

## **Załącznik 2**

**Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych,  
w szczególności określonych w art. 16 ust. 2 ustawy o stopniach  
naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki**

**Rafał Porowski**

Szkoła Główna Służby Pożarniczej  
Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

23 kwietnia 2018 r.

## Spis treści

<b>1. Imię i nazwisko</b>	3
<b>2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe</b>	3
<b>3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych</b>	3
<b>4. Wskazanie osiągnięcia naukowego</b>	4
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	4
4.2. Omówienie celu naukowego pracy i osiągniętych wyników wraz z ich ewentualnym wykorzystaniem	5
4.2.1. Wprowadzenie	5
4.2.2. Mechanizmy powstawania wybranych zjawisk uwolnień substancji palnych	6
4.2.3. Metody ograniczania skutków uwolnień substancji palnych	20
4.2.4. Modelowanie numeryczne uwolnień substancji palnych	33
4.3. Podsumowanie	39
<b>5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych</b>	40

**1. Imię i nazwisko**

Rafał Porowski

**2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe**

- 2014: Studia podyplomowe pt. „Energetyka Jądrowa” na Wydziale Mechanicznym, Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska.
- 2013: Doktor nauk technicznych w dyscyplinie Energetyka, nadany przez Radę Wydziału Mechanicznego, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Temat rozprawy doktorskiej: „Badanie przejścia od spalania deflagacyjnego do detonacyjnego w mieszaninach metanowo-wodorowo-powietrznych”. Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk.
- 2008: Studia podyplomowe pt. „Hydrogen safety engineering”, University of Ulster, Belfast, Irlandia Północna.
- 2004: Magister na kierunku bezpieczeństwo narodowe, Wydział Strategiczno-Obronny, Akademia Obrony Narodowej w Warszawie.
- 2002: Inżynier na kierunku Inżynieria bezpieczeństwa pożarowego, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie.

**3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych**

- 01.2015 - obecnie – Adiunkt. Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Szkoła Główna Służby Pożarniczej w Warszawie.
- 02.2014 – obecnie – Adiunkt (0,5 etatu). Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska.
- 01.2011 – 12.2014 – Kierownik Zespołu Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości (Akredytacja PCA: 1280). Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwożarowej - Państwowy Instytut Badawczy w Józefowie.
- 10.2006 – 06.2010 – Doktorant. Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska.

#### 4. Wskazanie osiągnięcia naukowego

##### 4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

###### **Awaryjne uwolnienia substancji palnych do środowiska**

Monografia, Wydawnictwo Szkoły Głównej Służby Pożarniczej, Warszawa, 2017r.

ISBN: 978-83-88446-86-3

Recenzje wydawnicze monografii zostały opracowane przez:

- **dr hab. Marek Konecki, prof. SGSP**, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Szkoła Główna Służby Pożarniczej.
- **dr hab. inż. Witold Nocoń**, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Politechnika Śląska.



Osiągnięcie habilitacyjne przedstawione zostało w postaci monografii pt. „Awaryjne uwolnienia substancji palnych do środowiska”, opisującej dorobek naukowy autora na podstawie przeprowadzonych w latach 2012-2017 badań doświadczalnych oraz obliczeń i symulacji numerycznych w odniesieniu do teorii oraz zgłębianych w inżynierii środowiska zagadnień merytorycznych. Powszechnie wiadomo, że nierozłącznym elementem antropogenicznych zanieczyszczeń środowiska w wyniku prowadzenia procesów technologicznych w przemyśle, jest powstawanie stanów awaryjnych, które w konsekwencji mogą doprowadzić do awaryjnego uwolnienia substancji niebezpiecznych, w tym palnych do środowiska. Oczywiście zatem

wyduje się fakt, że zjawisko uwolnienia substancji palnych do środowiska stanowi jeden z zasadniczych problemów inżynierii środowiska w kontekście bezpieczeństwa ekologicznego poprzez zachowanie bezpiecznych warunków składowania, produkcji oraz przetwarzania, a także transportu substancji niebezpiecznych. Na potrzeby monografii, stanowiącej osiągnięcie naukowe w rozumieniu postępowania habilitacyjnego, zakres szeroko pojętego uwolnienia substancji niebezpiecznych został ograniczony tylko do substancji palnych oraz związanych z tym zjawisk takich jak pożary, czy wybuchy wraz z ich oddziaływaniem na środowisko, jak również określeniem metod i sposobów ich ograniczania. Mechanizm uwolnienia substancji palnych definiowany jest na potrzeby tej monografii jako sekwencja zjawisk powiązanych ze sobą w celu dokonania identyfikacji uwolnienia substancji palnych oraz oceny dynamiki przebiegu tego zjawiska. W analizach ryzyka instalacji przemysłowych przedmiotową sekwencję zjawisk określa się mianem scenariusza awaryjnego, a jego konsekwencje przedstawia się w postaci wyników obliczeń numerycznych, czy zaawansowanych symulacji komputerowych w zakresie oddziaływania skutków pożarów lub wybuchów na ludzi, środowisko naturalne, czy też konstrukcje przemysłowe oraz obiekty budowlane.

Mysłą przewodnią towarzyszącą tej monografii jest zatem próba odpowiedzi na pytania, które pojawiają się w związku z tym, że aby skutecznie ograniczyć zanieczyszczenia środowiska spowodowane przez pożary, czy wybuchy substancji palnych, należy szczegółowo poznać procesy zachodzące przy powstawaniu tego typu zjawisk. Ma to zatem bezpośredni związek z dyscypliną nauki, jaką jest inżynieria środowiska. Warto w tym miejscu dodatkowo podkreślić, że zjawiska, o których tu mowa powstają podczas awaryjnych stanów pracy instalacji procesowych, dlatego też uwolnienia substancji palnych opisane w monografii na potrzeby postępowania habilitacyjnego, to tzw. uwolnienia awaryjne, których konsekwencje prowadzą do negatywnego oddziaływania na środowisko.

## **4.2. Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z ich ewentualnym wykorzystaniem**

### **4.2.1. Wprowadzenie**

Celem tej monografii jest próba podsumowania dorobku naukowego autora na podstawie przeprowadzonych prac badawczych w okresie 2012-2017, wraz z opisem najważniejszych badań doświadczalnych oraz symulacji numerycznych w obszarze awaryjnych uwolnień substancji palnych, w tym pożarów i wybuchów oraz metod ograniczania tego typu uwolnień do środowiska, którym niewątpliwie jest zarówno środowisko naturalne, w tym m.in. powietrze,

jak również bezpośrednie otoczenie miejsc pracy, jako tzw. środowisko pracy. Monografia ta, stanowiąca zatem osiągnięcie naukowe na potrzeby postępowania habilitacyjnego, składa się z sześciu głównych rozdziałów, w tym wprowadzenia opisującego podstawy zjawisk dotyczących uwolnienia substancji palnych w kontekście inżynierii środowiska, przeglądu wybranych zdarzeń w przemyśle, podczas których doszło do oddziaływania substancji palnych na środowisko, oceny emisji zanieczyszczeń do środowiska w wyniku spalania substancji, analizy procesów powstawania pewnych krytycznych zjawisk związanych z uwolnieniem substancji palnych do środowiska, w tym samozapłon wodoru, rozkład cząstek dymu podczas spalania różnych materiałów oraz wybuchy par cieczy palnych i detonacje w mieszaninach gazowych. Dodatkowo, przedstawiono kilka metod i sposobów ograniczania skutków uwolnień substancji palnych, jak również przegląd metod modelowania numerycznego przebiegu uwolnień substancji palnych do środowiska w postaci pożarów oraz wybuchów. Monografię kończy rozdział zawierający podsumowanie zaprezentowanych wyników badań oraz wnioski, jak również bibliografia.

#### **4.2.2. Mechanizmy powstawania wybranych zjawisk uwolnień substancji palnych**

W przedmiotowej monografii przedstawiono analizę wybranych, tzw. krytycznych zjawisk towarzyszących awaryjnym uwolnieniom substancji palnych do środowiska. Słowo „krytyczne” odzwierciedla tu potrzebę szczególnego zwrócenia uwagi na te zjawiska w związku z ich nietypowym przebiegiem, interesującym mechanizmem powstawania, jak również niebezpiecznymi dla ludzi i środowiska naturalnego skutkami tego typu zjawisk. W analizach ryzyka wykonywanych na potrzeby bezpieczeństwa instalacji przemysłowych, zazwyczaj tego typu zjawiska są pomijane z uwagi zarówno na brak dostatecznej wiedzy na ich temat, jak również skutki generowane przez większość z tych zjawisk. W związku z tym, autor dokonał głębszego zbadania tego rodzaju zjawisk, które mogą powstać jako potencjalny scenariusz awaryjny, podczas użytkowania substancji palnych w warunkach przemysłowych oraz ich oddziaływania na środowisko.

##### **4.2.2.1. Rozkład cząstek dymu podczas pożarów**

Rozkład termiczny oraz spalanie materiałów stanowi wieloetapowy proces przemian fizykochemicznych. Całość procesu rozpoczyna się w momencie podgrzania materiału, jak to ma miejsce na przykładzie tworzyw sztucznych. Pierwszą warstwą materiału narażoną na działanie energii cieplnej generowanej przez zewnętrzne źródło zapalenia jest powierzchniowa warstwa, nazywana warstwą rozkładu. Wzrost temperatury we wspomnianej warstwie inicjuje degradację,



destrukcję, bądź depolimeryzację tworzywa. Przebieg procesów uzależniony jest od budowy strukturalnej materiału. Obecność tlenu powoduje przyspieszenie tych procesów, a możliwość przegrupowań atomów oraz tworzenie struktur aromatycznych przyczynia się do powstawania coraz większej ilości dymu. O ilości wydzielonego dymu podczas procesu, decyduje budowa chemiczna spalanych związków, rodzaj spalania, warunki wytwarzania dymu oraz zastosowane środki ogniochronne. Do przeprowadzenia badań doświadczalnych w zakresie rozkładu cząstek dymu podczas pożarów wykorzystano stanowisko pomiarowe, przedstawione na Rysunku 1.



**Rysunek 1.** Komora spalania do badań rozkładu cząstek dymu podczas spalania płomieniowego oraz bezpłomieniowego różnych materiałów palnych

Materiał palny (drewniane deseczki) umieszczono na metalowej tacy, która znajdowała się w komorze spalania posiadającej wymiary 1,2 m x 1,2 m x 1,2 m. Układ wentylacji umożliwiał regulowanie prędkości przepływu powietrza od 0,2 m/s do 7 m/s. Powietrze do komory spalania dostawało się poprzez otwór zasysający, a następnie przechodziło przez prostownicę powietrza, którą umiejscowiono po przeciwnej stronie początku tunelu pomiarowego. Powietrze przepływające przez prostownicę zmieniało charakter przepływu z turbulentnego na laminarny. Przechodząc przez miejsce, gdzie znajdują się cząstki dymu, powietrze zabierało je ze sobą do tunelu pomiarowego. W trakcie badania rozkładu cząstek dymu podczas spalania płomieniowego przy założonej prędkości przepływu powietrza wykonano 39 pomiarów (po 3 próby dla każdej z 13 prędkości przepływu powietrza). Po przeprowadzeniu badań oraz wyliczeniu średniego rozkładu cząstek, a także średniego czasu detekcji dla każdej z prędkości przepływu powietrza, wyciągnięto następujące wnioski:

- Wraz ze wzrostem prędkości przepływu powietrza maleje ilość wykrywanych cząstek każdej średnicy. Największy przeskok w ilości wykrywanych cząstek widoczny jest pomiędzy przepływami 0,2 m/s oraz 0,5 m/s.

