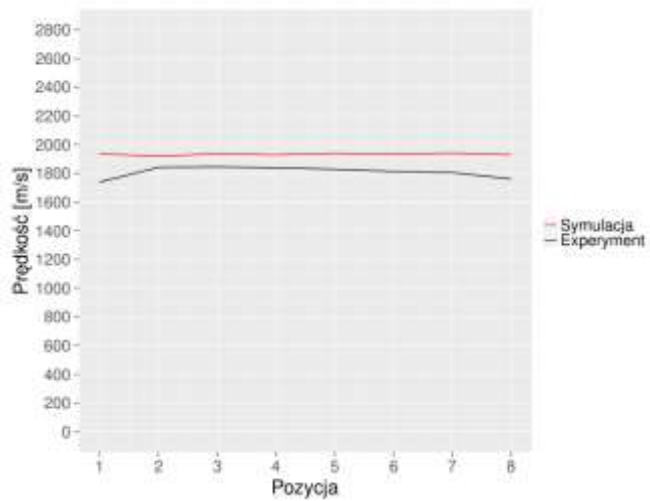
Rysunek 146 Wykres ciśnienia dla 20% wodoru



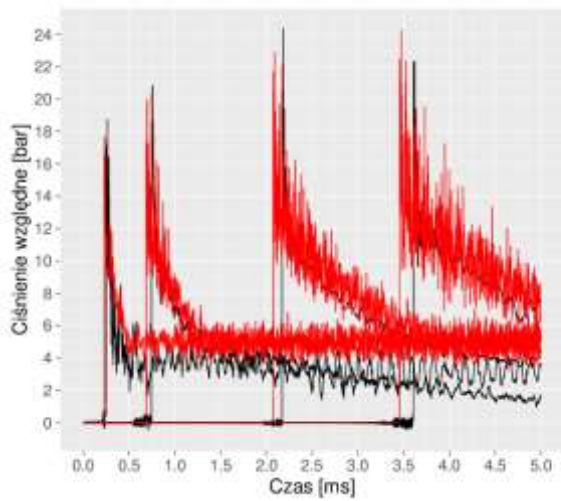
Rysunek 147 Wykres ciśnienia dla 30% wodoru



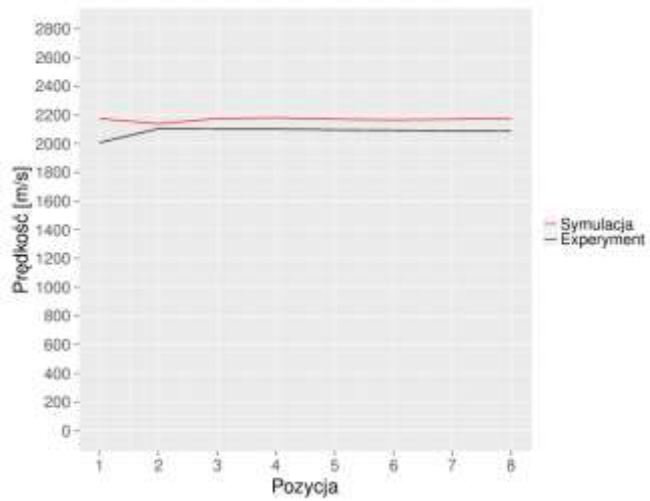
Rysunek 148 Wykres ciśnienia dla 25% wodoru



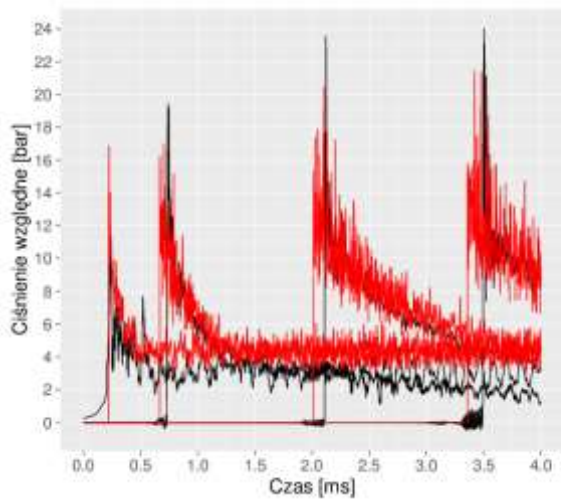
Rysunek 151 Wykres prędkości dla 25% wodoru



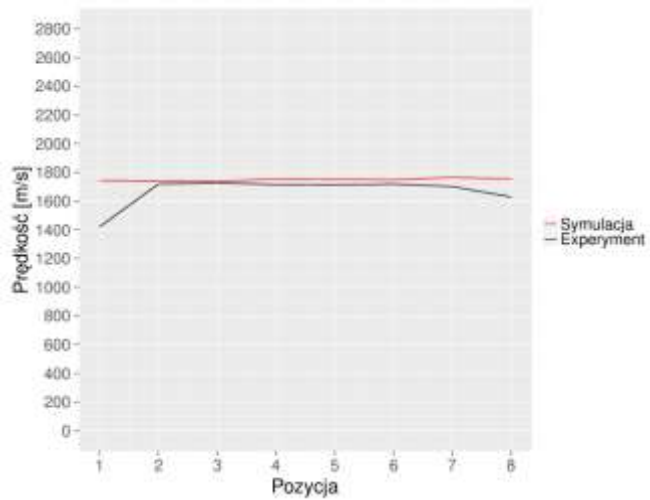
Rysunek 149 Wykres ciśnienia dla 40% wodoru



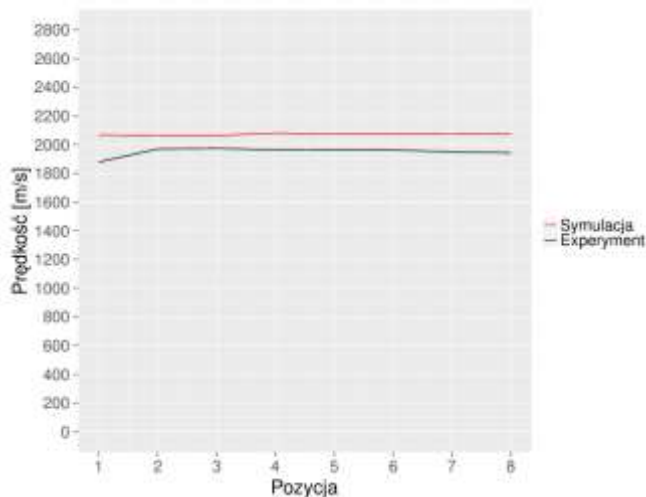
Rysunek 152 Wykres prędkości dla 40% wodoru



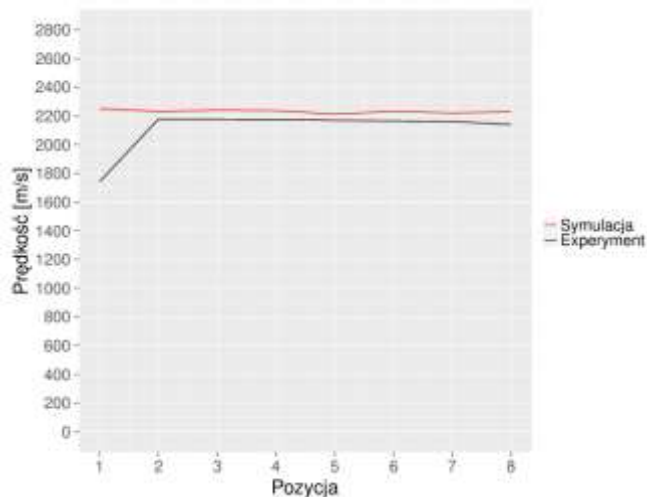
Rysunek 150 Wykres ciśnienia dla 50% wodoru



Rysunek 153 Wykres prędkości dla 20% wodoru



Rysunek 154 Wykres prędkości dla 30% wodoru



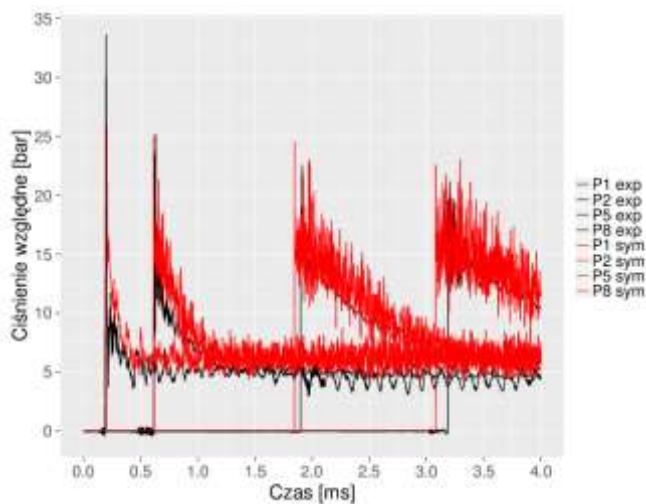
Rysunek 155 Wykres prędkości dla 50% wodoru

1.

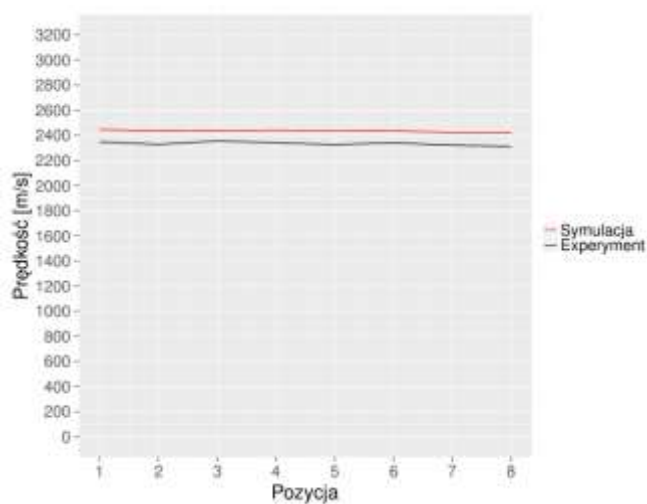
Wyniki uzyskane w symulacjach różnią się od eksperymentów. Ciśnienia z symulacji są z reguły mniejsze niż wartości eksperymentalne o ok. 5 bar. Ciśnienia uzyskane eksperymentalnie dla 30% wodoru są większe nawet dwa razy niż ich odpowiednik z symulacji, ale to tylko jednostkowy przypadek. Ogólny kształt profili ciśnienia zachowany jest dość dobrze, solver dobrze oddał nieciągłości powstałe przy występowaniu fali uderzeniowej. Prędkości otrzymane z symulacji są większe niż te uzyskane podczas eksperymentów. Różnica w wartościach zależy od stężenia, ale mieści się w granicach ok. 50 - 150 m/s.

### 7.2.2. Wodór-tlen

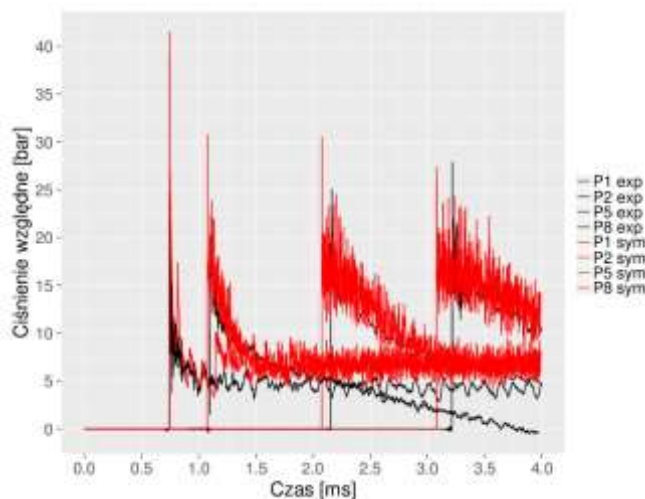
Mieszanki wodoru z tlenem przebadano dla stężeń: 50 i 66% wodoru w tlenie. Poniżej przedstawiono wykresy prezentujące wyniki:



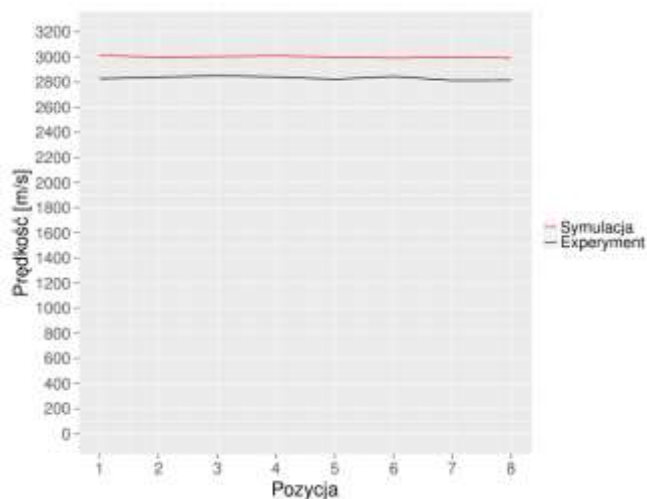
Rysunek 156 Wykres ciśnienia dla 50% wodoru



Rysunek 157 Wykres prędkości dla 50% wodoru



Rysunek 158 Wykres ciśnienia dla 66% wodoru

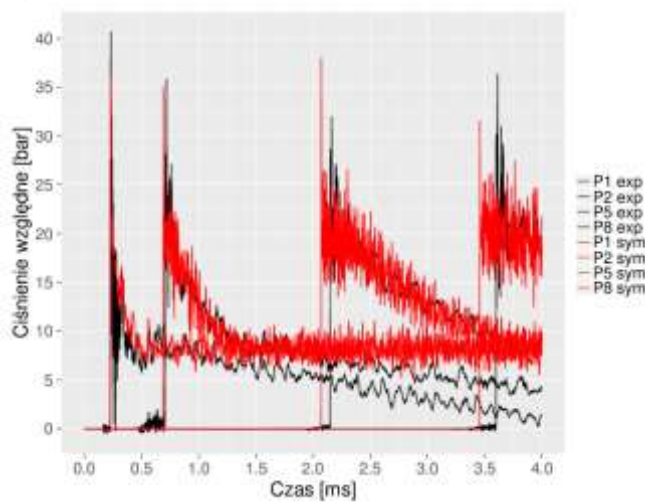


Rysunek 159 Wykres prędkości dla 66% wodoru

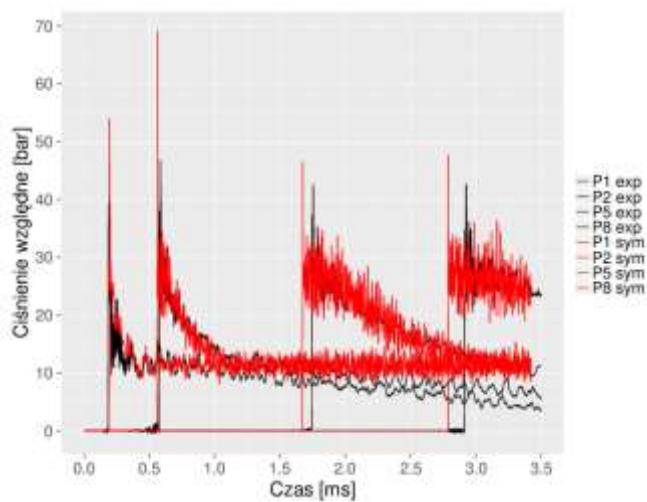
Dla mieszaniny wodoru i tlen wartości ciśnień były bliższe niż dla wodoru z powietrzem. Tutaj maksymalne różnice sięgały do 5 bar nie licząc pików na pierwszym czujniku, gdyż na nim wartości ciśnienia mocno zależą od sposobu wywołania detonacji. Ciśnienia w symulacjach zależnie od czujnika były nawet większe niż dla eksperymentów. Prędkości uzyskane w symulacjach ponownie były przeszacowane. Różniły się o wartości od 100 do 200 m/s.

### 7.2.3. Metan-tlen

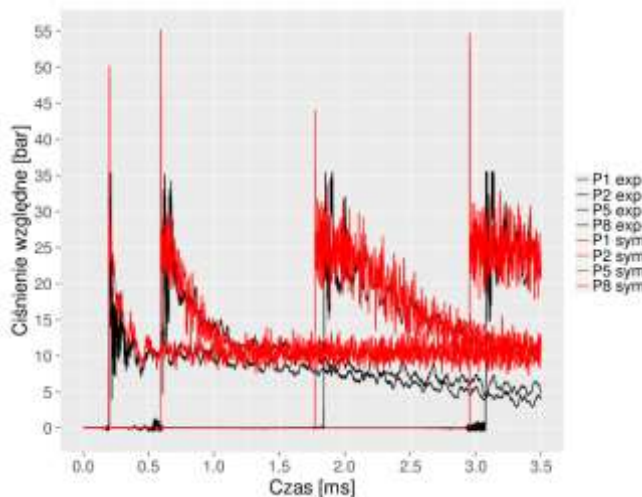
Przebadane mieszaniny metanu z tlenem obejmowały stężenia: 20, 33 i 40% metanu. Poniżej pokazano uzyskane wyniki:



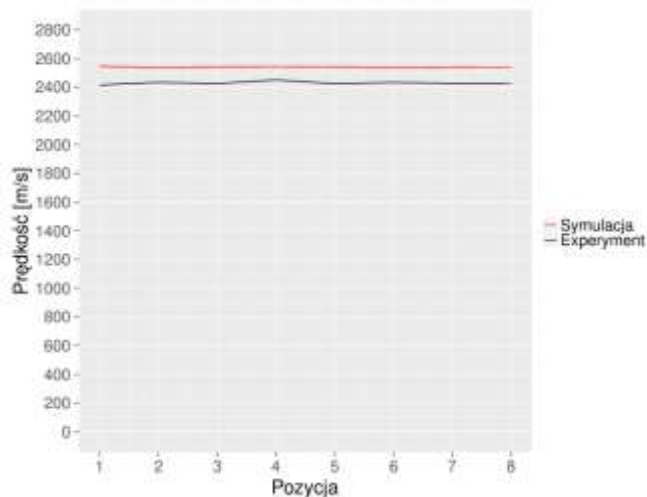
Rysunek 160 Wykres ciśnienia dla 20% metanu



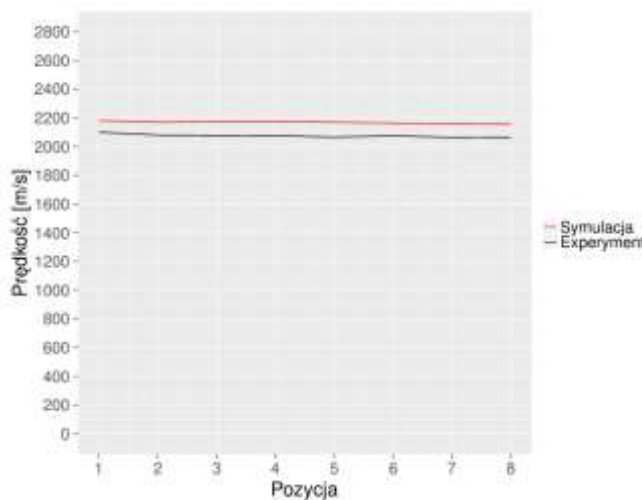
Rysunek 161 Wykres ciśnienia dla 40% metanu



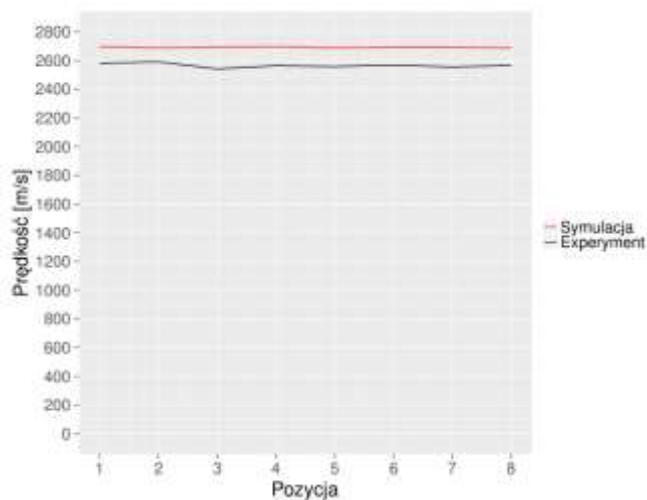
Rysunek 162 Wykres ciśnienia dla 33% metanu



Rysunek 164 Wykres prędkości dla 33% metanu



Rysunek 163 Wykres prędkości dla 20% metanu

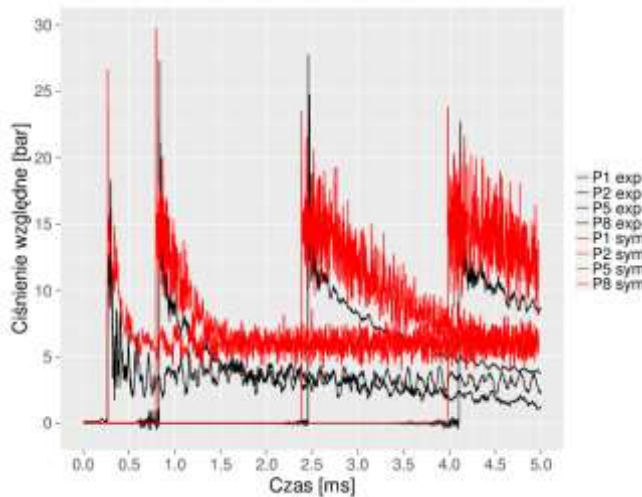


Rysunek 165 Rys. 20 Wykres prędkości dla 40% metanu

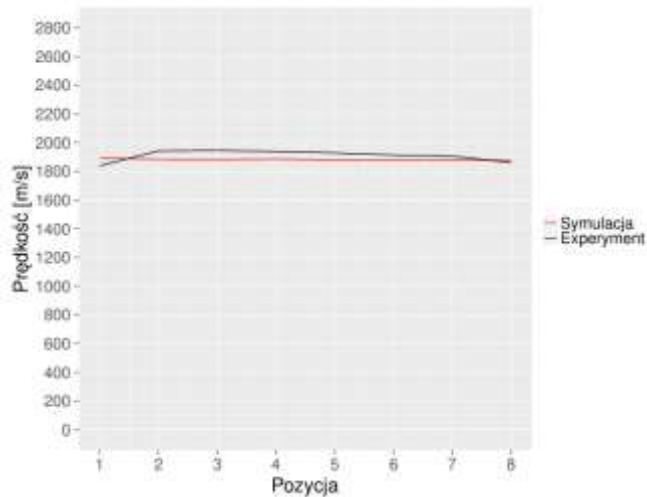
W przypadku metanu z tlenem z symulacji uzyskano większe piki ciśnienia niż z badań eksperymentalnych. Różnice były duże, od 3-4 do nawet 20 barów. Duża różnica w ciśnieniu nie przełożyła się na większe niż do tej pory różnice w prędkościach. Ponownie były one większe w symulacjach, od 100 do 140 m/s.