- Dla każdej z 13 badanych prędkości przepływu powietrza, niezmiennie największą ich część stanowiły cząstki o średnicach od 1,69 do 3,21  $\mu\text{m}$ . Najwięcej było ich podczas przepływu 0,2 m/s (17020), a najmniej przy przepływie 5,5 m/s (1580).
- Dla każdej z 13 badanych prędkości przepływu powietrza wraz ze wzrostem średnicy cząstek - począwszy od średnicy 3,21  $\mu\text{m}$  - w sposób regularny maleje liczba cząstek.
- Wzrost przepływu powietrza powoduje utrudnianie detekcji zastosowanych czujek dymu. Dla kilku pierwszych prędkości wynosił on średnio około 20 sekund, natomiast począwszy od prędkości 4 m/s zaczęły pojawiać się przypadki braku detekcji w czasie pierwszych 300 s. Dla prędkości 5,5 m/s oraz 6 m/s nie doszło do detekcji w żadnej z wykonanych prób.

#### 4.2.2.2. Zapłon i wybuch mieszanin pyłowych

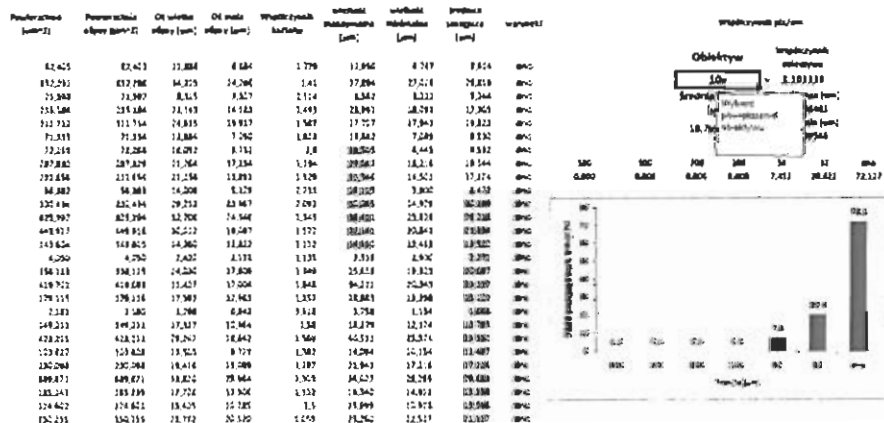
Konsekwencją awaryjnego uwolnienia substancji palnych w postaci proszków lub pyłów do środowiska może być również zjawisko wybuchu pyłowego, które jest bardzo podobne do wybuchu gazów, jednakże mimo wszystko istnieje kilka znaczących różnic pomiędzy nimi. Zagrożenie wybuchem pyłów w przemyśle pojawić się może praktycznie w każdym przypadku, gdzie występuje pył palny. Pyły palne stwarzają zagrożenie wybuchem poprzez:

- tworzenie się mieszanin pyłowo-powietrznych ze źródła uwolnienia pyłów palnych,
- powstanie warstwy pyłu, która może ulec zapłonowi w wyniku samonagrzewania, a następnie zapalona warstwa pyłu może odgrywać rolę źródła zapłonu do kolejnych wybuchów.

Wybuchowość pyłów jest znacznie związana z rozmiarem cząstek pyłu. Rozmiar cząstek pyłu jest zazwyczaj zamiennie określany jako ekwiwalent średnicy cząstek. Chociaż cząstki pyłów o średnicy większej niż 500  $\mu\text{m}$  ulegają procesowi spalania, to prawdopodobieństwo wytworzenia przez nie mieszaniny wybuchowej jest małe. Z drugiej jednak strony ograniczenie (zmniejszenie) rozmiaru cząstek poniżej ok. 50-74  $\mu\text{m}$  nie wpływa na zwiększenie właściwości wybuchowych. Średnica cząstek pyłów wykorzystywana do badań nad właściwościami wybuchowymi pyłów zazwyczaj nie przekracza 75  $\mu\text{m}$ . Badanie parametrów wybuchowości pyłów jest jednym z zasadniczych kierunków rozwoju inżynierii środowiska oraz laboratoriów badawczych zapewniających pomiary środowiskowe w przedmiotowym zakresie. Podstawowym sposobem określania ziarnistości pyłów poddawanych badaniom jest analiza sitowa na sucho, wykonywana według zaleceń standardu PN-ISO 2591-1. Nie jest to jednak metoda tania, bo wymagająca wydania jednorazowo od kilku do kilkunastu tysięcy złotych. Niestety, z uwagi na bardzo zróżnicowane właściwości pyłów, z którymi pracownicy laboratorium mają do czynienia,



jej miarodajność jest niezadowalająca. Dlatego też, opracowana przeze mnie metoda badania ziarnistości pyłów oparta jest na analizie cyfrowej obrazu cząstek pyłu wykonanych pod mikroskopem. Do analizy zaadaptowano mikroskop laboratoryjny, aparat cyfrowy oraz komputer z zainstalowanym oprogramowaniem, pozwalającym na wyświetlanie obrazu z aparatu. Aparat podłączono do mikroskopu za pomocą specjalnego adaptera. Metoda badania ziarnistości pyłów palnych z wykorzystaniem mikroskopu oraz oprogramowania do analizy cyfrowej okazała się niewystarczająco dokładna, a zarazem zbyt czasochłonna, aby móc stosować ją jako narzędzie autonomiczne. W przypadku pyłów mających skłonności do aglomeracji problemem jest przygotowanie próbki w taki sposób, aby materiał ułożył się pod mikroskopem nie tworząc skupiska. Badanie wszystkich rodzajów pyłu wykazało duże różnice w wynikach. Zależnością występującą we wszystkich badaniach było wykazywanie istnienia na odsiewach z konkretnych sit materiału o ziarnach, które powinny zatrzymać się na sicie o większych oczkach. Spowodowane jest to przede wszystkim stosowaniem dwóch sposobów obliczania średnic poszczególnych ziaren. Jak wspomniano wcześniej, w analizie sitowej badane są średnice sitowe cząstek, natomiast w analizie cyfrowej, z wykorzystaniem dostępnych narzędzi, średnicę projekcyjną. Są to różnice spowodowane przede wszystkim możliwością podglądu ziaren jedynie w dwóch wymiarach. Ziarna o strukturze płatkowatej, takie jak chociażby pył aluminiowy znajdują drogę przez kwadratowe oczka sit, wykorzystując nieznanym obserwatorowi trzeci wymiar - grubość. Idąc dalej w tym kierunku można pokusić się również o określenie dobieranego empirycznie współczynnika, wynikającego z kształtu cząstek. Materiałem przydatnym w opracowaniu tego typu metody byłyby z pewnością inne parametry poszczególnych cząstek podawane przez program Image-J, takie jak współczynnik okrągłości, średnica Fereta, czy dopasowana elipsa.

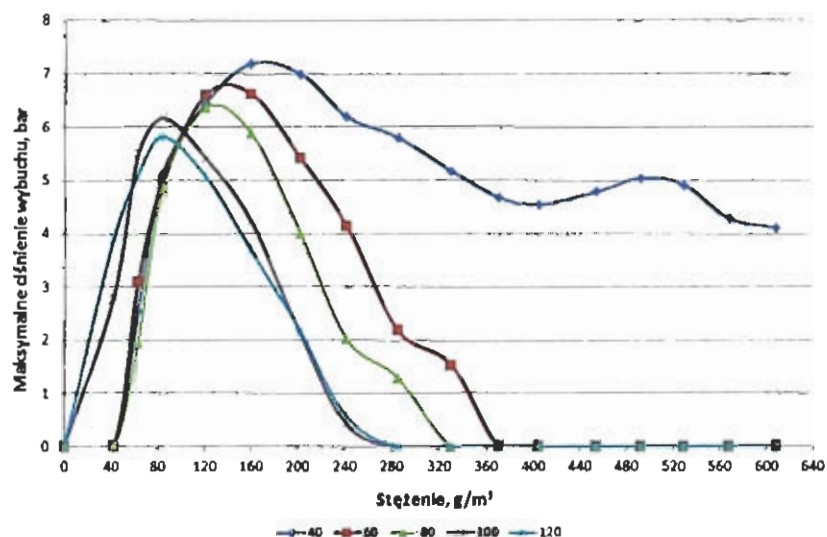


Rysunek 2. Obliczone wartości pikseli na mikrometry oraz wynik w postaci histogramu ziarnistości

Niewiadomą jednak pozostanie trzeci wymiar ziarna, do określenia którego metoda mikroskopowa nie jest wystarczająca. Z drugiej strony, cząstki pyłu likopodium wydają się podobne kształtem do kuli, a mimo wszystko wyniki analizy cyfrowej wychodzą zawyżone, w stosunku do analizy sitowej. Reasumując można stwierdzić iż analiza cyfrowa znajdzie zastosowanie jako proces wspomagania analizy sitowej, pomagający dobrać wystarczającą liczbę sit oraz odpowiednie wartości nasypowe badanego pyłu.

#### **4.2.2.3. Wybuch par cieczy w podwyższonych temperaturach**

Podczas awaryjnego uwolnienia substancji palnych do środowiska, istotnym jest właściwa wiedza w zakresie tego, czy dana substancja palna przykładowo gaz lub ciecz, będzie zdolna do zapłonu, a jeśli tak, to w jakim zakresie stężeń możliwy będzie zapłon takiej substancji. Na to pytanie odpowiedzi udziela wiedza w zakresie granic wybuchowości. W tej części opisywanej tu monografii przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych w zakresie granic wybuchowości wybranych par cieczy palnych, zmierzonego ciśnienia wybuchu, jak również wpływu temperatury początkowej uwolnienia substancji na granice wybuchowości. Do badania granic wybuchowości par cieczy palnych zastosowano stanowisko badawcze, składające się z komory badawczej, układu zapłonu, urządzenia do przygotowania mieszanin, systemu pomiaru ciśnienia oraz temperatury wraz z oprzyrządowaniem. Komorę badawczą stanowi zbiornik sferyczny o objętości 20-litrów, wykonany ze stali nierdzewnej oraz odporny na wysokie ciśnienie i korozję pod wpływem oddziaływania produktów spalania. Badaniom poddano łącznie 4 ciecze, tj. metanol, etanol oraz 1-butanolu oraz 2-butanolu w różnych stężeniach oraz w podwyższonych temperaturach początkowych, tj. 40, 60, 80, 100 i 120°C. Wykonano próby dla każdej cieczy przy zadanej temperaturze początkowej, przy ustalonym stężeniu oraz pod ciśnieniem wewnątrz zbiornika badawczego równym ciśnieniu atmosferycznemu. Na Rysunku 3 przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych nad granicami wybuchowości.