#### 7.2.4. Propan-powietrze

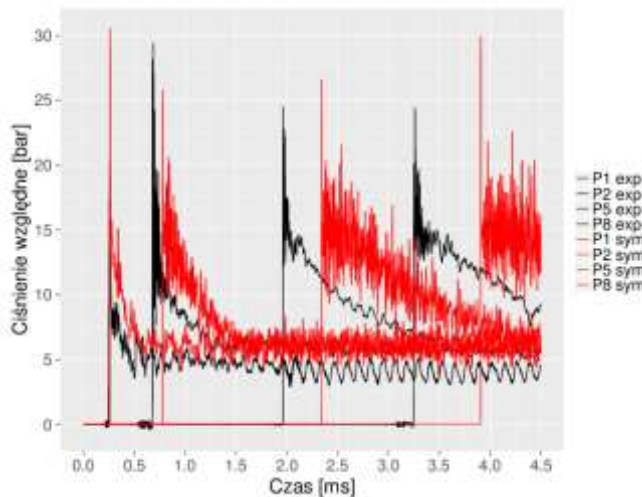
Kolejnym paliwem, dla którego przeprowadzono symulacje był propan. Zbadano jego mieszaniny z powietrzem i tlenem. Dla powietrza stężenie propanu wynosiło 4 i 5%. Poniżej znajdują się wykresy przedstawiające uzyskane wyniki:



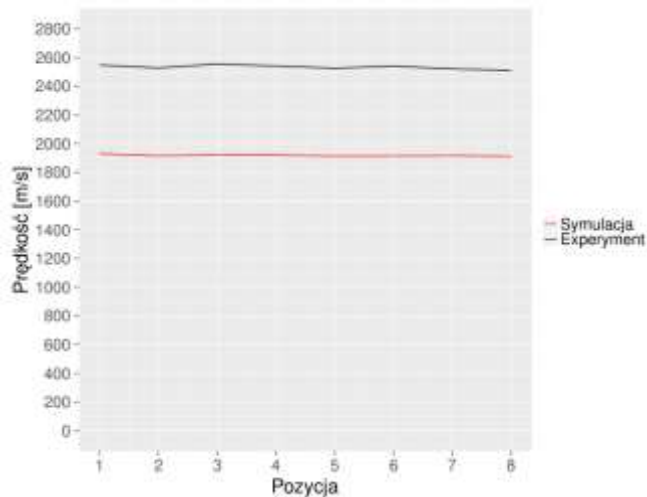
Rysunek 166 Wykres ciśnienia dla 4% propanu



Rysunek 168 Wykres prędkości dla 4% propanu



Rysunek 167 Wykres ciśnienia dla 5% propanu



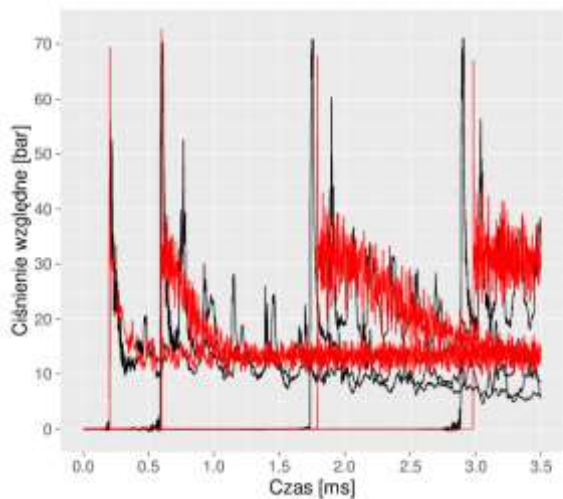
Rysunek 169 Wykres prędkości dla 5% propanu

Porównanie wartości ciśnienia dla mieszaniny propanu z powietrzem wypada dobrze. Piki różnią się niewiele, maksymalnie do 5 bar ale zwykle są w granicach 2-3 bar. Ocena otrzymanej prędkości natomiast zależy od stężenia. Dla 4% wartości prędkości są bardzo bliskie wartościom eksperymentalnym. Są mniejsze i nie różnią się więcej niż 50 m/s. Jest to najdokładniejsze odwzorowanie eksperymentalnej detonacji wśród wszystkich wykonanych symulacji. Natomiast dla stężenia 5% propanu otrzymana prędkość jest całkowicie nie trafiona. Jest dużo wolniejsza niż ta z eksperymentów, różni się aż o ok. 600 m/s i jest najgorszym wynikiem jaki otrzymano w opisywanych symulacjach.

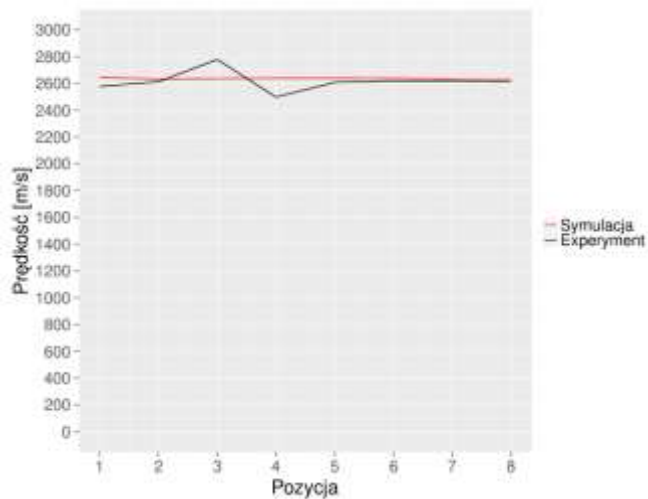
### 7.2.5. Propan-tlen

Ostatnią mieszaniną poddaną analizie numerycznej jest mieszanina propanu i tlenu. Przebadane stężenia obejmują 17, 20 i 30% propanu w tlenie. Otrzymano następujące wyniki:

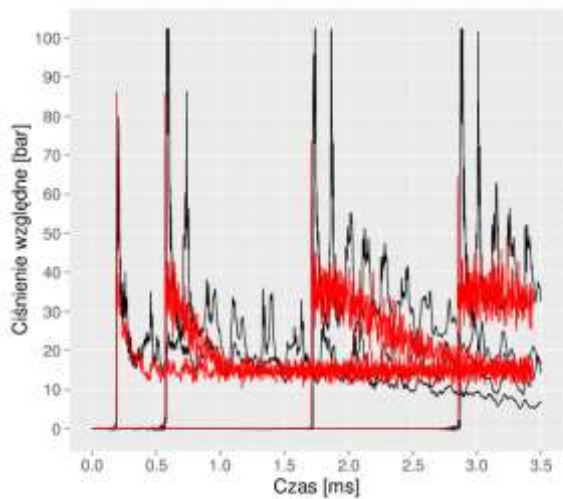




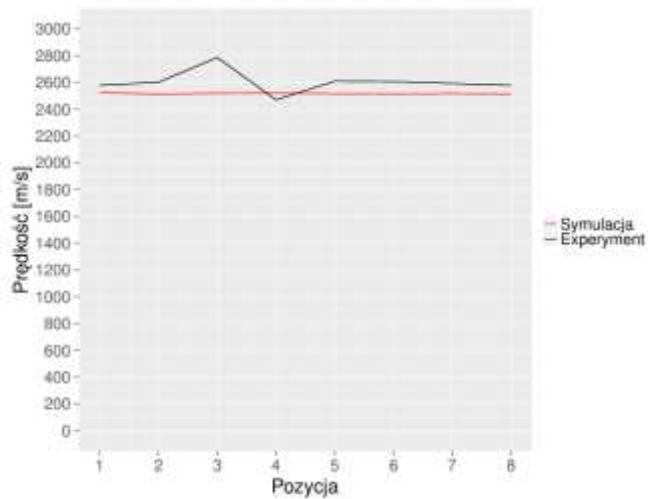
Rysunek 170 Wykres ciśnienia dla 17% propanu



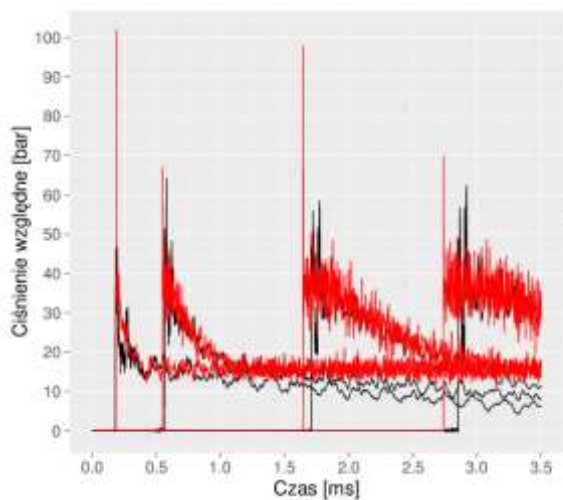
Rysunek 173 Wykres prędkości dla 20% propanu



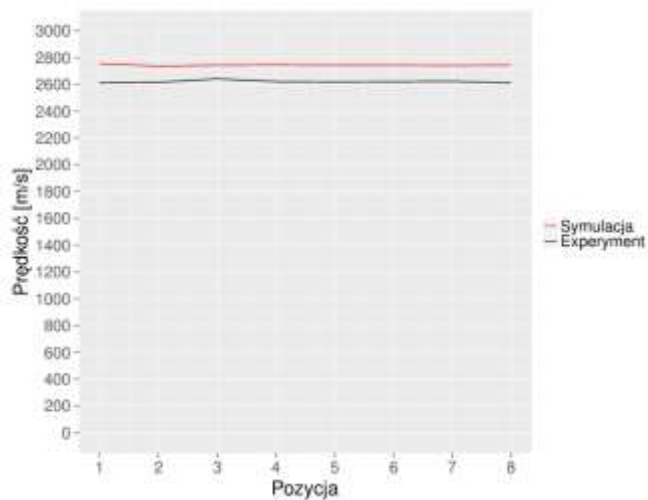
Rysunek 171 Wykres ciśnienia dla 20% propanu



Rysunek 174 Wykres prędkości dla 17% propanu



Rysunek 172 Wykres ciśnienia dla 30% propanu



Rysunek 175 Wykres prędkości dla 30% propanu

Podobnie jak dla mieszaniny propanu i powietrza, wyniki mocno zależą od stężenia. Dla 17% propanu wartości ciśnień są bardzo zbliżone do eksperymentów. Różnią się maksymalnie o 3-4 bary pomijając pierwszy czujnik. Dla 20% propanu symulacja mocno zaniża ciśnienie, zwłaszcza na dalszych czujnikach. Jest ono tam za małe nawet o wartości do 35 bar. Natomiast dla stężenia 30% propanu symulacja mocno przeszacowała ciśnienie. Dla pierwszego czujnika wynosi ono ponad 50 bar, a dla piątego około 40 bar. Dla tej mieszaniny profile ciśnienia nie zostały dobrze odwzorowane. Na powyższych wykresach widać charakterystyczne kolejne piki dla eksperymentów po przejściu pierwszej fali detonacyjnej. Jest to bardzo ciekawe zjawisko i świadczy o występowaniu dwóch lub więcej fal uderzeniowych. Analizując wykresy prędkości można zauważyć, że różnica w wartościach w ekstremalnym punkcie wynosi nawet ponad 300 m/s, ale jest to pojedynczy przypadek. Z reguły błąd prędkości nie przekraczał 100-150 m/s.

### 7.3. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wykazała, że uzyskane wyniki i ich dokładność mocno zależą od danego paliwa. Mieszanki wodoru z powietrzem i tlenem oraz metan-tlen uzyskały najlepsze wyniki w analizie numerycznej. Żadna symulacja nie dała idealnych wyników, ale dla tych dwóch paliw występujące różnice między eksperymentami były relatywnie małe, zwłaszcza w prędkościach (maksymalnie do 150 m/s). Najdokładniejsza symulacja przeprowadzona była dla 4% propanu w powietrzu a z kolei dla 5% propanu otrzymano wyniki najmniej dokładne. Pokazuje to jak bardzo nieprzewidywalne i zależne od stężenia mogą być symulacje wykonywane dla tego paliwa. W przypadku mieszaniny propan-tlen różnice nie były tak drastyczne, ale symulacjom nie udało się wychwycić dobrze widocznych w eksperymentach kilku (coraz słabszych) fal uderzeniowych.

Z przeprowadzonej walidacji można dojść do wniosku, że uzyskanie trafnej prędkości propagacji detonacji jest możliwe i nie zależy ona od różnicy ciśnień między eksperymentami a symulacjami. Nawet w przypadkach, gdy błędy ciśnienia wynosiły w okolicach 100% uzyskiwano prędkości różniące się o podobne wartości (do 150 m/s) jak w przypadkach, gdzie ciśnienie obliczone było dokładnie. Sam błąd wyznaczenia wartości pików ciśnienia jest bardzo różny i ulega drastycznym zmianom nawet w obrębie jednej symulacji.

## 8. Walidacja kodu dla danych eksperymentalnych w dużej skali

### 8.1. Wprowadzenie

Celem niniejszej pracy było przygotowanie i wykonanie symulacji detonacji stechiometrycznej mieszaniny wodoru i powietrza w dużej skali. Użyty w tym celu został program IntexSoft. Obliczenia przeprowadzane były dla dwuwymiarowej geometrii, którą była rura o długości 20 m i średnicy 0,35 m. Zjawisko detonacji jest szczególnie trudnym zagadnieniem w kontekście obliczeń numerycznych. Szybkość zjawisk w niej zachodzących, ich złożoność i nieciągłość parametrów to tylko niektóre z problemów, z którymi program umożliwiający symulację detonacji musi sobie poradzić w tak złożonym środowisku, aby dobrze odwzorować to zjawisko. Samozapłon i spalanie w czole fali detonacyjnej komplikują zadanie jeszcze bardziej i poszerzają jego zakres między innymi o dobór odpowiednich modeli spalania i mechanizmów reakcji. Dobrze napisany program do obliczeń detonacji może pomóc zaoszczędzić wiele czasu i pieniędzy, gdyż eksperymenty w tej dziedzinie są kosztowne i przede wszystkim czasochłonne. Badania te są przeprowadzane by lepiej poznać zjawisko detonacji, pomóc opracować i rozwinąć sposoby na ochronę przed nią, bądź wykorzystać ją w technice.

### 8.2. Opis symulacji

#### 8.2.1. Ustawienia programu

Pierwszym krokiem był wybór katalogu głównego symulacji.

Następnie, w zależności od analizowania przypadku 2D lub 3D, należy wybrać wymiary i przekrój domeny obliczeniowej. Na rysunku pokazany jest przypadek geometrii trójwymiarowej o wymiarach odpowiadających rurze użytej do badań. Możliwym jest też wstawienie do rury przeszkód o zdefiniowanych wymiarach.

Kolejnym krokiem jest wybór mieszaniny i warunków początkowych. W tym przypadku jest to stechiometryczna mieszanina wodoru z powietrzem. Warunki początkowe to ciśnienie 1 atm i temperatura 300 K. Tutaj również definiuje się warunki zapłonu. Dalej należy ustawić rozmiar komórek siatki obliczeniowej oraz typ elementów użytych do jej generacji. W tej pracy użyto komórek czworościennych o rozmiarze 4 mm. Na kolejnym ekranie należy wybrać warunki brzegowe. W przypadku trójwymiarowej rury wybieramy wszędzie warunek "Ściana". Można też tutaj zdefiniować położenie czujników służących do próbkowania ciśnienia w każdym kroku czasowym. Wybrane zostało 10 pozycji co 2 metry zaczynając od początku rury. Położenie 0.175 na kierunku Y oznacza, że czujniki umieszczone są tuż przy ścianie, gdyż w geometrii płaszczyzna XY jest płaszczyzną symetrii.

Następnie wybiera się model turbulencji oraz spalania turbulentnego. W przeprowadzonych symulacjach dla turbulencji wybrano model LES k-equation-eddy-viscosity, a dla spalania - algebraiczne równanie na współczynnik  $\xi$ .

Ostatecznie, wybiera się czasy rozpoczęcia i zakończenia symulacji, krok czasowy oraz częstotliwość zapisywania wyników. Symulacja jest gotowa do uruchomienia.

### 8.3. Bibliografia

- [1] Connaire M. O., Curran, H J., Simmie, J. M., Pitz, W. J. and Westbrook, C.K., A Comprehensive Modeling Study of Hydrogen Oxidation, International Journal of Chemical Kinetics, 2004
- [2] Ettner F., Vollmer K. G., Sattelmayer T., Numerical Simulation of the Deflagration-to-Detonation Transition in Inhomogeneous Mixtures, Technische Universität München, Garching, 2014
- [3] Toro E. F., Spruce M., Speares W., Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver, Cranfield Institute of Technology, Cranfield, 1993
- [4] Konnov A. A., Remaining uncertainties in the kinetic mechanism of hydrogen combustion, Combustion and Flame, vol. 152, no. 4, pp. 507–528, 2008
- [5] Wilcox D. C., Turbulence Modelling for CFD, DCW Industries, La Canada Flintridge, 2006
- [6] OpenFoam. The Open Source CFD Toolbox. User Guide., Version 2.1.1, 2012
- [7] <http://www.cantera.org/docs/sphinx/html/index.html#documentation>, strona internetowa, dostęp 19.06.2016

[8] [http://shepherd.caltech.edu/EDL/public/cantera/html/SD Toolbox/](http://shepherd.caltech.edu/EDL/public/cantera/html/SD_Toolbox/), strona internetowa, dostęp 19.06.2016

## 9. Opracowanie wyników symulacji numerycznych w dużej skali

### 9.1. Wprowadzenie

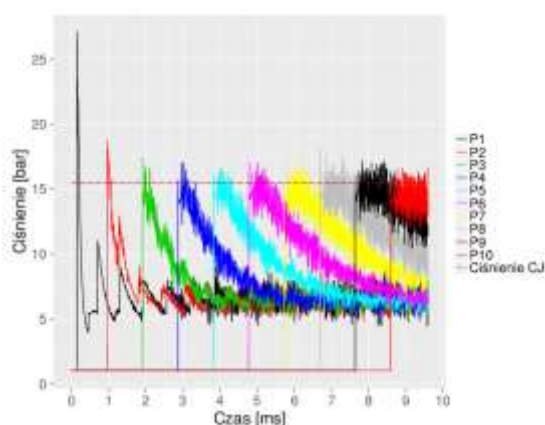
Celem niniejszej pracy było opracowanie wyników symulacji detonacji stechiometrycznej mieszanki wodoru i powietrza w dużej skali. Użyty w tym celu został program IntexSoft. Obliczenia przeprowadzane były dla dwuwymiarowej geometrii, którą była rura o długości 20 m i średnicy 35 cm.

W kontekście analizy numerycznej zjawiska detonacji w rurze, jedne z najważniejszych parametrów do uzyskania, to przebiegi ciśnień wzdłuż jej długości w zależności od czasu. Eksperymentalnie mierzy się je za pomocą czujników ciśnienia wstawionych w gniazda w ścianie rury. Z odległości dzielącej czujniki i czasu przejścia fali detonacyjnej można później wyliczyć prędkość propagacji detonacji. Podobny sposób stosuje się w symulacjach numerycznych, gdzie rolę czujników ciśnienia spełnia próbkowanie wartości z wysoką częstotliwością w zadanych miejscach. Uzyskane wyniki można później porównać z wartościami teoretycznymi lub eksperymentalnymi, jeśli się nimi dysponuje. W niniejszej pracy otrzymane wartości porównano z wartościami teoretycznymi otrzymanymi z obliczeń za pomocą biblioteki Cantera [1] i SDToolbox [2] z wykorzystaniem mechanizmu reakcji  $\text{h2air\_highT}$  [3].

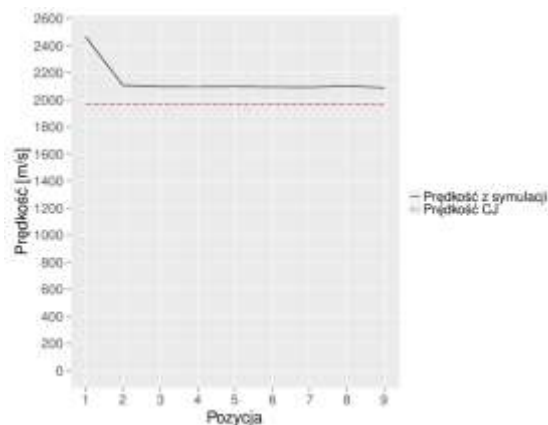
### 9.2. Omówienie wyników symulacji

#### 9.2.1. Przebiegi ciśnienia

Wykres prezentujący otrzymane przebiegi ciśnienia dla mieszanki stechiometrycznej wodoru i powietrza dla warunków otoczenia 300K oraz 1atm, wzdłuż rury detonacyjnej pokazany jest na rysunkach poniżej:



Rysunek 176 Wartości ciśnienia wzdłuż rury



Rysunek 177 Prędkość propagacji detonacji

Na osi pionowej umieszczono bezwzględne wartości ciśnienia podane w barach, a na osi poziomej czas w milisekundach. Kolory rozróżniają czujniki wstawione co 2 metry, zaczynając od początku rury, a kończąc na 18 metrach. Pozioma, przerywana linia odniesienia to ciśnienie teoretyczne Chapmana-Jouguet.

Można zauważyć, że maksymalne wartości ciśnień trzymają się na stałym poziomie z wyjątkiem czujnika P1 i P2. Tutaj ciśnienie sięga odpowiednio 27 i 18.5 barów. Jest to prawdopodobnie spowodowane przegonieniem fali detonacyjnej na początku rury poprzez intensywny zapłon mieszanki. Reszta czujników pokazuje wartości oscylujące wokół 17 bar z błędami  $\pm 1$  bar. Dla każdego czujnika jest to więcej niż wartość teoretyczna CJ, która wynosi około 15.5 bar. Średni błąd względem tej wartości wynosi więc 1.5 bar. Nieciągłości są dobrze odwzorowane, solver poradził sobie z uzyskaniem nagłego skoku ciśnienia po przejściu fali uderzeniowej. Należy zwrócić uwagę na duże zaburzenie profilu ciśnienia, które zwiększa się wraz z pokonanym przez falę dystansem. Po jej przejściu występują fluktuacje ciśnienia, które często przekraczają ciśnienie bezpośrednio za właściwą falą. Na pewno jest to problem, jednak fakt występowania tych zaburzeń dopiero za falą powoduje, że ich wpływ może być znikomy. Profile ciśnienia kończą się dla czasu 9.6 ms, gdyż wtedy fala detonacyjna dotarła do końca rury i cała mieszanina przereagowała.

### 9.2.2. Prędkość

Wykres prędkości otrzymanej z przebiegów ciśnienia pokazano na rysunku powyżej.

Pionowa oś to prędkość w metrach na sekundę, pozioma natomiast reprezentuje pozycję pomiędzy każdym z 10 czujników, więc 1=1 m, 2=3 m, 3=5 m, itd. Na wykresie pokazano prędkość obliczoną z przebiegu ciśnienia otrzymanego z symulacji oraz referencyjną, teoretyczną prędkość detonacji Chapmana-Jouguet, która wynosiła 1968 m/s. Prędkość z symulacji jest większa od teoretycznej o około 130 m/s i wynosi 2100 m/s. Jest to zgodne z analizą ze stanem wiedzy, która pokazuje, że ciśnienia w symulacji zawsze są większe, przez co przyspieszają detonację bardziej niż w przypadku teoretycznym. Widać też, że detonacja na początku rury jest przegoniona przez jej intensywne zainicjowanie, co również potwierdza analizę z poprzedniego podrozdziału. Jej prędkość wynosiła tam 2470 m/s, po czym za trzecim czujnikiem ustabilizowała się na 2100 m/s.

### 9.3. Podsumowanie

W niniejszej pracy przeprowadzono symulację numeryczną spalania detonacyjnego w rurze o długości 20 m i średnicy 35 cm z użyciem programu IntexSoft i przeanalizowano otrzymane wyniki. Wykorzystano dwuwymiarową siatkę zbudowaną z 664 732 trójkątnych elementów. Za model turbulencji wybrano model LES k-equation-eddy-viscosity model.

Analiza profili ciśnienia pokazała, że solver dobrze poradził sobie z nieciągłościami wywołanymi przez falę uderzeniową. Wartości ciśnień po ustabilizowaniu się detonacji oscylowały w granicach 17 bar, co daje wartość większą niż teoretyczne ciśnienie CJ, które wynosi 15.5 bar. Fala generowała duże zaburzenia i fluktuacje ciśnienia w gazie po jej przejściu. Efekt ten wzmacniał się wraz ze wzrostem dystansu pokonanego przez falę.

Wykres prędkości propagacji fali pokazał, że, w porównaniu do wartości teoretycznej, solver przeszacował prędkość około 130 m/s. Prędkość CJ wynosiła około 1968 m/s, a prędkość otrzymana z symulacji 2100 m/s. Otrzymane wyniki pozostawały w zgodzie z analizą przeprowadzoną dla profili ciśnienia. Symulacja pokazała, że przejście fali detonacyjnej do końca rury (20 m), zajęło około 9.6 milisekundy.

### 9.4. Bibliografia

- [1] <http://www.cantera.org/docs/sphinx/html/index.html#documentation>, strona internetowa, dostęp 19.06.2016
- [2] [http://shepherd.caltech.edu/EDL/public/cantera/html/SD Toolbox/](http://shepherd.caltech.edu/EDL/public/cantera/html/SD%20Toolbox/), strona internetowa, dostęp 19.06.2016
- [3] [http://shepherd.caltech.edu/EDL/public/cantera/mechs/cti/web/h2air\\_highT.cti](http://shepherd.caltech.edu/EDL/public/cantera/mechs/cti/web/h2air_highT.cti), strona internetowa, dostęp 19.06.2016

## 10. Symulacje numeryczne na wielu procesorach

### 10.1. Wstęp

Celem sprawozdania jest przeprowadzenie symulacji numerycznych detonacji w dużej skali oraz weryfikacja programu IntexSoft w zakresie obliczeń na wielu procesorach.