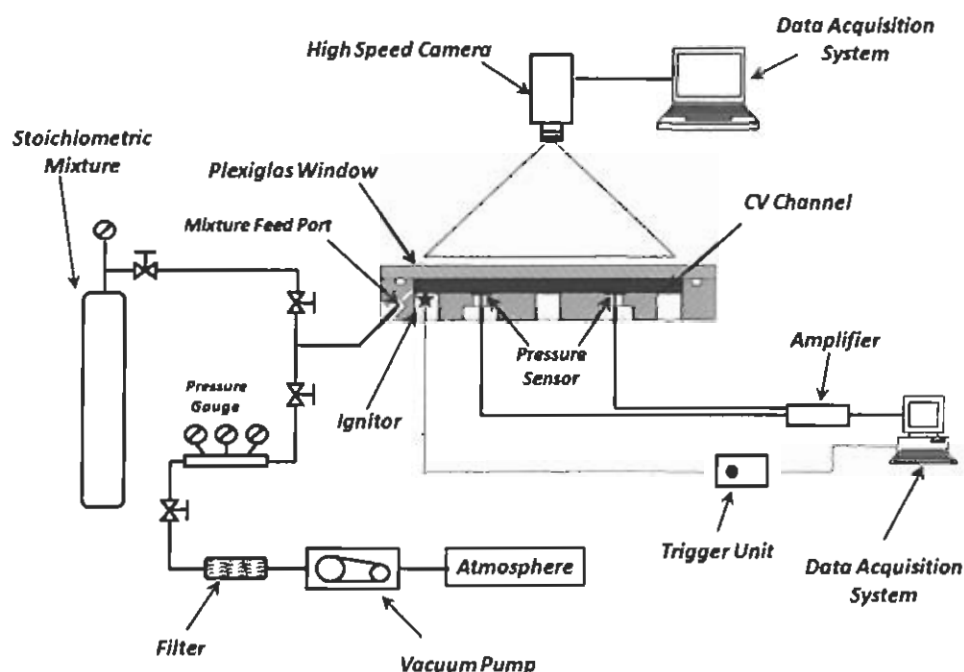


**Rysunek 3.** Granice wybuchowości etanolu w podwyższonych temperaturach

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych stwierdzono, że w przypadku etanolu wyraźnie wzrost temperatury początkowej podczas parowania obniżał zdolności cieczy do tworzenia mieszaniny wybuchowej z powietrzem. Przy wzroście temperatury z 40°C do 60°C pojawienie się górnej granicy wybuchowości zaobserwowano przy 330 g/m<sup>3</sup>. W przypadku metanolu zanotowano spadek przyrostu ciśnienia wraz ze wzrostem temperatury. Dla stężenia 540 g/m<sup>3</sup> wzrost temperatury z 40°C do 60°C spowodował pięciokrotny spadek przyrostu ciśnienia. Z kolei 1-butanol okazał się mało podatny na zmiany temperatury. Jego dolna granica została obniżona wraz ze wzrostem temperatury. Dla 1-butanolu dolna granica wybuchowości wynosiła ok. 40 g/m<sup>3</sup> w warunkach temperatury początkowej 60°C oraz 80°C, podczas gdy dla 40°C wynosiła ona tylko 20 g/m<sup>3</sup>. Dla 2-butanolu wpływ temperatury na górną granicę wybuchowości był wyraźnie zauważalny. W 40°C nie osiągnięto górnej granicy wybuchowości, aż do osiągnięcia stężenia 600 g/m<sup>3</sup>. Zwiększenie temperatury do 60°C, a następnie do 80°C pozwoliło wyznaczyć górną granicę wybuchowości kolejno w 420 g/m<sup>3</sup> oraz w 300 g/m<sup>3</sup>. Dolna granica wybuchowości 2-butanolu wzrosła do 40 g/m<sup>3</sup> w 80°C z 20 g/m<sup>3</sup> w 60°C. Odnosząc się do wyższych temperatur początkowych, rzędu 100-120°C należy stwierdzić, że wszystkie badane ciecze palne wykazały zawężenie granic wybuchowości względem niższych wartości temperatur początkowych. W praktyce oznacza to, że w procesach technologicznych, w których badane ciecze palne stosowane są w temperaturach powyżej 100°C, należy spodziewać się węższych zakresów stężeń ich par w powietrzu, w których ciecze te będą tworzyć atmosfery wybuchowe.

#### 4.2.2.4. Propagacja płomienia w gazach

Podczas awaryjnego uwolnienia substancji palnej do środowiska i w konsekwencji zapłonu oraz wybuchu, istotnym z punktu widzenia oszacowania oddziaływania tego zjawiska na środowisko jest posiadanie wiedzy na temat prędkości propagacji płomienia w uwolnionej chmurze substancji palnej. Dodatkowo, wiedza ta, na podstawie prowadzonych badań doświadczalnych, pozwala na opracowanie i walidację dostępnych modeli numerycznych do szacowania skutków wybuchów, na potrzeby analiz ryzyka w instalacjach procesowych. Dlatego też, aby poprawnie móc oszacować oddziaływanie tego typu zjawisk podczas awaryjnego uwolnienia substancji palnych do środowiska, poniżej przedstawiono wyniki badań doświadczalnych w zakresie propagacji płomienia podczas spalania wybranych mieszanin gazowo-powietrznych. Badania doświadczalne przeprowadzono w kanale o wymiarach 200 mm x 20 mm, przy użyciu stechiometrycznych mieszanin gazowych, takich jak wodór-powietrze, metan-powietrze i propan powietrze. W celu zapewnienia rejestracji prędkości propagacji płomienia front kanału pomiarowego wyposażony był w ściankę z przezroczystego tworzywa sztucznego, typu plexiglas. Do rejestracji propagacji płomienia zastosowano szybką kamerę cyfrową. Objętość kanału pomiarowego wynosiła 40 cm<sup>3</sup>. Na Rysunku 4 przedstawiono schemat stanowiska badawczego.



Rysunek 4. Schemat stanowiska badawczego do pomiaru propagacji płomienia

Przeprowadzone badania doświadczalne dostarczają wiedzy technicznej w zakresie prędkości propagacji płomienia dla stechiometrycznych mieszanin wodorowo-powietrznych, metanowo-powietrznych oraz propanowo-powietrznych. Dzięki zmierzonemu ciśnieniu wybuchu oraz zarejestrowanej prędkości propagacji płomienia możliwe jest dokonanie walidacji powszechnie stosowanych modeli numerycznych do szacowania skutków wybuchów mieszanin gazowych na środowisko. Przedmiotowe badania doświadczalne dobrze zatem wpisują się w problematykę inżynierii środowiska, dostarczając niezbędnej wiedzy badawczej w obszarze awaryjnych uwolnień substancji palnych do środowiska.

#### 4.2.2.5. Przejście do detonacji w uwarstwionej mieszaninie wodoru

Badania doświadczalne w zakresie detonacji w mieszaninach wodorowo-powietrznych przeprowadzono przy współpracy Karlsruhe Institute of Technology w Niemczech w ramach projektu europejskiego pod nazwą LACOMECO, przy wykorzystaniu unikatowego wielkoskalowego stanowiska badawczego o nazwie HYKA A1. Stanowisko to składało się z kanału badawczego o przekroju prostokątnym o wymiarach  $9 \times 3 \times 0.6$  m. Kanał ten został umieszczony w cylindrycznym zbiorniku o objętości  $100 \text{ m}^3$ . Rysunek 5 przedstawia fotografię stanowiska, w którym przeprowadzono pomiary parametrów detonacji w uwarstwionej mieszaninie wodoru z powietrzem.

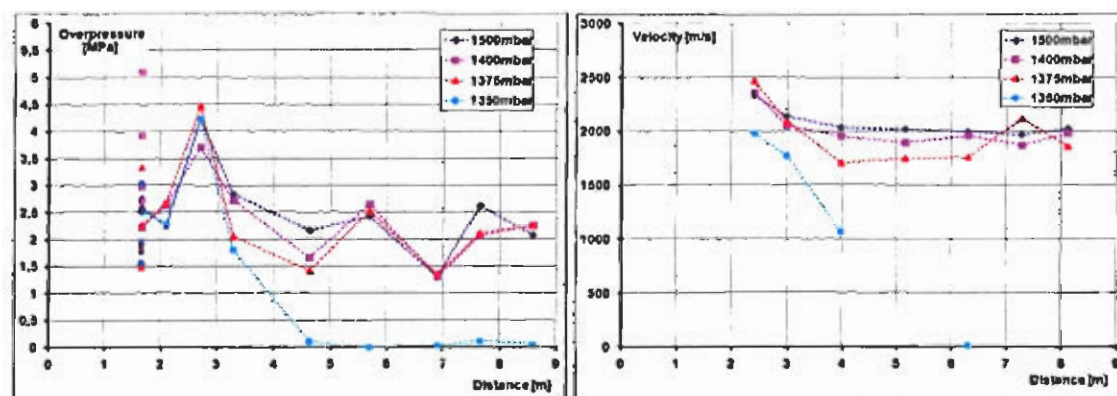


**Rysunek 5.** Fotografie obrazujące unikatowe wielkoskalowe stanowisko badawcze HYKA A1 w Karlsruhe Institute of Technology w Niemczech do pomiaru parametrów detonacji w uwarstwionych mieszaninach wodorowych

Do kanału pomiarowego podawano stechiometryczną mieszaninę wodorowo-powietrzną z jednego końca, powodując jej rozprzestrzenianie się w kierunku otwartej części kanału. Podawanie mieszaniny wodorowo-powietrznej kontynuowano do momentu, gdy czujniki stężenia wodoru nie wykazały istotnych zmian w otwartej części kanału pomiarowego.



W przypadku niejednorodnych mieszanin wodorowo-powietrznych, widoczne jest, że przy ciśnieniu początkowym wynoszącym 1350 mbar, fala detonacyjna nie rozprzestrzeniła się do sekcji pomiarowej kanału. Zakłada się zatem, że krytyczne warunki do propagacji detonacji uzyskano w przypadku badań przy ciśnieniu początkowym 1375 mbar. Na podstawie badań oraz późniejszych obliczeń, oszacowano, że gradient stężenia wodoru dla warunków krytycznych do propagacji detonacji był równy w przybliżeniu  $-1,1 \%H_2/cm$ , a górne stężenie wodoru wynosiło 26%. Kolejne badania doświadczalne przeprowadzono w celu określenia minimalnego stężenia wodoru w mieszaninie uwarstwionej, przy którym fala detonacyjna nie będzie się rozprzestrzeniała. W celu określenia grubości warstwy podczas propagacji detonacji, w badaniach doświadczalnych zastosowano 14 dodatkowych okopconych sadzą folii blaszanych zamontowanych na ściankach kanału pomiarowego.



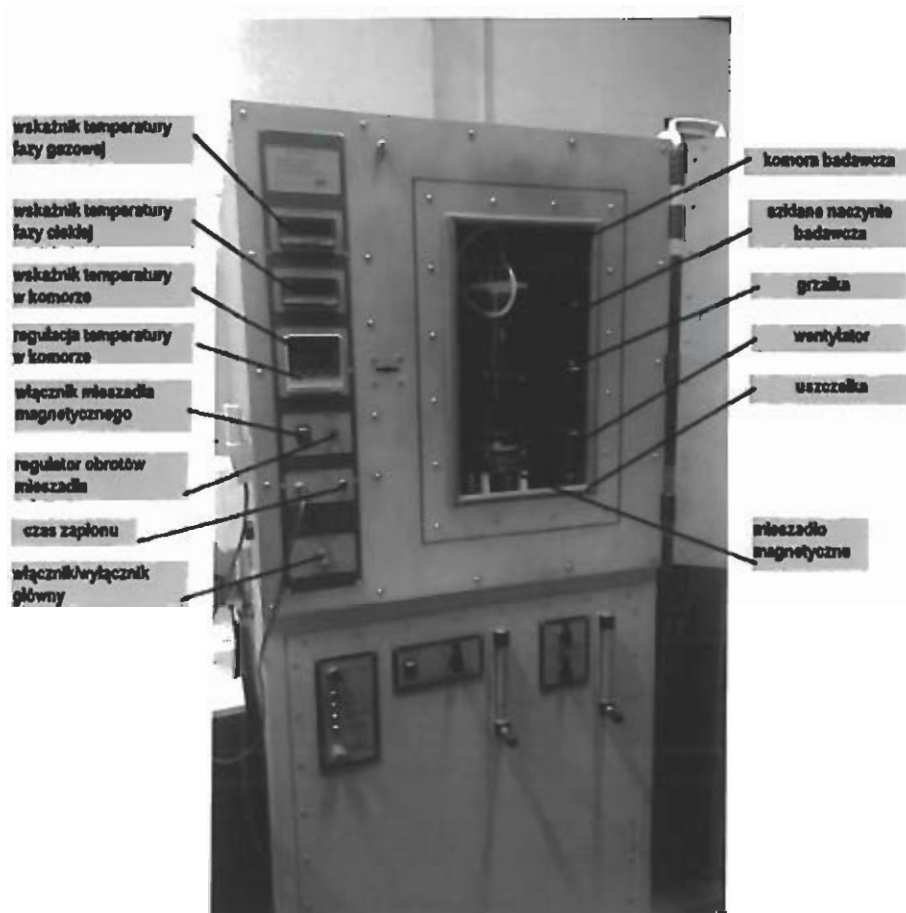
**Rysunek 6.** Zarejestrowane ciśnienia (po lewej) i prędkości propagacji fali (po prawej) podczas badań doświadczalnych dla różnych ciśnień początkowych podawania wodoru do kanału pomiarowego

Przeprowadzone badania doświadczalne w dużej skali pokazują, że w przypadku jednorodnych stechiometrycznych mieszanin wodorowo-powietrznych w warstwach, fala detonacyjna może propagować jedynie, gdy grubość warstwy mieszaniny jest większa niż 3 cm. Ta wartość krytyczna odpowiada zależności z długością komórki detonacji  $\lambda$  jako  $h' \approx 3\lambda$ . Natomiast, badania doświadczalne wykonane dla mieszanin niejednorodnych pokazują, że gradient stężenia wodoru równy w przybliżeniu  $-1.1 \%H_2/cm$  stwarza warunki korzystne do propagacji detonacji w tego typu mieszaninach wodorowo-powietrznych, jeśli maksymalne stężenie wodoru będzie bliskie 26%. Krytyczna grubość warstwy w tym przypadku wyniosła ok. 8,5 cm.