### 10.2. Opis modelu obliczeń na wielu procesorach

MPI (Message Passing Interface) to nazwa standardu biblioteki przesyłania komunikatów dla potrzeb programowania równoległego. Pod skrótem MPI kryje się tylko formalna specyfikacja interfejsu, nie jest to nazwa żadnego konkretnego pakietu oprogramowania. Aktualnie obowiązująca wersja standardu MPI to 1.2, obecnie na ukończeniu są jednak prace nad wersją 2.0. Najbardziej znaną implementacją MPI jest MPICH, pochodzący z Argonne National Laboratory i rozwijany przez grupę pracowników działu matematyki i informatyki tej instytucji. Dostępna jest wersja zarówno na platformy UNIX-owe, jak i Windows NT/2000.

MPI realizuje model przetwarzania współbieżnego zwany MIMD (Multiple Instruction Multiple Data), a dokładniej SPMD (Single Program Multiple Data). Zakłada on, że ten sam kod źródłowy wykonuje się jednocześnie na kilku maszynach i procesy mogą przetwarzać równocześnie różne fragmenty danych, wymieniając informacje przy użyciu komunikatów. Takie podejście ma wiele zalet, z których najbardziej spektakularną jest możliwość współbieżnych obliczeń wykonywanych na maszynach o zupełnie różnych architekturach (np. Linux-x86 oraz Solaris-Sparc). Zaletą jest również rezygnacja z koncepcji pamięci dzielonej i wynikające z tego ogólne uproszczenie programowania. MPI umożliwia:

- wymianę komunikatów między procesami. Główny nacisk jest położony na wymianę danych, ale możliwe jest również wysyłanie komunikatów kontrolnych, czy synchronizacja procesów
- uzyskiwanie informacji o środowisku. Typowy przykład to ilość aktywnych proces[ów/-orów], czy numer aktualnego procesu
- kontrolę nad systemem. Inicjalizacja/kończenie programu, kontrola poprawności przesyłanych komunikatów itp.

MPI stara się zachować niezależność od platformy przy przesyłaniu komunikatów między procesami. Dla standardowych typów jest to proste, natomiast dla typów niestandardowych MPI dostarcza funkcje pozwalające na zdefiniowanie typów użytkownika dla potrzeb przesyłania komunikatów.

Możliwe jest adresowanie komunikatów zarówno do konkretnych procesów, jak i do określonych grup odbiorców. Dostępne są funkcje do definiowania grup procesów i późniejszego rozsyłania komunikatów do tych grup. Komunikaty opatrzone są „tagami” pozwalającymi na późniejsze selektywne odbieranie ich z kolejki w zależności od rodzaju. Możliwa jest wymiana komunikatów w trybie non-blocking pozwalającym na jeszcze większe zrównoleżenie obliczeń [2]

### 10.3. Procedura obliczeń w programie IntexSoft

1. Podział geometrii obliczeniowej na równe części. Ilość części jest równa ilości zdefiniowanych procesorów wykorzystywanych do obliczeń.
2. W folderze stworzone są podfoldery odpowiadające częściom podzielonej geometrii. Ilość folderów jest równa ilości wykorzystywanych procesorów.
3. Uruchomienie symulacji. Wyniki obliczeń zapisywane są w każdym z podfolderów
4. W momencie zakończenia obliczeń wyniki z podfolderów są łączone w jeden plik.
5. Wyniki obliczeń mogą być wizualizowane po zakończeniu punktu nr 4

Wymieniona procedura jest wywoływana wewnątrz projektu IntexSoft automatycznie bez angażowania użytkownika.

Zaawansowany użytkownik może we własnym zakresie wykonać obliczenia na wielu procesorach wykorzystując interfejs tekstowy oraz dodatkowo zaawansowane funkcje podziału geometrii.

W folderze „domowym”, gdzie zapisywane są ustawienia programu IntexSoft należy otworzyć plik decomposeParDict. Na tym poziomie są dostępne następujące metody podziału siatki:

- Simple (zaimplementowana w programie IntexSoft) [3]

- Hierarchical (metoda taka sam jak Simple z dodatkową możliwością zdefiniowania stopnia podziału geometrii) [3]
- Scootch [3]
- Manual [3]

#### 10.4. Metodologia obliczeń na wielu procesorach

Przeprowadzono obliczenia numeryczne dwuwymiarowe (2D). Geometria obliczeniowa odpowiadała wymiarom kanału detonacyjnego o długości 2 m oraz średnicy 0.35 m. Wielkość komórki obliczeniowej tetrahedralnej była równa 0.004 m. Całkowita ilość komórek stanowiła 660 000 elementów. Przeprowadzono symulacje na 5, 10, 15, oraz 20 procesorach. Została wykorzystana stacja robocza posiadająca 20 procesorów oraz 64 GB pamięci operacyjnej. Mieszanina stechiometrycznej wodoru i powietrza została wybrana do symulacji propagacji fali detonacyjnej. Czas pracy procesorów określa czas obliczeń przeprowadzonych przez procesory. Na rzeczywisty czas prowadzenia symulacji numerycznej składają się następujące elementy:

- praca procesorów,
- komunikacja między procesorami,
- wymiana danych i informacji między procesorami,
- zapisywanie plików z wynikami obliczeń,
- drukowanie wyników do konsoli.

Numeryczna fala detonacyjna propagująca w mieszaninie stechiometrycznej wodoru i powietrza propagowała z prędkością 2050 m/s. Czas przejścia fali wzdłuż całego kanału wynosił 9.55 ms.

#### 10.5. Podsumowanie

Przeprowadzono symulacje numeryczne spalania detonacyjnego w kanale o długości 20 m oraz średnicy 0.35 m. Geometria, siatka numeryczna oraz obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem programu IntexSoft. Symulacje zostały przeprowadzone z wykorzystaniem 5, 10, 15 oraz 20 procesorów. Program IntexSoft został sprawdzony oraz przetestowany wobec obliczeń na wielu procesorach.

#### 10.6. Literatura

1. Wniosek o finansowanie projektu nr: DOBR-BIO4/052/13073/2013
2. The Message Passing Interface (MPI) standard (<http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpi/>)
3. OpenFOAM User Guide (<http://cfdirect.openfoam/user-guide/running-applications-parallel/>)

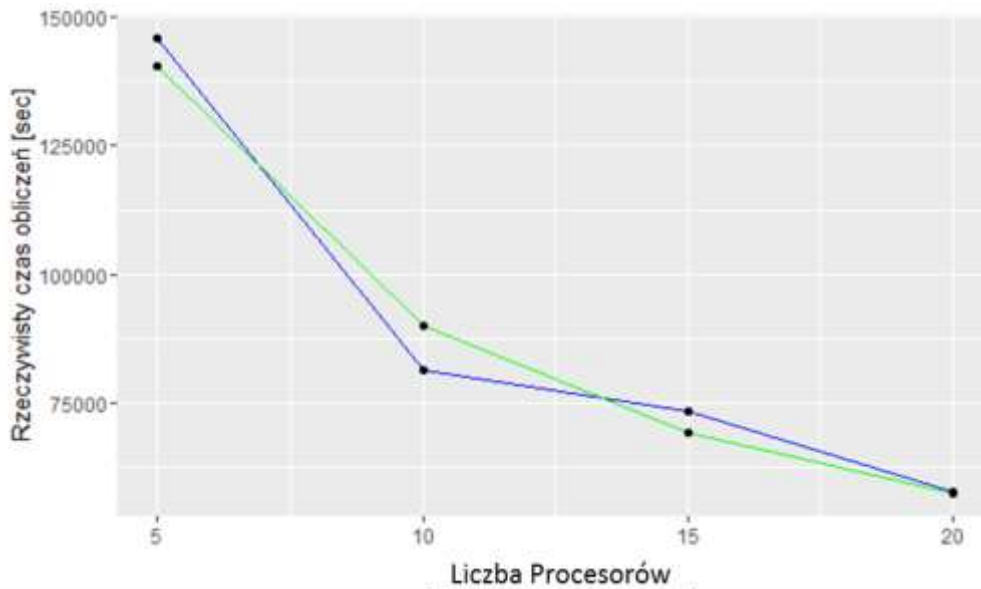


## 11. Opracowanie wyników symulacji numerycznych na wielu procesorach

Na podstawie uzyskanych wyników zaproponowano równanie empiryczne za pomocą, którego można przewidywać czas obliczeń dwuwymiarowych w przedstawionej geometrii, z wykorzystaniem komórek tetrahedralnych. Równanie w postaci graficznej przedstawione jest na rysunku poniżej.

$$t = 396269 \cdot CPU^{-0.644}, \quad (1)$$

gdzie:  $t$  – czas obliczeń,  $CPU$  – ilość procesorów.



Rysunek 178 Wykres rzeczywistego czasu obliczeń (linia niebieska) oraz obliczony czas na podstawie równania (1) (linia zielona)

Na podstawie równania można przewidzieć czas obliczeń w zależności od ilości procesorów. Równanie przewiduje czas niezbędny do przeprowadzenia obliczeń z błędem rzędu 5% z następującymi warunkami:

- obliczenia przeprowadzone są na jednej stacji roboczej, która posiada 20 procesorów oraz 64 GB pamięci operacyjnej
- domena obliczeniowa jest dwuwymiarowa
- domena obliczeniowa składa się z prostej geometrii w postaci kanału
- komórka obliczeniowa jest wielkości 0.004 m (tetrahedral)

### 11.1. Podsumowanie

Przeprowadzono symulacje numeryczne spalania detonacyjnego z wykorzystaniem programu IntexSoft. Geometria obliczeniowa była w postaci kanału o długości 20 m oraz średnicy 0.35 m. Symulacje zostały przeprowadzone z wykorzystaniem 5, 10, 15 oraz 20 procesorów. Przedstawiono wyniki w postaci wykresów. Zaproponowano równanie empiryczne do przewidywania czasu obliczeń w funkcji ilości procesorów.

### 11.2. Literatura

1. Wniosek o finansowanie projektu nr: DOBR-BIO4/052/13073/2013

## 12. Instrukcja tworzenia domeny obliczeniowej w programie IntexSoft

### 12.1. Wstęp

Domena obliczeniowa składa się z geometrii oraz siatki obliczeniowej. Siatka jest dyskretyzacją powierzchni lub objętości, w której zachodzą badane zjawiska fizyczne. Ciągły w przestrzeni kształt ciała zastępowany jest układem płaskich powierzchni będących przybliżeniem wystarczającym do odwzorowania przepływu wokół ciała. Ciągła przestrzeń płynu jest zastępowana objętościami ograniczonymi przez płaskie ścianki. Możemy wyróżnić trzy rodzaje siatek ze względu na ich zastosowanie:

- powierzchniowe (na obiektach 3D),
- płaskie do obliczeń metodą objętości skończonych,
- trójwymiarowe do obliczeń metodą objętości skończonych.

Siatki dzielimy ze względu na ich strukturę:

- strukturalne – prostopadłościowe, które przyspieszają znacznie obliczenia, ale stwarzają trudność w opisywaniu skomplikowanych brył,
- niestukturalne – tetrahedralne, ułatwiają tworzenie siatki wokół obiektów o skomplikowanej geometrii natomiast są bardzo kosztowne z uwagi na czas obliczeniowy. Ten rodzaj siatek wymaga również dyskretyzacji wyższych rzędów,
- hybrydowe – stanowią połączenie siatek strukturalnych i niestukturalnych.

Wielkość komórek obliczeniowych dobierana jest w zależności od badanego zjawiska fizycznego. Pierwszym parametrem, który jest brany pod uwagę jest prędkość przepływu. Charakterystyczna wielkość komórki powinna być dobrana w taki sposób, aby cząstka płynu nie przepływała w danym kroku czasowy większej odległości niż rozmiar komórki obliczeniowej. Krok czasowy oraz wielkość komórki są ze sobą powiązane przez warunek Couranta–Friedrichsa–Lewy'ego (warunek CFL), który wyraża się wzorem

$$\frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq C$$

gdzie  $u$  jest (maksymalną) prędkością fali,  $\Delta t$  jest numerycznym krokiem czasowym,  $\Delta x$  jest charakterystyczną wielkością komórki obliczeniowej w kierunku przepływu. Wartość stałej  $C$  zależy od postaci rozwiązywanego równania oraz zastosowanego modelu numerycznego, nie zależy zaś od  $\Delta t$  ani  $\Delta x$ . W bardzo wielu zastosowaniach przyjmuje się  $C \leq 1$

Proces tworzenia siatki obliczeniowej

1. Stworzenie geometrii
2. Naprawa geometrii poprzez upraszczanie i ujednoczenie skomplikowanych struktur
3. Wybór siatki obliczeniowej oraz jej wielkości
4. Wybór algorytmu oraz współczynników do tworzenia siatki obliczeniowej
5. Dyskretyzacja rozpatrywanej geometrii

### 12.2. Tworzenie geometrii obliczeniowej w programie IntexSoft

Program IntexSoft umożliwia tworzenie geometrii oraz siatki obliczeniowych dla kanałów detonacyjnych o przekroju kołowym oraz kwadratowym z przeszkodami i bez przeszkód. Zarówno w jednym, jak i w drugim przypadku użytkownik może stworzyć geometrię dwu- lub trój-wymiarową. Następnie należy sprecyzować wymiary geometrii: długość, wysokość i szerokość (kanał) lub średnicę (rura). W samej geometrii, niezależnie od przekroju można zdefiniować przeszkody oraz ich wymiary. Należy mieć na uwadze, że użytkownik zobowiązany jest do podania właściwych wymiarów przeszkód. Zdefiniowanie niewłaściwych przeszkód, np. zamykających światło kanału może doprowadzić do błędnych wyników lub braku możliwości przeprowadzenia obliczeń.

Pierwszym krokiem jest wybór geometrii dwuwymiarowej (2D) lub trójwymiarowej (3D). Z listy rozwijalnej „Wybierz przekrój kanału” użytkownik wybiera przekrój badanego kanału. W zależności od

wyboru przekroju kanału zostają aktywowane pola, w których powinny zostać określone wymiary rozpatrywanego kanału.

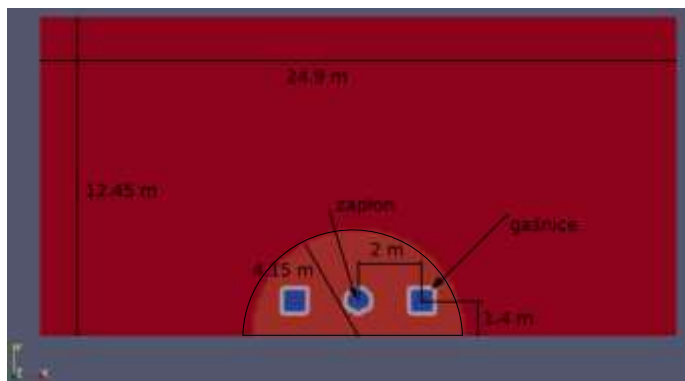
W przypadku gdy rozpatrywana geometria zawiera przeszkody należy zaznaczyć radioprzycisk „Tak”. Pojawią się pola do zdefiniowania wymiarów pojedynczej przeszkody oraz ilość występujących elementów w kanale. W momencie zdefiniowania wszystkich elementów i charakterystycznych wielkości rozpatrywanego kanału geometria razem z siatką obliczeniową zostanie stworzona podczas inicjalizacji całego przypadku obliczeniowego (przycisk „Inicjalizuj” w zakładce „Solver”).

Wszystkie pliki źródłowe w postaci skryptów oraz geometrii z siatką (rozszerzenie .udv) znajdują się w folderze przypadku obliczeniowego. Lokalizacja oraz nazwa folderu są wybierane w zakładce „Start”. Użytkownicy zaawansowani mogą przekształcać oraz modyfikować powstałe pliki w celu przeprowadzenia parametryzacji w istniejącym projekcie lub wykorzystać materiały w bardziej zaawansowanych obliczeniach.

## 13. Symulacje numeryczne aktywnego tłumienia spalania deflagacyjnego na otwartej przestrzeni

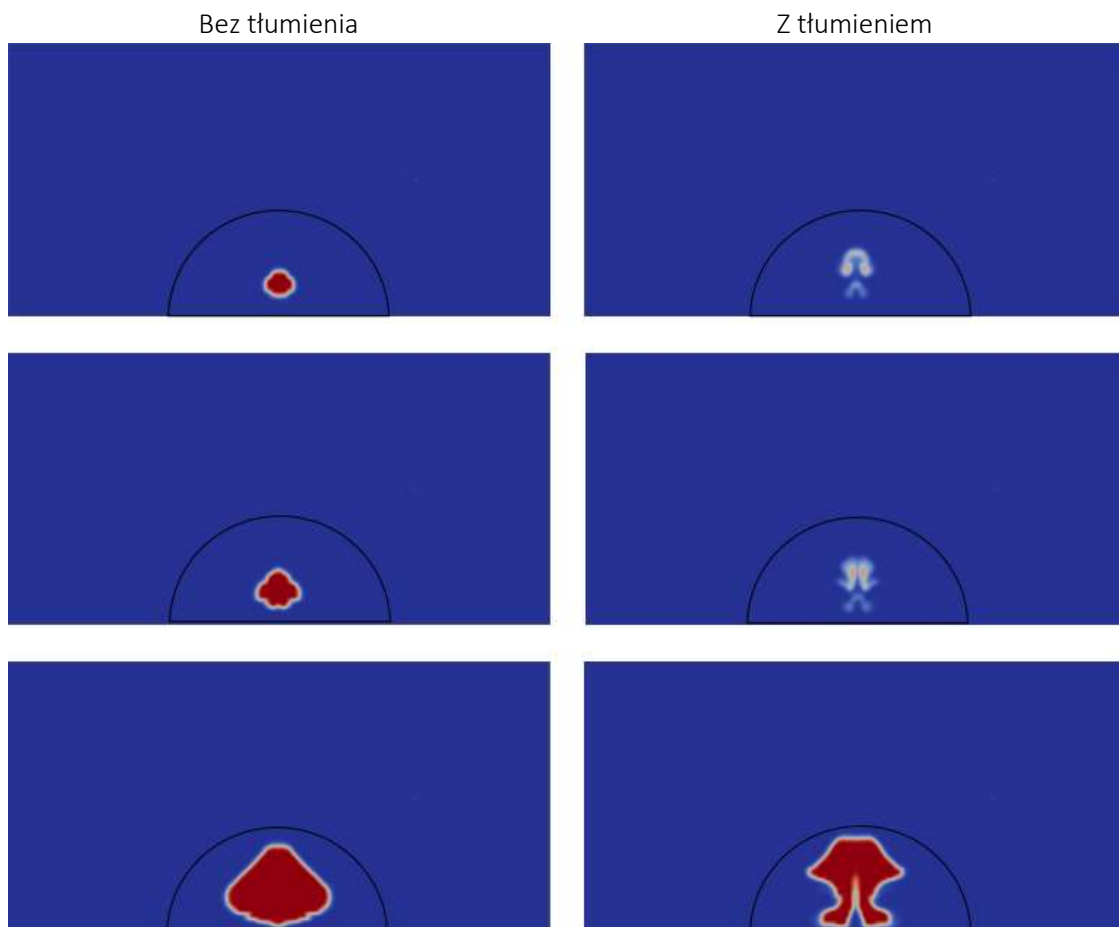
### 13.1. Symulacje numeryczne

Celem opracowania jest przedstawienie możliwości wykorzystania programu OpenFoam oraz opracowanej biblioteki w projekcie Intex do symulacji numerycznych aktywnego tłumienia wybuchu. Domena obliczeniowa składa się z dwu-wymiarowej siatki obliczeniowej, która przedstawia półsferę o objętości 150 m<sup>3</sup> wypełnioną mieszaniną stechiometryczną propanu z powietrzem. Gaśnica została zamodelowana jako obszar wypełniony materiałem inertnym pod ciśnieniem 5 oraz 10 atmosfer (rysunek poniżej). W kroku czasowym, w którym pojawia się płomień następuje uwolnienie się mieszaniny gaszącej skierowanej w kierunku propagującego płomienia.



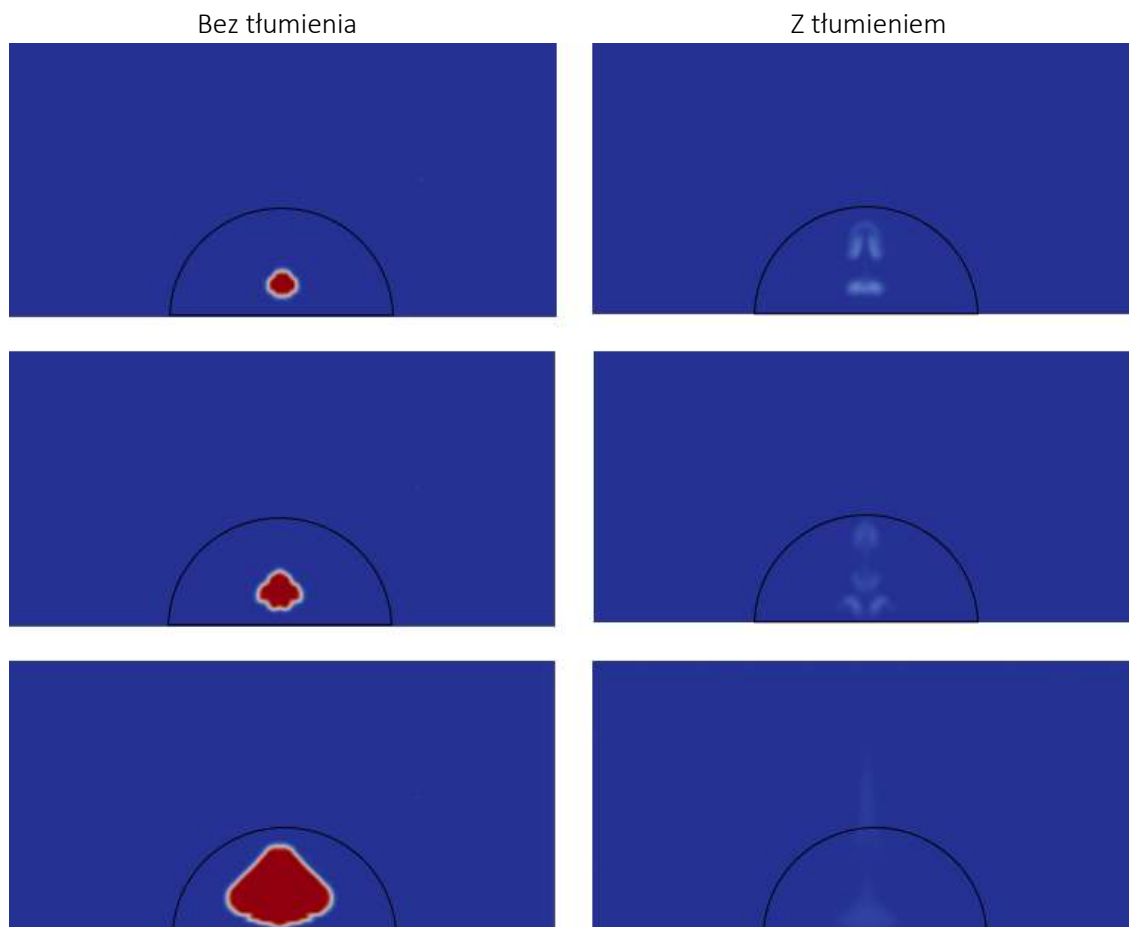
Rysunek 179 Domena obliczeniowa aktywnego tłumienia wybuchu na otwartej przestrzeni

Rysunek poniżej przedstawia sekwencję obrazów przedstawiających propagację płomienia oraz wpływ mieszaniny gaszącej pod ciśnieniem 5 atmosfer.



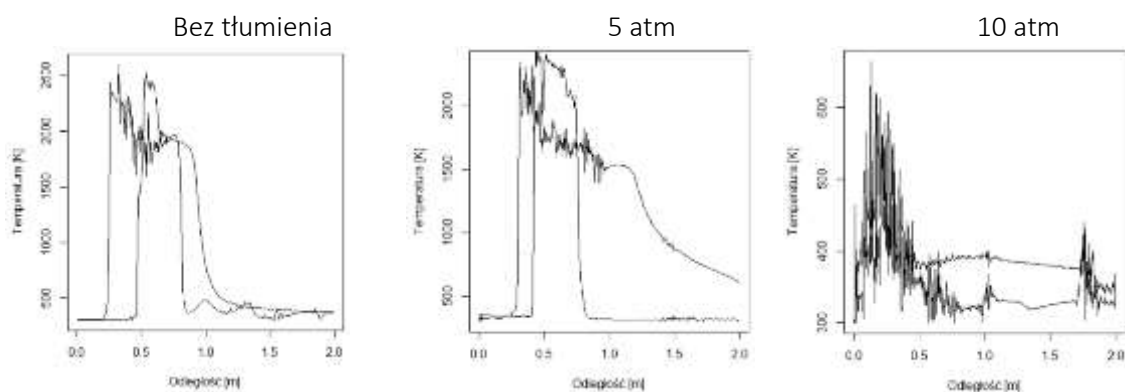
Rysunek 180 Wpływ inertnego medium pod ciśnieniem 5 atm na propagację płomienia

Rysunek poniżej przedstawia sekwencję obrazów przedstawiających propagację płomienia oraz wpływ mieszaniny gaszącej pod ciśnieniem 10 atmosfer.