#### 4.2.2.6. Temperaturowe granice palności cieczy

Badania doświadczalne temperaturowych granic palności przeprowadzono na stanowisku badawczym wyprodukowanym przez firmę ANKO Trading Sp. z o.o. Jest to urządzenie przeznaczone do oznaczania temperaturowych granic palności cieczy palnych zgodnie z metodą scharakteryzowaną w literaturze. Główną częścią stanowiska badawczego jest komora, w której zlokalizowane jest naczynie w kształcie tuby z badaną substancją. Od góry do połowy wysokości tuby znajdują się przewody elektrod, powodujących zapłon cieczy przy pomocy iskry wysokiego napięcia. Naczynie wypełniano badaną substancją w sposób uwzględniający rozszerzalność cieplną cieczy – tak by poziom cieczy nie opadł zbyt przy niskich temperaturach oraz by ciecz nie zwilżyła elektrod przy temperaturach wysokich. Oprócz elektrod wewnątrz naczynia umiejscowione były: termopara fazy ciekłej, termopara fazy gazowej, wlot oraz wylot powietrza. W urządzenie zostało również wbudowane mieszadło magnetyczne.



Rysunek 7. Urządzenie do badania temperaturowych granic palności wraz z opisem elementów

Na podstawie otrzymanych wyników badań doświadczalnych, wykonano zestawienie dolnych oraz górnych temperaturowych granic palności dla zbadanych substancji, co również przedstawiono w Tabeli 1.

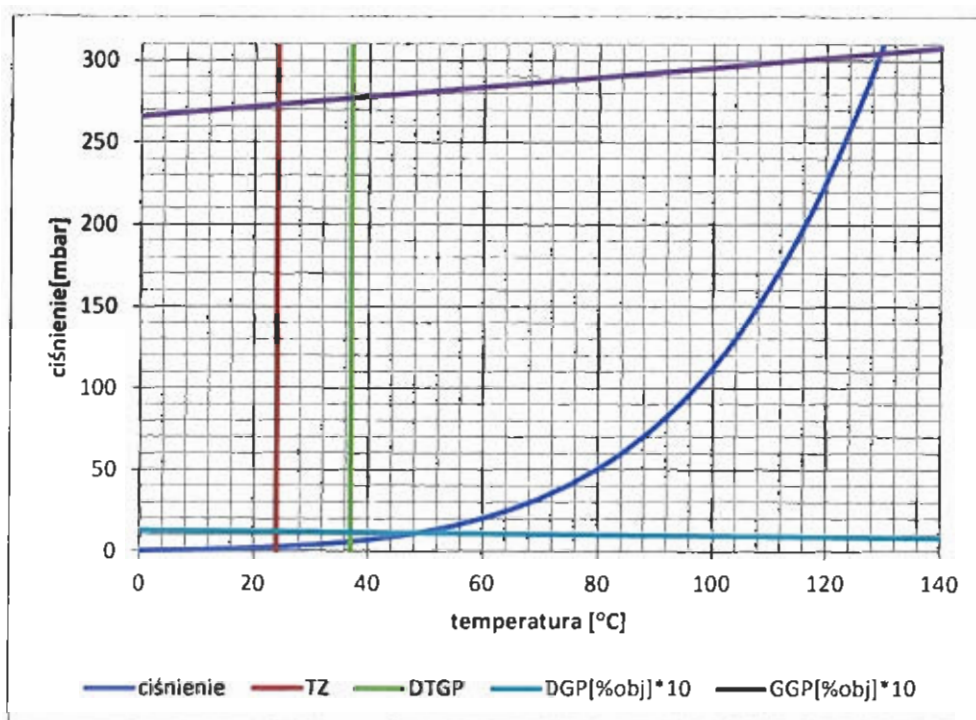
**Tabela 1.** Zestawienie otrzymanych wyników temperaturowych granic palności

Substancja/mieszanka	DTGP [°C]	GTGP [°C]
propanol (1)	37	>90
propanol (2)	17	>80
olej napędowy	76	86
olej napędowy 90%, propanol (1) 10%	55	82
olej napędowy 70%, propanol (1) 30%	34	>110
olej napędowy 50%, propanol (1) 50%	36	>100
olej napędowy 30%, propanol (1) 70%	41	>100
olej napędowy 90%, propanol (2) 10%	57	92
olej napędowy 70%, propanol (2) 30%	31	>110
olej napędowy 50%, propanol (2) 50%	31	>110
olej napędowy 30%, propanol (2) 70%	32	>110

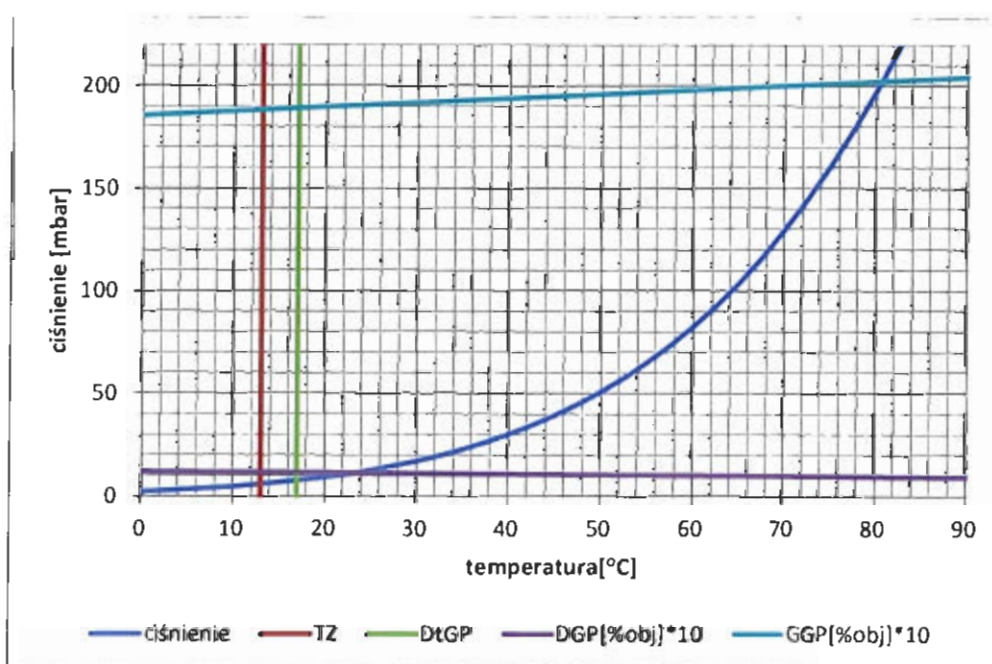
DTGP - dolna temperaturowa granica palności

GTGP - górna temperaturowa granica palności

Teoretyczną, dolną temperaturową granicę palności można zdefiniować jako punkt przecięcia krzywej Antoine'a i dolnej granicy palności na wykresie zależności ciśnienia od temperatury. Analogicznie, dla teoretycznej górnej temperaturowej granicy palności, będącej punktem przecięcia górnej granicy palności oraz krzywej Antoine'a. Przeprowadzenie obliczeń w tym zakresie było możliwe jedynie dla czystych substancji, ponieważ tylko dla nich dane niezbędne do uzyskania rezultatów (zwłaszcza stałe Antoine'a), były dostępne. Niektóre próby zapłonu zostały nagrane również kamerą cyfrową, co szczegółowo zobrazowano w treści monografii. Zauważalne było, że niemal każda substancja ma „charakterystyczny dla siebie” płomień. Zapłon nie przebiegał również identycznie dla jednej cieczy przy różnych temperaturach. Eksperymenty łącznie przeprowadzono dla jedenastu cieczy, w tym ośmiu mieszanin. Początkowo, planowano dokonać obliczeń dla ogółu zbadanych czystych cieczy oraz ich mieszanin. Obliczenia temperaturowych granic palności były możliwe do przeprowadzenia tylko w przypadku 1 i 2 propanolu. Dla oleju napędowego i jego mieszanin z alkoholem nie znaleziono stałych Antoine'a, niezbędnych do wyznaczenia krzywej pozwalającej na odczytanie szukanych temperatur, ponieważ są to stałe empiryczne. Wykresy porównawcze wartości obliczeniowych oraz wyznaczonych doświadczalnie przedstawiono na Rysunkach 8 i 9.



Rysunek 8. Wyniki obliczeń dla 1-propanolu z odniesieniem do stałych uzyskanych w badaniach doświadczalnych



Rysunek 9. Wyniki obliczeń dla 2-propanolu z odniesieniem do stałych uzyskanych w badaniach doświadczalnych

Na wykresach przedstawionych na Rysunkach 8-9, widoczne jest że otrzymane wartości teoretycznych temperaturowych granic palności są wyższe niż te, które otrzymano w badaniach doświadczalnych o 11°C dla 1-propanolu i o 6°C dla 2-propanolu. Są to wyniki zapewniające bezpieczeństwo użytkowania tych paliw w warunkach przemysłowych w granicach tolerancji około 25%, czyli niemal wystarczające w użytkowaniu substancji w przemyśle, jednak metoda ta nie cechuje się dużą dokładnością w przypadku tej cieczy. Metoda, którą wykorzystano, nieco odbiegała od tej opisanej w normie badawczej, co też mogło mieć wpływ na wyniki badań. Z racji ograniczonego dostępu do dużych ilości badanych cieczy palnych niemożliwe było wymienianie próbki na nową po każdym przeprowadzonym pomiarze – objętość jednej próbki to 700 ml, a przy dokonanej liczbie prób ilość potrzebnej cieczy wyniosłaby kilkadziesiąt litrów, pociągając za sobą znaczne koszty. Dysponując większymi zasobami czasu oraz cieczy badawczej można byłoby przeprowadzić drugą serię sprawdzającą badań, mającą na celu skorygowanie otrzymanych wyników. Oczywiście nie ma pewności, że tendencja otrzymanych wyników byłaby zgodna z danymi literaturowymi, badania eksperymentalne temperaturowych granic palności są dość nowatorskie, co w konsekwencji nie daje więc gwarancji, że wybrane ciecze palne nie charakteryzują się innymi własnościami.