Rysunek 181 Wpływ inertnego medium pod ciśnieniem 10 atm na propagację płomienia

Z przeprowadzonych badań numerycznych wynika, że materiał inertny uwolniony pod ciśnieniem 10 atmosfer w 100% wygasza wybuch mieszaniny stechiometrycznej propanu z powietrzem, natomiast przy ciśnieniu 5 atm. struktura płomienia zostaje tylko zaburzona co widać na wykresie przebiegów temperatur na rys. 40.



Rysunek 182 Profil temperatury płomienia w odległości 1 m oraz 8 m od zapłonu dla trzech przypadków: bez tłumienia, gaz inertny pod ciśnieniem 5 atm. oraz 10 atm

### 13.2. Instrukcja przygotowania symulacji numerycznej

- Otwieramy program IntexSoft
- Tworzymy geometrię dwu wymiarową

- Wybieramy odpowiednie warunki początkowe, brzegowe oraz odpowiednie modele
- Rozpoczynamy symulacje
- Zatrzymujemy symulacje
- Otwieramy folder, w którym jest zapisany przypadek obliczeniowy
- W folderze „system” otwieramy plik „setFieldsDict”, w którym dodajemy następującej linii kodu

```

regions
{
  // gas cloud
  cylinderToCell
  {
    p1 (0.0 0.0 -1); // start point on cylinder axis
    p2 (0.0 0.0 1); // end point on cylinder axis
    radius 4.15;
    fieldValues
    {
      volScalarFieldValue c 0.00
      volScalarFieldValue FH 0.0602
      volScalarFieldValue C3H8 0.0602
      volScalarFieldValue O2 0.2184
      volScalarFieldValue N2 0.7208
    }
  }

  // ignition
  cylinderToCell
  {
    p1 (0.0 1.4 -1); // start point on cylinder axis
    p2 (0.0 1.4 1); // end point on cylinder axis
    radius 0.05;
    fieldValues
    {
      volScalarFieldValue c 1.00
      volScalarFieldValue FH 0.0602
      volScalarFieldValue C3H8 0.0
      volScalarFieldValue O2 0.0
      volScalarFieldValue N2 0.838
      volScalarFieldValue CO2 0.109
      volScalarFieldValue H2O 0.057
      volScalarFieldValue T 1980.0
    }
  }

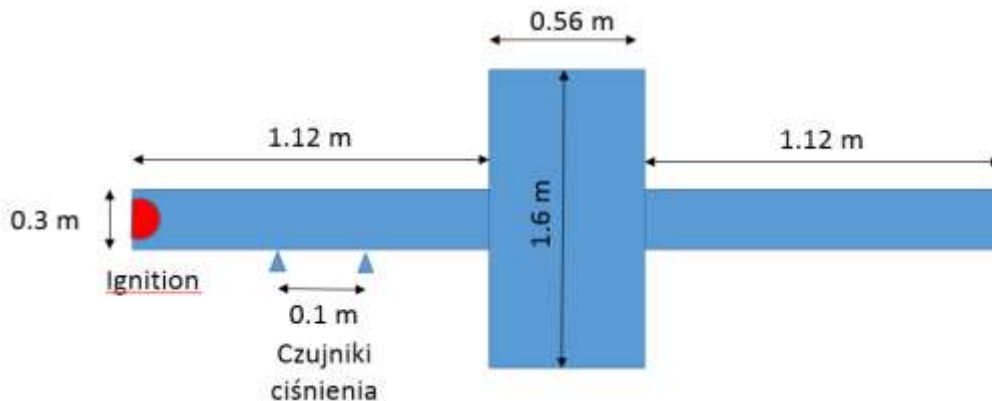
  // extinguisher
  boxToCell
  {
    box (2 0.9 -1) (3.0 1.9 1);
    fieldValues
    {
      volScalarFieldValue c 0.00
      volScalarFieldValue FH 0.0
      volScalarFieldValue C3H8 0.0
      volScalarFieldValue O2 0.0
      volScalarFieldValue N2 1.0
      volScalarFieldValue CO2 0.0
      volScalarFieldValue H2O 0.0
      volScalarFieldValue T 300.1
      volScalarFieldValue p 5e5
    }
  }
}

```

- W folderze głównym otwieramy terminal i wpisujemy komendę „setFields”
- Uruchamiamy symulację wpisując w terminalu komendę ddtFoamMZ

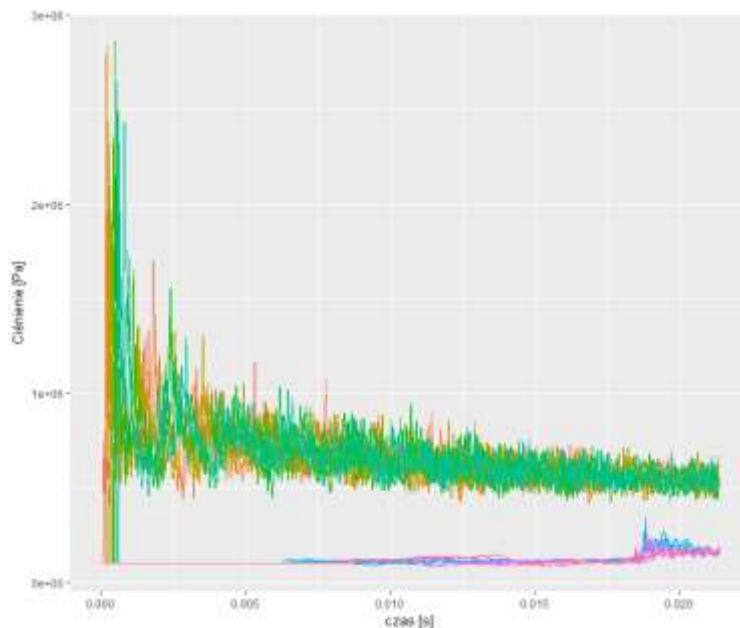
## 14. Symulacje numeryczne pasywnego tłumienia spalania detonacyjnego

Celem opracowania jest przedstawienie możliwości programu OpenFoam oraz opracowanej biblioteki w projekcie Intex do symulacji numerycznych pasywnego tłumienia detonacji. Badania numeryczne dotyczą mieszaniny stechiometrycznej propanu i powietrza. Domena obliczeniowa składa się z dwuwymiarowej siatki obliczeniowej, która stanowi wycinek rury o długości 20m, średnicy 0.30m oraz tłumik z przegrodami o długości 0.56m i średnicy 1.6m. Profil ciśnienia był mierzony przed tłumikiem oraz za tłumikiem w celu przedstawienia wygaszenia detonacji. Rozmieszczenie czujników w domenie obliczeniowej jest co 0.1m. Domena obliczeniowa została przedstawiona na rysunku poniżej.



Rysunek 183 Przyjęta domena obliczeniowa

Rysunek poniżej przedstawia profil ciśnienia wybuchu mierzony przed oraz za tłumikiem detonacyjnym.



Rysunek 184 Przebieg ciśnienia fali detonacyjnej przed tłumikiem oraz spalania deflagacyjnego za tłumikiem

Wykresy jednoznacznie wskazują na wytłumienie propagującej detonacji przez tłumik. Początkowe ciśnienie propagującej fali jest na poziomie 2.8 MPa, które zostało zredukowane do 0.24 MPa. Z profilu ciśnień wynika, że za tłumikiem występuje spalanie deflagacyjne.



## 15. Wersje instalacyjne programu Intexsoft oraz strona www projektu

### 15.1. Wstęp

IntexSoft jest programem do symulacji numerycznych spalania detonacyjnego w kanałach. Oprogramowania zostało stworzone w technologii Java Enterprise Edition. Silniki obliczeniowy stanowi otwarty kod OpenFoam gdzie znajdują się zdefiniowane schematy numeryczne do obliczeń równań Naviera-Stokesa dla płynów ściśliwych. SALOME jest narzędziem wykorzystanym do tworzenia geometrii oraz siatki obliczeniowej natomiast ParaView służy do wyświetlania wyników obliczeń. Program IntexSoft jest dystrybuowany razem z systemem operacyjnym CAELinux 2013 w postaci obrazu wirtualnej maszyny VIRTUALBOX.

Wersja instalacyjna programu IntexSoft jest dostępna na stronie <http://intexonline.pl/>. Niniejsze opracowanie przedstawia przygotowaną aplikację internetową umożliwiającą zainstalowanie IntexSoft na serwerze oraz pobieranie wersji instalacyjnych.

### 15.2. Funkcjonalność

Aplikacja dostarcza użytkownikowi następującą funkcjonalność:

- Możliwość pobrania instrukcji oraz wszelkich dokumentów technicznych związanych z programem IntexSoft
- Użytkownik otrzyma podstawowe informacje związane z przeprowadzonymi obliczeniami w programie IntexSoft
- Na stronie znajduje się lista artykułów, w których został zapisany proces walidacji oprogramowania wobec różnych mieszanin gazowych
- Użytkownik może za pomocą listy rozwijalnej wybrać dowolną mieszaninę i uzyskać wykres przedstawiający porównanie obliczeń z danymi eksperymentalnymi.
- Przycisk „Pobierz Aplikację „IntexSoft”” umożliwia użytkownikowi pobranie oprogramowania w postaci pliku CAELinuxIntex.ova. Plik stanowi obraz wirtualnej maszyny, na której jest zainstalowany system operacyjny CAELinux oraz stworzony program IntexSoft.

## 16. Wytworzone stanowiska badawcze oraz urządzenia

### 16.1. Stanowiska do badania aktywnych systemów tłumienia wybuchów w skali laboratoryjnej.

Stanowisko zbiornik sferyczny o objętości 1m<sup>3</sup> – stanowisko do badania aktywnych systemów wybuchu. Stanowisk zostało przedstawione na poniższych rysunkach.



Rysunek 185 Widok od frontu na stanowisko



Rysunek 186 Widok komory pyłowej przy otwartej pokrywie (widoczny układ mocowania zapłonu)

Zbiornik i zainstalowana armatura zostały wykonane ze stali kwasoodpornych. Posadowienie na wibroizolatorach nie wymaga kotwienia do podłoża. Dobre wyważenie daje duży komfort pracy w czasie wybuchu pyłu. Zbiornik nie przemieszcza się ani nie drży. Do zamykania zastosowano mechanizm bagietowy z obrotowym pierścieniem napędzanym siłownikiem pneumatycznym oraz uszczelką wargową zapewniającą kontrolę uszczelnienia przy zastosowanym innowacyjnym systemie zamykania pokrywy. Parametry zbiornika:

- objętość: 1000L,
- napięcie zasilania: 230 VAC,
- zasilanie pneumatyczne: 6-8 bar,
- masa: 1460kg,
- ciśnienie pracy: maks. 30bar,
- czujniki i blokady bezpieczeństwa.

a) Zbiornik sferyczny został wyposażony w niżej wymienione systemy: Zestaw dwóch układów dyspersyjnych do tworzenia atmosfery wybuchowej – mieszaniny pyłu powietrzem:

- układy wtrysku pyłu wykonano zgodnie z EN 14034,
- zbiornik ma objętość 5,4L. Ciśnienie wtrysku: 20 bar,
- zawór szybkiego wtrysku otwiera się w czasie poniżej 50ms.



Rysunek 187 Układ dyspersyjny

b) Układ sterowania zamykaniem pneumatycznym zbiornika oraz układ sterowania wtryskiem pyłu i zapłonem. Funkcje układu:

- otwieranie i zamykanie zbiornika,
- kontrola czujników bezpieczeństwa,
- wskazywanie stanów awaryjnych,
- wskazywanie stanów nieprawidłowej obsługi,
- sterowanie wtryskiem i zapłonem pyłu,
- przyłącze czujnika ciśnienia dynamicznego,
- akwizycja danych.



Rysunek 188 Pulpit sterowniczy

c) Układ bezpieczeństwa:

- czujnik domknięcia zamka bagnetowego i blokada pneumatyczna siłownikiem w pozycji „zamknięty”



Rysunek 189 Układ zabezpieczający przed przypadkowym otwarciem

- czujnik zamkniętej dennicy przedniej



Rysunek 190 Czujnik pełnego domknięcia dennicy

- blokada mechaniczna zamka bagnetowego w pozycji „zamknięty”,
- automatyczny zrzut ciśnienia w momencie otwierania blokady zamka bagnetowego



Rysunek 191 Czujnik pełnego domknięcia dennicy

d) Przyłącze kołnierzowe DN75 do gaśnicy HDR wykonane w osi poziomej zbiornika.



Rysunek 192 Przyłącze butli HRD

- e) Przyłącza czujników ciśnienia dynamicznego do detekcji wybuchu:
- dwa przyłącza wykonane co  $90^\circ$  skierowane do środka geometrycznego zbiornika.



Rysunek 193 Sposób mocowania czujnika ciśnienia dynamicznego

- f) Czujnik ciśnienia dynamicznego do rejestracji szybkich zmian ciśnienia w czasie rozpraszania pyłu i wybuchu



Rysunek 194 Mocowanie czujnika ciśnienia

- g) króciec zapłonu do instalacji główek zapalczych



Rysunek 195 Przyłącze do źródła zapłonu

## 16.2. Stanowisko do badań w przestrzeni hemisferycznej 150m<sup>3</sup> – drugie stanowisko do badania aktywnych systemów wybuchu.

W ramach prac wykonano następujące elementy:

- a) szkieletowa konstrukcja hemisferyczna pokrywana folią w celu budowy szczelnej przestrzeni hemisferycznej o objętości 150m<sup>3</sup>:

Szkielet wykonano z rur stalowych ocynkowanych. Montaż wykonywany jest przy pomocy śrub. Jako rusztowanie do montażu i pokrywania folią użyty zostanie zestaw rur i łączników KeeKlamp docelowo przeznaczony do montażu gaśnic HRD. W górnej części zamontowano wentylator do mieszania gazów wprowadzonych do wnętrza.

Konstrukcja hemisferyczna została zainstalowana i przygotowana do prób, dla SGSP, na poligonie w Nowym Dworze Mazowieckim.



Rysunek 196 Szkieletowa konstrukcja hemisferyczna

- b) zestaw armatury do napełniania namiotu gazem palnym z butli.
- c) układ sterownia zapłonem – włącznik zdalny.

d) układ do montażu gaśnic HRD, czujników wybuchu i króćca zapłonu gazu.

Do tego celu użyto łączników typu KeeKlamp i rur stalowych.

Gaśnice i czujniki można swobodnie rozmieszczać na ramie w różnych pozycjach w pionie i poziomie.



Rysunek 197 Układ do montowania systemu gaśniczego

### 16.3. Stanowisko do badania pasywnych systemów tłumienia wybuchów oraz inne urządzenia przewidziane w projekcie

Kanał detonacyjny o długości 20m – stanowisko do badania pasywnych systemów wybuchu.:

- materiał: stal kwasoodporna,
- kanał podzielony na sekcje: 3m – 6 szt., 1m – 1 szt., 0,5m – 2 szt.,
- przyłącza kołnierzowe,
- uszczelnienie: typu o-ring,
- materiał uszczelnień: Viton,
- maksymalne ciśnienie pracy: powyżej 80bar,
- średnica rury użytej do budowy:  $\varnothing 406,4 \times 20$  mm,
- kondycjonery do czujników firmy PCB Piezotronics, model 480C02,
- układ akwizycji danych zbudowany na komponentach firmy AdLink,
- częstotliwość pracy układu akwizycji danych do 10MHz



Rysunek 198 Szkieletowa konstrukcja hemisferyczna

- zamocowanie na ramie z komponentów Kee Klamp,
- otwory na czujniki ciśnienia i sondy jonizacyjne,
- czujniki ciśnienia dynamicznego firmy PCB Piezotronics, model 113B21,

Układ akwizycji danych szybkozmiennych:

Akwizycja danych z pomiarów jak i sterowanie procesem zapłonu mieszaniny gazowej w RD20 realizowane są pomocą szafy sterowniczej z układem wielokanałowych kart pomiarowych PCB, kondycjonerami sygnału, układem obliczeniowym). Szafa ma również zamontowany moduł do sterowania pracą i akwizycją danych z czujników ciśnienia i płomienia.



Rysunek 199 Układ danych szybkozmiennych

Układu do wizualizacji frontu fali typu Shadowgraph. W budowie układu Shadowgraph wykorzystano elementy istniejącego układu Schlieren. Zbudowano nową konstrukcję nośną i przebudowano układ tak aby mógł pracować w tych dwóch trybach. Układ został zainstalowany na istniejącej w CNBOP rurze detonacyjnej 9m. Do wizualizacji obrazu na ekranie użyto folie produkcji firmy 3M. Źródłem światła jest istniejący laser He-Ne. Obraz rejestrowany jest przez szybką kamerę firmy Photronics. W celu odseparowania zakłóceń optycznych w torze optycznym zainstalowano dodatkowy filtr interferencyjny o transmisji 70% i szerokości pasma=10nm dla  $\lambda=632\text{nm}$  (długość światła lasera). W ten sposób wyeliminowano dużą ilość zakłóceń pochodzących z widm emisyjnych reakcji spalania.



Rysunek 200 Układu do wizualizacji frontu fali typu Shadowgraph

#### Zestaw sond jonizacyjnych

Wykonano zestaw 10 sond jonizacyjnych.

Parametry:

- regulowany kąt elektrod w stosunku do korpusu,
- złoczone styki,
- napięcie zasilania: 5V DC,
- wyjście napięciowe do układu akwizycji danych.



Rysunek 201 Sonda jonizacyjna

#### Radar mikrofalowy

Wykonano 1 sztukę tego urządzenia.

Parametry:

Częstotliwość generowanej przez radar fali wynosi 24,150 GHz. Amplituda sygnału wyjściowego z głowicy zależy od energii fali odbitej od obiektu jaka dotrze do głowicy radarowej. Zależy od powierzchni, od której się fala odbija i odległość od przeszkody.

Napięcie wyjściowe z głowicy może się wahać od uV do ok. 30-50 mV.

Prędkość obiektu, od którego odbija się fala jest proporcjonalna do częstotliwości sygnału na wyjściu radaru (Gniazdo BNC) oblicza się zgodnie z zależnością:

$$F_d = 2v * (F_0/c) * \cos A,$$



Rysunek 202 Radar mikrofalowy

gdzie  $F_d$  to częstotliwość fali nośnej i wynosi 24,150 GHz, pozostałe:

$v$  – prędkość obiektu [m/s]

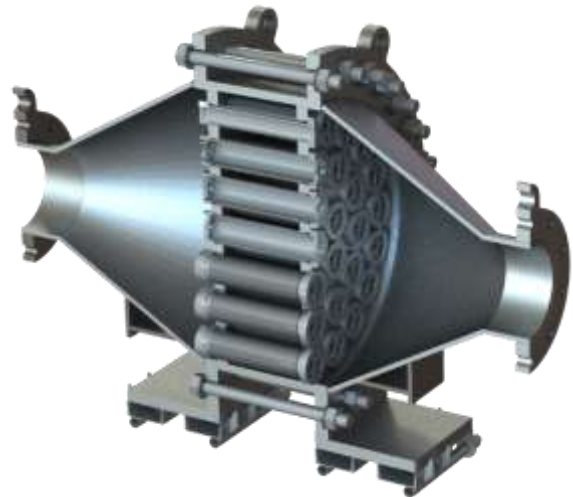
$c$  – prędkość światła [m/s]

$\cos A$  – cosinus kąta pod jakim odbija się fala od obiektu (w przypadku odbicia bezpośredniego od czoła fali (pod kątem 0) - wynosi 1).

#### 16.4. Pasywny system gaśniczy – tłumik wybuchu

Wykonano tłumik wybuchu – 1 szt.

- rozmiar został dopasowany do instalacji w kanale detonacyjnym 20m,
- materiał: stal kotłowa,
- obudowa odporna na ciśnienia wybuchu powyżej 60 bar,
- przyłącza kołnierzowe,
- uszczelnienie: uszczelki płaskie i typu o-ring.



Rysunek 203 Tłumik wybuchu (przekrój, rys. 3D)

Wewnętrzna konstrukcja składa się z grupy identycznych wkładów tłumiących w kształcie rury – 38 szt. Materiał stal kwasoodporna. Każda z rur wypełniana układem siatek oraz stalowymi kulkami. Wypełnieniem może być również dowolny inny materiał tłumiący wybuch co umożliwia prowadzenie wielu różnych prac badawczych w przyszłości



Rysunek 204 Wkłady tłumika (widok ogólny, przekrój, rys. 3D)

#### 16.5. Elementy aktywnego systemu gaśniczego – system HRD

W ramach prac objętych umową wykonano system aktywnego tłumienia wybuchu składający się z następujących elementów:

- czujnik ciśnienia wybuchu,
- centrala sterowania,
- gaśnice HRD.

Czujniki ciśnienia wybuchu – 2 szt.

Parametry:

- hermetyczna obudowa dostosowana do montażu na kołnierzach przyszlých elementów systemów gaśniczych i demonstratorów,
- materiał obudowy: stal kwasoodporna,
- średnica kołnierza i rury króćca zbiornika badawczego: DN75,
- ustawiany wewnątrz czujnika próg czułości ciśnienia aktywacji Pa w zakresie 5 - 50kPa,
- wbudowane podwójne czujniki ciśnienia dynamicznego PCB Piezotronics 113B26 połączone z układem zasilaczy prądowych i układem analizy sygnału wybuchu,
- wbudowane układy wyjściowe pozwalające na pracę z centralą sterującą w odległości do 100m,
- komunikacja: Ethernet



Rysunek 205 Układ czujnika ciśnienia (rys. 3D)



Rysunek 206 Widok powierzchni czujnika ciśnienia dynamicznego, mający na który oddziałuje fala ciśnienia

Centrala Sterowania CIE

W ramach prac objętych umową wykonano 1 sztukę

Parametry:

- konstrukcja modułowa, kasetowa, łatwa do przenoszenia i instalacji,
- zasilanie 230VAC,
- pobór mocy: 500VA max,
- ilość modułów wejścia dla czujników: 2,
- ilość modułów wyjściowych sterujących gaśnicami HDR: 2,
- autodiagnostyka,
- sygnalizacja błędów,
- komunikacja z PC,
- możliwość zdalnego raportowania zdarzeń,



Rysunek 207 Widok panelu sterowania centrali CIE

Gaśnice HRD

Wykonano dwie gaśnice HRD. Każda posiada zbiornik o poj. 5L i 20L, który będzie używany w zależności od planowanych badań. Po wykryciu sygnału aktywacji gaśnica otwiera się i wyrzuca zawarty wewnątrz proszek w czasie <100ms. Gaśnica aktywowana jest sygnałem 24VDC. Czynnikiem inicjującym jest główka zapalczą produkcji Nitroerg, o mocy 2kJ. Gazy wypychają tłok podpierający mechanizm zamykający pozostający dowolnie długo w stanie równowagi stabilnej. Otwarcie tłoka jest bardzo szybkie – w czasie poniżej 8 ms.



Rysunek 208 Gaśnica HRD z przyłączem sterującym



Gazy główki zapalczej i stałe produkty spalania zostają zatrzymane w hermetycznej osłonie i nie mają kontaktu z otoczeniem.

Ciśnienie pochodzące od główki jest bardzo niskie. Mierzone w obudowie wynosi  $p_{\max} < 0,3$  bar i w krótkim czasie po schłodzeniu gazu spada do wartości bliskiej ciśnieniu atmosferycznemu.

Dysze dyspersyjne do gaśnic HDR – 2 szt.

Materiał: stal kwasoodporna.

Po otwarciu gaśnicy HRD, proszek gaśniczy uwolniony jest do przestrzeni, w której rozwija się wybuch. Kształt otworów dyszy dyspersyjnej dobrano tak aby proszek rozchodził się równomiernie w przestrzeni zamkniętej z największą efektywnością



Rysunek 209 Dysza gaśnicy HRD