Wyniki otrzymane z obliczeń wskazują na to, że badania zostały przeprowadzone prawidłowo, jak również dla tych alkoholi, temperaturowe granice palności faktycznie utrzymują się na poziomie znacznie wyższym niż mierzone podczas badań temperatury zapłonu. Być może więc nie można uogólniać zależności temperaturowych granic palności i temperatury zapłonu, bo istnieje prawdopodobieństwo, że granica może silnie zależeć od struktury chemicznej badanej substancji. Wystarczy również zwrócić uwagę na fakt, że samo miejsce podstawienia grupy hydroksylowej w alkoholu bardzo silnie wpływa na różnice między alkoholem 1-propylowym, a 2-propanolem (ich temperatura zapłonu różni się o 11°C, natomiast granice palności o jeszcze większe wartości), w związku z tym każda różnica w strukturze chemicznej może w mniejszym bądź większym stopniu wpływać na właściwości palne. Zbadanie tych zjawisk oraz zależności wymagałoby jednak gruntownej analizy chemicznej badanych alkoholi. W tym celu należałoby przeprowadzić zaawansowane obliczenia chemiczne obrazujące wpływ lokalizacji związku OH w cząsteczce 1-propanolu i 2-propanolu na reaktywność chemiczną, w tym podatność na zapłon i w konsekwencji reakcję spalania. Czas stabilizacji temperatury fazy gazowej i fazy ciekłej wynosił czasem ponad 4 godziny, zwłaszcza w zakresach temperatur dalekich od temperatury otoczenia. Ponadto, mieszaniny o wysokiej zawartości alkoholu lub czyste alkohole charakteryzowały się silnym parowaniem w wyższych temperaturach, a co za tym idzie – ubytek cieczy był znaczący w czasie jednego podgrzewania, co wpływało na prawidłowość otrzymanego wyniku. Niejednokrotnie zdarzało się, że zapłon w wysokiej temperaturze (>80 °C) był bardzo



silny i dynamiczny, a temperatura fazy gazowej wzrastała po nim do wartości bliskich granicy, którą określona była wytrzymałość urządzenia badawczego. W odniesieniu do powyższych faktów, w większości przypadków zaniechano badania wartości górnej temperaturowej granicy palności. Skupienie się jedynie na określeniu wartości dolnej granicy uzasadnione jest przede wszystkim względami bezpieczeństwa użytkowania badanych cieczy palnych, które się z nią wiąże. Temperaturowe granice palności są bardzo istotnym parametrem, zwłaszcza w przypadku, gdy pomiar temperatury zapłonu nie wyklucza ryzyka wystąpienia pożaru lub wybuchu par cieczy w instalacji przemysłowej. Poniżej przedstawiono kilka głównych wniosków z przeprowadzonych badań temperaturowych granic palności oraz odniesienia ich do wartości temperatury zapłonu dla badanych cieczy. Pomimo zróżnicowania wartości otrzymanych wyników dla dolnej temperaturowej granicy palności, można zauważyć kilka prawidłowości oraz cech wspólnych. Po pierwsze dodatek alkoholu znacząco wpływa na obniżenie zarówno temperatury zapłonu, jak i dolnej granicy palności oleju napędowego. Dla 1-propanolu można zaobserwować obniżenie się zarówno temperatury zapłonu, jak również dolnej temperaturowej granicy palności wraz ze wzrostem udziału alkoholu w mieszaninie, do wartości nawet nieznacznie niższych niż temperatury czystej cieczy. Z kolei w przypadku izopropanolu wartości dążą do wartości dla cieczy czystej. Dla obu alkoholi można zauważyć również następującą tendencję. Początkowo, dodanie niewielkiej ilości procentowej alkoholu gwałtownie obniża temperaturę, jednak przy większej ilości spadek nie jest już tak wyraźny. Należy na tej podstawie wysnuć wniosek, że dodatek do około 20% alkoholu 1-propylowego lub izopropylowego ma największy wpływ na temperaturę zapłonu i dolną temperaturową granicę palności oleju napędowego. Użytecznym badaniem w tym przypadku byłoby „zagęszczenie” pomiarów w tym przedziale, to znaczy zbadanie mieszanin oleju i propanolu w stężeniach zmieniających się co np. 2%. Pozwoliłoby to dokładnie określić wpływ propanolu na właściwości palne oleju napędowego, a także zoptymalizować ewentualne użytkowanie mieszaniny np. w motoryzacji. Dodatki alkoholu większe niż 20% przestają mieć taki widoczny wpływ na właściwości palne. Istotną informację stanowi fakt, że olej napędowy z dodatkiem cieczy o temperaturowej granicy palności niższej niż temperatura otoczenia może stać się niebezpieczny w użytkowaniu, magazynowaniu i transporcie pod względem awaryjnego uwolnienia do środowiska, co w konsekwencji może doprowadzić do pożaru lub wybuchu. Tak znaczny wpływ alkoholu propylowego może jednak wpłynąć nie tylko na wartości granicy palności, czy temperatury zapłonu, ale również na inne właściwości palne, co w niektórych przypadkach może okazać się niezwykle użyteczne, szczególnie w ocenie oddziaływania na środowisko tego typu uwolnień substancji palnych.

### **4.2.3. Metody ograniczania skutków uwolnień substancji palnych**

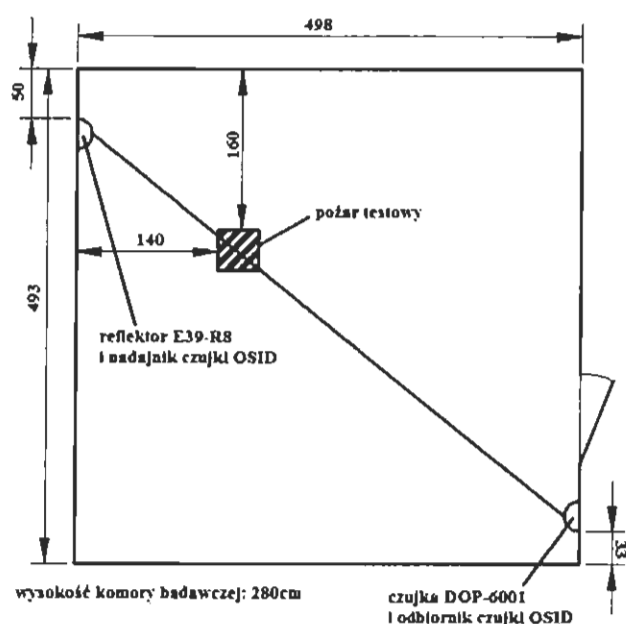
Podczas awaryjnych uwolnień substancji palnych do środowiska istotnym elementem w zakresie ochrony przed oddziaływaniem zjawisk takich jak pożary, czy wybuchy na środowisko, jest dobór optymalnych rozwiązań i metod ograniczania tego typu zdarzeń. W tej części monografii przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wybranych metod ograniczania skutków uwolnień substancji palnych, w tym przede wszystkim detekcja spalania płomieniowego i bezpłomieniowego, dodawanie wody podczas spalania i wybuchów cieczy palnych, redukcja stężenia substancji palnych w środowisku poprzez wylądowanie gazu, jak również tłumienie wybuchów i detonacji w mieszaninach gazowych. Opisane tu metody ograniczania uwolnień substancji palnych do środowiska stanowią jedynie część prowadzonych przez autora badań naukowych, a ich szersze omówienie zaprezentowane zostało w cytowanych artykułach naukowych.

#### **4.2.3.1. Detekcja spalania płomieniowego i bezpłomieniowego**

Podczas awaryjnego uwolnienia substancji palnej do środowiska, jedną z kluczowych metod ograniczania takiego uwolnienia jest szybka i efektywna detekcja uwolnionej substancji lub detekcja zdarzeń powstałych w następstwie uwolnienia, tj. przykładowo pożarów. Na przestrzeni lat opracowano wiele typów czujek pożarowych różniących się zasadą działania. Najprostsze z nich to proste czujniki temperatury, najpierw mechaniczne, później, wraz z rozwojem techniki elektronicznej. Zdawano sobie sprawę, że nie wykrywają one zagrożenia dostatecznie szybko, dlatego też poszukiwano rozwiązań, które reagowałyby na pierwsze oznaki rozwijającego się pożaru. Czujka jonizacyjna eliminowała ten problem, lecz była dość droga w produkcji. Gdy opracowano półprzewodnikowe czujniki światła, zastosowano je do skonstruowania optycznych czujek dymu, wykorzystujących zjawisko rozproszenia lub tłumienia strumienia światła. Punktowe czujki dymu są łatwe w montażu oraz obsłudze, gdyż są kompletnym, samowystarczalnym urządzeniem. Ich skuteczność maleje wraz z oddalaniem się źródła dymu od miejsca montażu czujki. W niektórych budynkach, jak np. duże hale magazynowe, czy fabryki, dla zachowania odpowiedniego stopnia ochrony należałoby instalować setki czujek punktowych, aby ich zasięg skutecznego działania pokrył całą powierzchnię pomieszczenia. W takiej sytuacji lepszym rozwiązaniem są optyczne liniowe czujki dymu, które w zależności od gęstości ich instalacji, mogą pod względem powierzchni dozоровej zastąpić nawet 20 czujek punktowych.



Badania doświadczalne detekcji podczas spalania płomieniowego oraz bezpłomieniowego zostały przeprowadzone w specjalnej komorze. Komora taka to wydzielona przeszklonymi ścianami część laboratorium o wymiarach 493 x 498 cm i wysokości 280 cm. Na potrzeby badań doświadczalnych zainstalowano dwie czujki liniowe: OSID oraz DOP-6001. Czujki umieszczono na wysokości 220 cm (OSID) oraz 230 cm (DOP-6001) w pobliżu przeciwnych narożników komory tak, jak to pokazano na Rysunku 10. Pożar testowy zainicjowano w odległości 140 cm oraz 160 cm od ścian.



**Rysunek 10.** Rozmieszczenie czujek i pożaru testowego w komorze badawczej: widok z góry

Do badania ze spalaniem bezpłomieniowym wykorzystano żeliwną płytę grzewczą o średnicy 19 cm zasilaną prądem elektrycznym o napięciu 230 V. Płyta po rozgrzaniu utrzymywała stabilną temperaturę 270°C. Do przeprowadzenia jednej próby wykorzystano 6 kawałków drewna o wymiarach 20 x 25 x 75 mm. Drewno było równomiernie rozkładane na powierzchni rozgrzanej płyty. W momencie położenia drewna na płycie uruchamiano zapis parametrów pracy czujek. Mierzono czas od momentu położenia drewna na powierzchni płyty do wejścia obydwu badanych czujek w stan alarmu. Po uruchomieniu alarmu ściągano drewno z powierzchni płyty, zanurzano je w wiadrze z wodą i wietrzono komorę testową. W celu przeprowadzenia próby ze spalaniem płomieniowym na tacy o wymiarach 200 x 200 mm układano stos 24 beleczek o wymiarach 10 x 20 x 250 mm w konfiguracji 4 warstwy po 6 beleczek. Pod stosem na środku tacy umieszczano okrągłą tackę o średnicy 5 cm z zawartością 0,5 cm<sup>3</sup> denaturatu. Alkohol był podpalany za pomocą zapalarki gazowej.

W momencie zapalenia denaturatu uruchamiano zapis parametrów pracy czujek. Próba kończyła się w momencie wejścia obydwu czujek w stan alarmu, wtedy następowało zgaszenie pożaru testowego wodą oraz wietrzenie komory testowej.



**Rysunek 11.** Pożar testowy w trakcie badań doświadczalnych detekcji pożarów

Przeprowadzono po trzy próby dla wszystkich rodzajów drewna, zarówno przy spalaniu bezpłomieniowym, jak i płomieniowym. Warunki panujące w komorze badawczej były zbliżone dla wszystkich prób tj. temperatura: 21°C, ciśnienie: 1005–1020 hPa, wilgotność powietrza: 40–60%. W próbach ze spalaniem bezpłomieniowym dym zaczynał się wydzielać niezwłocznie po umieszczeniu drewna na płycie grzewczej, proces tlenia się drewna był jednostajny. Przebieg parametrów pracy czujek w czasie był w dużym przybliżeniu liniowy, co oznacza jednostajne tempo zmniejszania się przezroczystości powietrza w komorze badawczej. Spalanie płomieniowe rozpoczynało się od małego płomienia podpalonego alkoholu, który inicjował spalanie drewna. Szybkość spalania, a co za tym idzie ilość wydzielanego dymu, cały czas rosła, co powodowało przebieg parametrów pracy czujek liniowych dymu w czasie zbliżony do wykładniczego. Tłumienie wiązek światła wysyłanych przez nadajnik czujki OSID, przebiegało różnie, w zależności od typu spalania. Dym pochodzący ze spalania bezpłomieniowego początkowo tłumiał obie wiązki jednakowo, dopiero po pewnym czasie (ok. 5 min) pojawiała się znacząca różnica pomiędzy tłumieniem UV oraz IR. Podczas spalania płomieniowego różnica była widoczna natychmiast i wyraźnie powiększała się wraz z rozwojem pożaru testowego. Kryteria wejścia czujki OSID w stan alarmu są złożone. Dla spalania płomieniowego czujka reagowała przy różnicy w tłumieniu dwóch wiązek na poziomie 20–25%, średnio 22%. Przy spalaniu bezpłomieniowym było to 2–8%, średnio ok. 4%. Niejednokrotnie czujka rejestrowała taka

różnicę na długo przed wejściem w stan alarmu. Dla obydwu czujek stwierdzono mniejsze rozbieżności w czasie zadziałania pomiędzy poszczególnymi próbami dla jednego rodzaju drewna przy spalaniu płomieniowym w porównaniu do bezpłomieniowego. Może to wynikać z faktu, że proces spalania płomieniowego odznacza się większą dynamiką rozwoju, natomiast tlenie zachodzi równomiernie z małą szybkością, na którą wpływ mają wszelkie cechy budowy użytych próbek drewna. Występują bardzo duże różnice w czasie zadziałania dwóch czujek dla spalania bezpłomieniowego. Czujka OSID reaguje po kilkakrotnie dłuższym czasie podczas tej samej próby. Obydwie czujki reagują w bardzo zbliżonym czasie dla spalania płomieniowego, dla których różnice wynoszą maksymalnie kilkanaście sekund. Wraz ze wzrostem gęstości drewna rośnie czas wykrycia jego pożaru. Jedynym wyjątkiem jest tutaj działanie czujki OSID podczas prób ze spalaniem bezpłomieniowym. Płomieniowe spalanie drewna sosnowego wykrywane było po upływie wyraźnie krótszego czasu niż pozostałych gatunków, na co miała wpływ oprócz mniejszej gęstości, duża zawartość żywicy. Podczas pirolizy drewno sosnowe wydziela więcej lotnych produktów, które przyspieszają rozwój pożaru. Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych w zakresie detekcji spalania płomieniowego oraz bezpłomieniowego podczas uwolnienia substancji palnych do środowiska widać, że aby skutecznie ograniczać negatywne oddziaływanie tego typu uwolnień w postaci pożarów na środowisko, należy przede wszystkim dobrze poznać oraz dobrać metody detekcji, w tym umiejętnie zastosować rozmieszczenie elementów detekcyjnych oraz prawidłowo dobrać ich parametry techniczne.

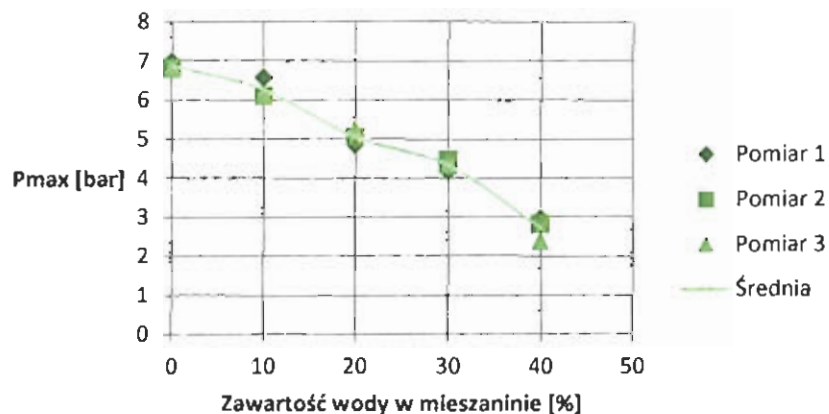
#### **4.2.3.2. Dodatek wody podczas wybuchów par cieczy**

W tej części monografii opisano wyniki badań doświadczalnych w zakresie dodatku wody podczas spalania par cieczy. Związane jest to z sytuacjami w warunkach przemysłowych, podczas których ze zbiornika lub instalacji procesowej dochodzi do awaryjnego uwolnienia cieczy palnej do środowiska, jej parowania, a w przypadku efektywnego źródła zapłonu – do wybuchu par cieczy. Zapoczątkowanie tych badań zainicjowała historia wypadków i awarii w przemyśle, które miały miejsce w różnych częściach świata. Najczęstszymi przyczynami incydentów związanych z użytkowaniem alkoholi było ich niewłaściwe przechowywanie, które doprowadziło do wycieku lub rozlania cieczy w wyniku uszkodzeń mechanicznych zbiornika. Pierwszym przykładem takiego incydentu może być pożar w jednej z destylarni w Stanach Zjednoczonych w stanie Illinois, który miał miejsce w 1954r. Prawdopodobnie w wyniku rozprzestrzeniającego się przez kilka godzin pożaru, gwałtownie zwiększył się stopień parowania składowanego alkoholu, co w efekcie doprowadziło do uformowania się mieszaniny gazowej, zapłonu oraz w konsekwencji wybuchu. Kolejnym przykładem wypadku, w którym dużą rolę odegrał alkohol etylowy, jest katastrofa kolejowa, która wydarzyła się w dniu 11.07.2012 roku

w Columbus, USA. Pociąg towarowy przewożący m.in. zbiorniki z etanolem wykoleił się w skutek pęknięcia szyny. W efekcie tego zdarzenia rozlany z jednego zbiornika etanol zasilił ogromny pożar, a dwa kolejne zbiorniki, w których składowany był ten alkohol, eksplodowały. Wydarzenia te doprowadziły do przymusowej ewakuacji około 100 osób.

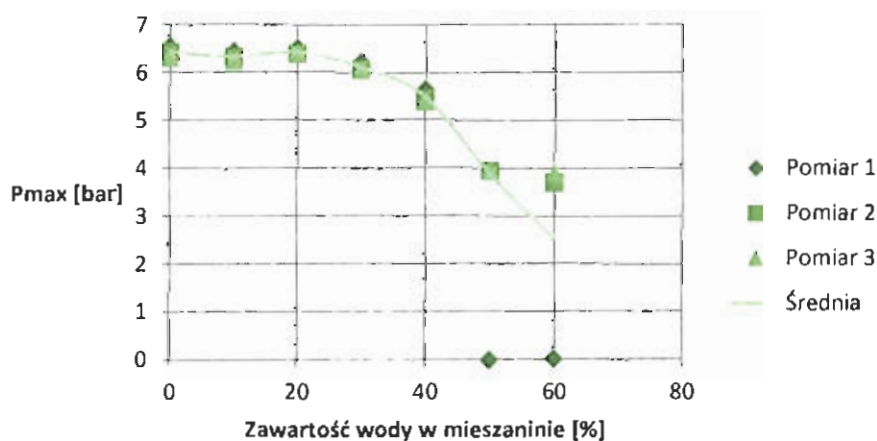
Do badań wykorzystano trzy ciecze palne: metanol, etanol oraz izo-butanol oraz dwie ciecze domieszkujące: wodę demineralizowaną oraz związek powierzchniowo-czynny o nazwie handlowej Polisorbate 80. Przed rozpoczęciem przygotowywania mieszanin zostały poczynione założenia dotyczące przebiegu doświadczeń oraz zawartości procentowej wody. Założono, że paliwo podawane do komory spalania zostaje całkowicie odparowane tworząc jednorodną mieszaninę palną, po odpowiednim mieszaniu za pomocą mieszadła. Założono także, że badania doświadczalne przeprowadzone zostaną dla próbek zawierających od 10% wody, zwiększając jej stężenie skokowo o 10%, aż do granicznej zawartości wody w mieszaninie, dla których zaobserwowany zostanie brak wybuchu. Zgodnie z przyjętą metodą badawczą, jako kryterium wybuchu przyjęto minimalną wartość ciśnienia wybuchu na poziomie 0,5 bar. Ze względu na znaczne trudności w dobrym rozpuszczaniu oraz mieszaniu się izo-butanolu z wodą, jako domieszkę zastosowano także surfaktant. Jest to środek powierzchniowo-czynny, który zmniejsza napięcie powierzchniowe między dwoma cieczami umożliwiając stworzenie jednorodnej mieszaniny. Środek ten powinien mieć możliwie jak najmniejszy wpływ na procesy spalania mieszaniny paliwowej. W celu zachowania jednakowego stężenia wody demineralizowanej w badanych próbkach, w których zastosowano również surfaktant, zdecydowano, że jego dodanie nastąpi kosztem zmniejszenia objętości alkoholu w danej próbce. W celu określenia punktu odniesienia, na samym początku zbadane zostały próbki czystych alkoholi. Po ustaleniu maksymalnego ciśnienia oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu dla czystych alkoholi, przeprowadzono pomiary dla poszczególnych procentowych zawartości wody w mieszaninach. Dla każdej wybranej do doświadczeń objętości cieczy, wykonane zostały trzy pomiary, których wyniki zarejestrowano na wykresach generowanych przez dedykowany program komputerowy. Po przeprowadzeniu wszystkich trzech prób, na ich podstawie wyliczana była średnia arytmetyczna. Przy 50% wody w próbce o objętości 4 cm<sup>3</sup> zaobserwowano brak wybuchu w każdej z przeprowadzonych prób. Kontynuowano badania mieszaniny do 60% zawartości wody w celu ustalenia przybliżonej granicznej zawartości procentowej wody w mieszaninie, która uniemożliwia zainicjowanie wybuchu. Dla 60% zawartości wody w mieszaninie zaobserwowano wybuch w dwóch z trzech przeprowadzonych prób dla objętości próbki równej 6 cm<sup>3</sup> oraz dla jednej z trzech przeprowadzonych prób dla objętości próbki równej 8 cm<sup>3</sup>. Po analizie tych wyników uznano, iż wyższa procentowa zawartość wody w mieszaninie z metanolem nie pozwoli na stworzenie jednorodnej mieszaniny

paliwowo-powietrznej w granicach wybuchowości. W celu lepszego zobrazowania wyników pomiarów wykonano wykresy zależności maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia od zawartości procentowej wody w mieszaninie. Dla badań z metanolem, przedstawiono to na Rysunkach 12-13.



**Rysunek 12.** Maksymalne ciśnienie wybuchu w funkcji zawartości wody w mieszaninie z metanolem dla próbki o objętości 4 cm<sup>3</sup>

Na Rysunku 12 widać, że dla niskich stężeń metanolu dodatek wody diametralnie obniża maksymalne ciśnienie wybuchu. Zależność jest niemalże liniowa, a wartość maksymalnego ciśnienia wybuchu przy 40% zawartości wody w mieszaninie jest ponad 2 razy mniejsza od wartości jaką otrzymano w próbach na czystym metanolu.



**Rysunek 13.** Ciśnienie maksymalne wybuchu w funkcji zawartości wody w mieszaninie z metanolem dla próbki o objętości 6 cm<sup>3</sup>



Na Rysunku 13 przedstawiono maksymalne ciśnienie wybuchu dla każdej z prób zaplonu próbki o objętości 6 cm<sup>3</sup>. W tym przypadku można zaobserwować wyraźny spadek ciśnienia dopiero przy 40% zawartości wody w mieszaninie. Spowodowane jest to szerokim zakresem wybuchowości tego alkoholu i świadczyć może, że dla odpowiednich stężeń możliwy jest stosunkowo duży dodatek demineralizowanej wody, bez straty na uzyskiwanym ciśnieniu wybuchu. Pierwszą z badanych cieczy palnych były mieszaniny metanolu z wodą i powietrzem. Bardzo dobre mieszanie się metanolu z wodą umożliwiło przeprowadzenie badań bez konieczności użycia środka powierzchniowo-czynnego. W trakcie i po przeprowadzonych badaniach zaobserwowano kilka istotnych faktów na temat maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu dla mieszaniny tego alkoholu z wodą.

- Najwyższe wartości maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu zaobserwowane zostały dla najmniejszego stężenia procentowego metanolu w powietrzu.
- Dla najniższego badanego stężenia metanolu w powietrzu, dodatek wody wykazuje działanie obniżające zarówno maksymalne ciśnienie wybuchu, jak również wartość maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu.
- Dla wyższych stężeń w powietrzu oraz dodatku wody do 30% objętości próbki, zaobserwowano wzrost maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu, co ma bezpośredni związek z bezpieczeństwem użytkowania mieszanin metanolu z wodą. Należy pamiętać, iż wzrost parametru  $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{MAX}$  przekłada się na większe zagrożenie i większą skalę zniszczeń w razie ewentualnego wybuchu metanolu, co świadczy o dynamice tego zjawiska. Wartości te jednak, były znacznie mniejsze niż najwyższe zmierzone w trakcie badań - wynikało to bezpośrednio ze zbliżonego stężenia paliwa w powietrzu do stężenia GGW, a nie z obecności wody w próbce.
- Procentową zawartością graniczną, przy której stężenie metanolu w powietrzu nie mieściło się w zakresie granic wybuchowości, i tym samym nie pozwalało na zainicjowanie wybuchu, była wartość wynosząca około 60% wody w roztworze.

Drugim badanym alkoholem był alkohol etylowy (etanol). On również wykazuje bardzo dobrą rozpuszczalność w wodzie i podobnie jak metanol nie wymaga użycia środka powierzchniowo-czynnego w celu utworzenia jednorodnej mieszaniny palnej. W trakcie i po przeprowadzonych badaniach zaobserwowano kilka istotnych faktów na temat maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu dla mieszaniny tego alkoholu z wodą:



- Najwyższe maksymalne ciśnienie wybuchu zaobserwowane zostało dla najmniejszego badanego stężenia procentowego etanolu w powietrzu.
- Najwyższa maksymalna szybkość przyrostu ciśnienia w czasie zaobserwowana została dla 10% roztworu wody i objętości kontrolnej próbki równej 4 cm<sup>3</sup>, co oznacza, że taki skład mieszaniny jest optymalnym pod względem dynamiki wybuchu.
- Dla najniższego badanego stężenia etanolu w powietrzu, dodatek wody wykazuje działanie obniżające maksymalne ciśnienie wybuchu.
- Dla najniższego badanego stężenia etanolu w powietrzu, dodatek wody wykazuje działanie podwyższające maksymalną szybkość przyrostu ciśnienia wybuchu do pewnej wartości granicznej, a następnie powoduje spadek tej wartości.
- Dla wyższych stężeń w powietrzu oraz dodatku wody do 40% objętości próbki, zaobserwowano wzrost maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu, co ma bezpośredni związek z bezpieczeństwem użytkowania mieszanin etanolu z wodą. Należy pamiętać, iż wzrost parametru  $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{MAX}$  przekłada się na większe zagrożenie oraz skalę zniszczeń w razie ewentualnego wybuchu etanolu. Wartości te jednak, były znacznie mniejsze niż najwyższe zmierzone w trakcie badań - wynikało to jednak bezpośrednio ze zbliżonego stężenia paliwa w powietrzu do stężenia górnej granicy wybuchowości, a nie z obecności wody w próbce.
- Procentową zawartością graniczną, przy której stężenie etanolu w powietrzu dla badanych próbek nie mieściło się w zakresie granic wybuchowości, i tym samym nie pozwalało na zainicjowanie wybuchu, była wartość wynosząca około 70% wody w roztworze.
- W porównaniu do metanolu, alkohol etylowy wykazuje większą podatność na rozcieńczanie go wodą demineralizowaną.

Trzecią badaną substancją był izo-butanol. Ze względu na jego ograniczoną rozpuszczalność w wodzie, a co za tym idzie trudności w przygotowaniu jednorodnej mieszaniny, badania przeprowadzono dla dwóch wariantów: bez dodatku surfaktantu oraz z dodatkiem surfaktantu. W trakcie i po przeprowadzonych badaniach zaobserwowano kilka istotnych faktów na temat maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu dla mieszaniny tego alkoholu z wodą:

- Najwyższe wartości maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu zaobserwowane zostały dla najmniejszego stężenia procentowego izo-butanolu w powietrzu zarówno w wariancie z surfaktantem, jak i bez surfaktantu.

- Dla wszystkich badanych stężeń izo-butanolu w powietrzu, dodatek wody oraz surfaktantu wykazuje działanie obniżające zarówno maksymalne ciśnienie wybuchu, jak również wartość maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia w czasie.
- Dla najwyższego stężenia izo-butanolu w powietrzu oraz 40% dodatku wody, zaobserwowano wzrost maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu, co ma bezpośredni związek z dynamiką tego zjawiska. Należy pamiętać, iż wzrost parametru  $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{MAX}$  przekłada się na większe zagrożenie oraz skalę zniszczeń w razie ewentualnego wybuchu zbiornika z izo-butanolem. Wartości te były jednak znacznie mniejsze niż najwyższe zmierzone w trakcie badań, co wynikało bezpośrednio ze zbliżonego stężenia paliwa w powietrzu do stężenia górnej granicy wybuchowości, a nie z obecności wody w próbce.
- Procentową zawartością graniczną, przy której stężenie izo-butanolu w powietrzu dla badanych próbek nie mieściło się w zakresie granic wybuchowości, i tym samym nie pozwalało na zainicjowanie wybuchu, była wartość wynosząca około 80% wody w roztworze bez surfaktantu. W trakcie prowadzenia badań nad próbkami zawierającymi surfaktant, spodziewano się zaprzestania zjawiska wybuchu dla wartości granicznej wody wynoszącej ok. 50%.
- Przewidywalność wyników pomiarów próbek mieszaniny izo-butanolu oraz wody bez dodatku surfaktantu była mocno ograniczona. Spowodowane jest to rozwarstwianiem się mieszaniny, a co za tym idzie możliwością wprowadzenia próbek, o innym niż założone, stężeniu do komory badawczej, o składzie bardziej zbliżonym do czystego izo-butanolu, co potwierdzają zbliżone wartości maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu.
- Wyniki uzyskane dla substancji emulsyjnej, jaką była mieszanina izo-butanolu z wodą po dodaniu surfaktantu o handlowej nazwie Polisorbate 80, wykazywały podobną tendencję w charakterystyce maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu, do uzyskanych dla metanolu oraz etanolu.
- Zalecane byłoby ustalenie, czy i jaki dokładnie, ma wpływ dodatek surfaktantu do badanej mieszaniny. Ze względu na to, że jego obecność w mieszaninie odbyła się kosztem zmniejszenia zawartości alkoholu w próbce, należy domniemywać, że również surfaktant mógł mieć wpływ na wyniki badań mieszaniny emulsyjnej izo-butanolu z wodą. W tym zakresie proponuje się kontynuację przedmiotowych badań.

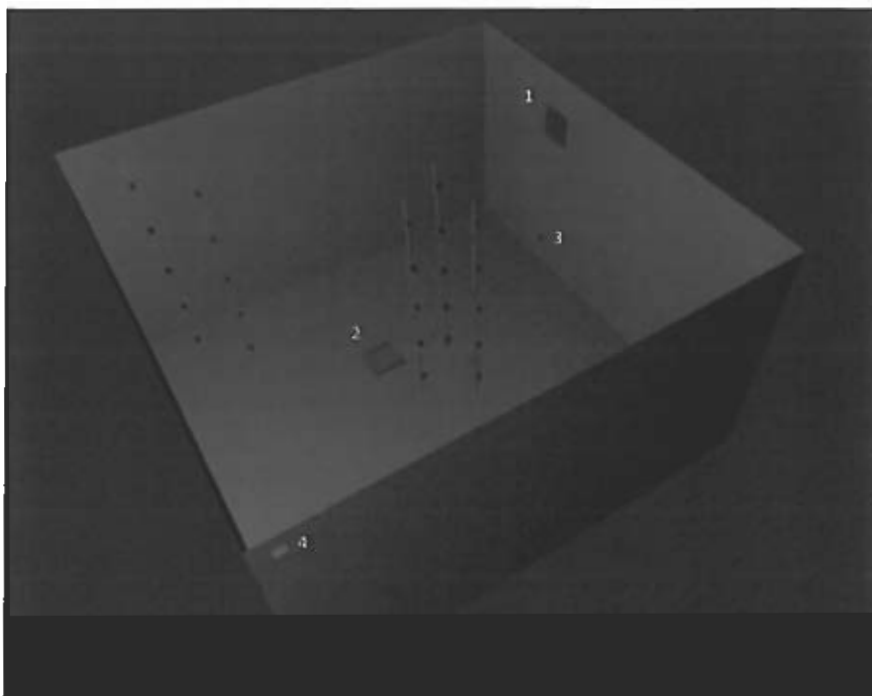
Podsumowując przeprowadzone badania doświadczalne należy stwierdzić, że w większości przypadków ciśnienie wybuchu oraz maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu ulegały obniżeniu po dodaniu wody do badanych próbek. Należy także zauważyć, że wyniki otrzymane dla alkoholi, które dobrze mieszają się z wodą, są znacznie bardziej przewidywalne i lepiej pokazują zależność  $P_{MAX}$  oraz  $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{MAX}$  od procentowej zawartości wody w roztworze, niż wyniki uzyskane dla słabo rozpuszczającego się w wodzie izo-butanolu bez dodatku środka powierzchniowo-czynnego.

#### 4.2.3.3. Redukcja stężenia substancji palnych w środowisku poprzez wyładowanie gazu

Działanie gazów gaśniczych podczas awaryjnych uwolnień substancji palnych do środowiska polega na zmianie składu powietrza w taki sposób, aby reakcja spalania przerwana została poprzez zmniejszenie stężenia utleniacza, którym najczęściej jest tlen. Odbywa się to bez oddziaływania na powierzchnię materiałów palnych. Zgodnie z definicją, gazowe środki gaśnicze charakteryzują się tym, że nie pozostawiają zanieczyszczeń po wyładowaniu w chronionym pomieszczeniu oraz nie przewodzą prądu elektrycznego. Dzięki takim właściwościom wyładowanie gazu gaśniczego znalazło zastosowanie w inżynierii środowiska. Gazy gaśnicze, tak jak wszystkie środki gaśnicze, mają swoje ograniczenia. W tym przypadku są to pożary substancji o wysokiej reaktywności lub takie, których reakcja spalania będzie utrzymana bez obecności tlenu, np.: proch strzelniczy, potas, sód, tytan, uran, wodorotlenki metali, nadtlenuki organiczne. Instalacje gaśnicze gazowe spełniają swoją funkcję tylko wtedy, gdy zamontowane są w przestrzeniach zamkniętych, w których nie nastąpi rozcieńczenie gazu gaśniczego przez nadmiernie napływające powietrze.

Badania doświadczalne w zakresie redukcji stężenia substancji palnej przeprowadzono w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. W laboratorium znajduje się pomieszczenie o wymiarach 5 m x 5 m x 2,8 m, przystosowane do przeprowadzania prób szczelności oraz prób wyładowania gazów gaśniczych, co schematycznie przedstawiono na Rysunku 14. W pomieszczeniu zaprojektowano klapę odciążającą o powierzchni 1600 cm<sup>2</sup> w celu redukcji przyrostu ciśnienia po wyładowaniu gazu gaśniczego w chronionym obszarze. W górnej oraz dolnej części pomieszczenia umiejscowiono dwa otwory z możliwością zmiany powierzchni nieszczelności. W przedstawionych badaniach powierzchnia każdego z tych otworów wynosiła 100 cm<sup>2</sup>, imitując nieszczelności pomieszczenia wynikające z możliwej wentylacji. Otwory miały taką samą wielkość, aby ilość powietrza wpływającego do pomieszczenia była równa ilości powietrza wypływającego. Jest to najbardziej niekorzystne założenie podczas badania czasu

retencji. W pomieszczeniu znajdowała się także metalowa taca, w której rozpalono pożar testowy.

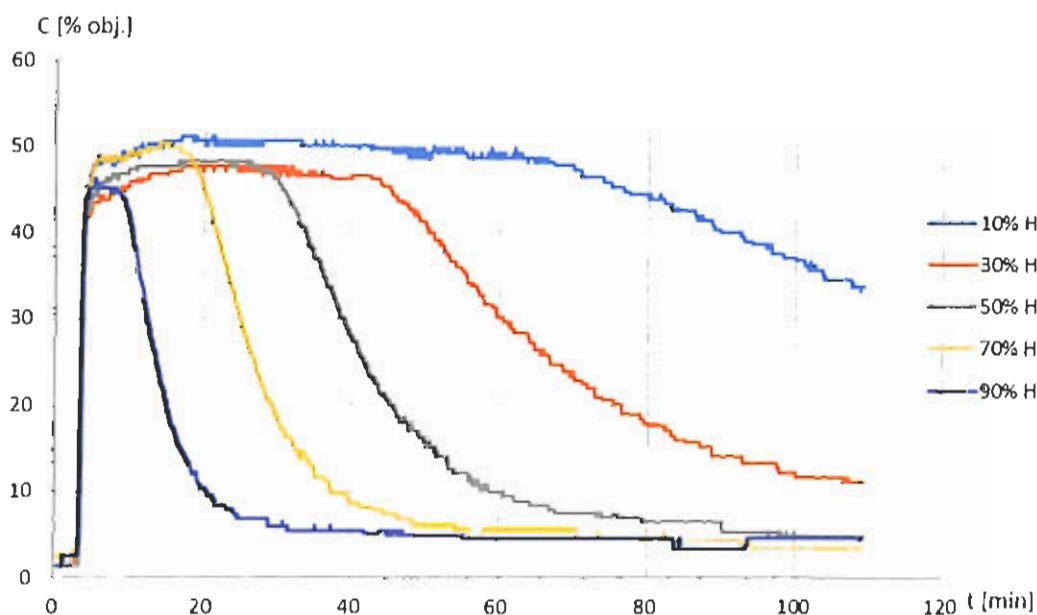


**Rysunek 14.** Schemat pomieszczenia testowego podczas badań redukcji stężenia substancji palnej

Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych była ocena zdolności oraz efektywności gaszenia dwutlenku węgla, poprzez wyładowanie gazu do pomieszczenia testowego. Podczas wyładowania mierzono takie wartości jak stężenie gazu gaśniczego, stężenie tlenu, temperatura w pomieszczeniu, wilgotność powietrza oraz przyrost ciśnienia. Przeprowadzono także test szczelności badanego pomieszczenia za pomocą wentylatora drzwiowego, co pozwoliło scharakteryzować nieszczelności pomieszczenia oraz obliczenie teoretycznego czasu retencji. W ramach analizy wyników badań, porównano także wartości obliczone według obowiązujących oraz wycofanych norm z wartościami rzeczywistymi zmierzonymi podczas przeprowadzanych badań doświadczalnych. Pozwoliło to przede wszystkim na zaobserwowanie różnic pomiędzy wartościami zmierzonymi, a obliczonymi, a także różnic wynikających z zastosowanej normy projektowej. Analiza wyników badania stężenia tlenu w funkcji czasu podczas wyładowania dwutlenku węgla do badanego pomieszczenia:

- stężenie tlenu w całej objętości pomieszczenia spada poniżej 19% po 16 sekundach od rozpoczęcia gaszenia,
- na 90% wysokości pomieszczenia stężenie tlenu:

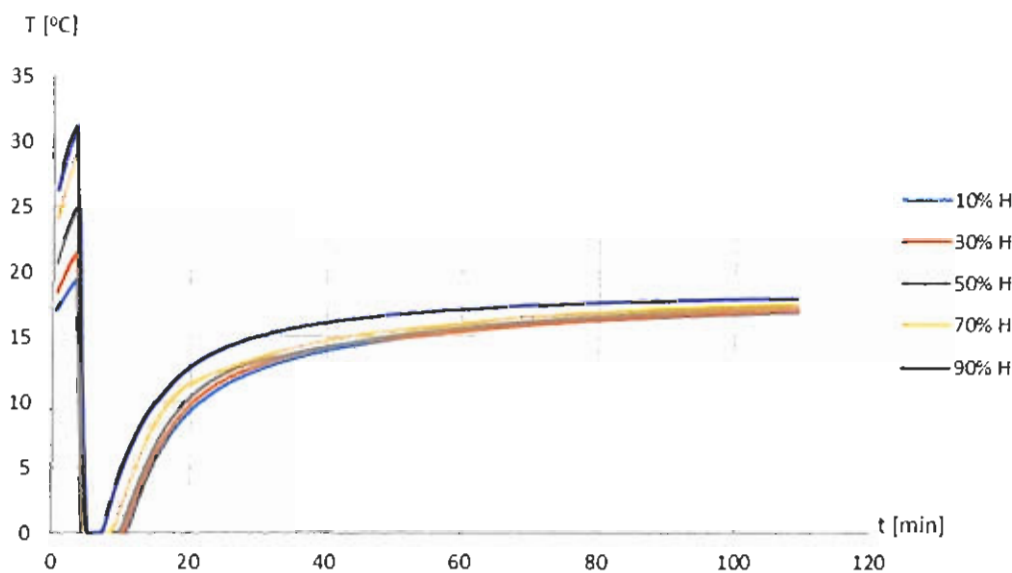
- spadło do 13,7% po 1 min 56 s od rozpoczęcia gaszenia,
- wzrosło do 19% po 13 min 10 s od rozpoczęcia gaszenia,
- na 70% wysokości pomieszczenia stężenie tlenu:
  - spadło do 12,8% po 10 min 54 s od rozpoczęcia gaszenia,
  - wzrosło do 19% po 28 min 48 s od rozpoczęcia gaszenia,
- na 50% wysokości pomieszczenia stężenie tlenu:
  - spadło do 13,1% po 16 min 40 s od rozpoczęcia gaszenia,
  - wzrosło do 19% po 47 min 18 s od rozpoczęcia gaszenia,
- na 30% wysokości pomieszczenia stężenie tlenu:
  - spadło do 12,7% po 23 min 50 s od rozpoczęcia gaszenia,
  - wzrosło do 19% po 83 min 50 s od rozpoczęcia gaszenia,
- na 10% wysokości pomieszczenia stężenie tlenu:
  - spadło do 12,7% po 29 min od rozpoczęcia gaszenia,
  - wzrosło do 16% po 106 min od rozpoczęcia gaszenia, po których badanie zakończono.



Rysunek 15. Średnie stężenie dwutlenku węgla w funkcji czasu

Analiza wyników badania stężenia dwutlenku węgla w funkcji czasu podczas wylądowania do badanego pomieszczenia:

- stężenie dwutlenku węgla w całej objętości pomieszczenia wzrasta do stężenia projektowego po 26 s od rozpoczęcia gaszenia,
- na 90% wysokości pomieszczenia czas retencji wynosi 8 min 34 s,
- na 70% wysokości pomieszczenia czas retencji wynosi 21 min 8 s,
- na 50% wysokości pomieszczenia czas retencji wynosi 35 min 16 s,
- na 30% wysokości pomieszczenia czas retencji wynosi 56 min 40 s
- na 10% wysokości pomieszczenia stężenie dwutlenku spadło do 33,6% po 106 minutach badania.



Rysunek 16. Średnia temperatura w badanym pomieszczeniu w funkcji czasu

Analiza wyników badania temperatury wewnątrz pomieszczenia w funkcji czasu podczas wylądowania dwutlenku węgla do badanego pomieszczenia:

- początkowo temperatura w pomieszczeniu wzrasta w skutek emisji ciepła przez pożar testowy,
- w trakcie wylądowania gazu temperatura gwałtownie spada aż do temperatury 0°C oraz utrzymuje się do momentu zakończenia gaszenia,
- po wylądowaniu temperatura zaczyna wzrastać początkowo na najwyższej wysokości, a następnie stopniowo na niższych,



- w trakcie trwania badania temperatura w badanym pomieszczeniu powoli wzrasta osiągając temperaturę powietrza spoza pomieszczenia.

#### **4.2.4. Modelowanie numeryczne uwolnień substancji palnych**

Przemysł chemiczny oraz rafineryjny związany jest nieodłącznie ze stosowanymi substancjami niebezpiecznymi, w tym również o właściwościach palnych. Aby dobrze poznać zagrożenia związane z tymi substancjami konieczne jest określenie skali możliwego awaryjnego uwolnienia tych substancji oraz ich rozprzestrzenienia się, jak również przeanalizowanie efektów ich uwolnienia z urządzeń i instalacji przemysłowych, odnosząc się do rzeczywistych awarii w przemyśle.

##### **4.2.4.1. Zastosowanie bezwymiarowych modeli oceny skutków uwolnień**

Program ALOHA, opracowany przez Amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (EPA<sup>1</sup>), umożliwia prowadzenie obliczeń dotyczących awaryjnego uwolnienia substancji niebezpiecznych z urządzeń oraz aparatów procesowych wraz z wyświetleniem skali potencjalnych zagrożeń, w bezpośrednim otoczeniu źródła uwolnienia. Wyniki takich obliczeń dają podstawę do podjęcia dalszych decyzji dotyczących niezbędnych działań mających na celu zmniejszenie skutków awarii przemysłowej. Program ten, ze względu na prostą obsługę oraz szybkość obliczeń, zalicza się do narzędzi wspomagających decyzje w sytuacjach mających znamiona awarii przemysłowej. Program ten umożliwia również implementację danych wejściowych do obliczeń nie zawartych w menu, a uzyskanych za pomocą zewnętrznych metodyk obliczeniowych w zakresie właściwości fizykochemicznych substancji niebezpiecznych lub na podstawie badań doświadczalnych. Niewątpliwą wadą programu ALOHA jest brak możliwości bezpośredniego wyświetlania stref zagrożeń na mapach obejmujących rzeczywiste miejsce awarii przemysłowej. Wymagane jest zatem dodatkowe oprogramowanie, które zaimplementuje wyniki na istniejącej mapie. Nie bez znaczenia jest tutaj spójność danych wynikowych (jednostki, skala mapy, itp.). Połączenie narzędzi: programu ALOHA oraz programu typu GIS pozwoliłoby zatem w sytuacjach uwolnienia niebezpiecznych substancji na szybką ocenę wielkości obszaru objętego zagrożeniem oraz umożliwiłoby odpowiednim służbom i organom podjęcie odpowiednich decyzji np. ewakuację zagrożonego obszaru lub decyzji o zaangażowaniu odpowiedniej ilości sił i środków. W ramach badań dokonano zatem tego przedsięwzięcia. Ponieważ bardzo często w sytuacjach zagrożenia uwolnieniem substancji niebezpiecznych czynnikiem decydującym jest czas reakcji odpowiednich służb, głównymi kryteriami przy wyborze drogi postępowania powinna być

<sup>1</sup> [www.epa.gov](http://www.epa.gov)

minimalizacja czasu koniecznego do przedstawienia wyników oraz dostępność oprogramowania. Ze względu na powyższe kryteria do dokładnego opisu wybrano darmowe oprogramowanie MARPLOT oraz dostępną on-line aplikację Google Maps. Ponadto, przedstawiono alternatywne możliwości wykorzystania darmowej wersji programu ArcGIS Explorer oraz map terenowych miejsca zdarzenia w formacie pliku graficznego. Program MARPLOT został stworzony przez instytucje rządowe Stanów Zjednoczonych: National Oceanic and Atmospheric Administration oraz EPA do wyświetlania oraz edycji map terenowych używanych do określania zasięgów stref zagrożeń związanych z uwolnieniem substancji niebezpiecznych do otoczenia. Wykorzystanie darmowych narzędzi obliczeniowych do modelowania skutków uwolnień substancji niebezpiecznych do otoczenia daje zatem możliwość przeprowadzania niezbędnych analiz oraz ocen w zakresie inżynierii środowiska, a także oddziaływania uwolnień substancji palnych na środowisko. Właściwy dobór scenariuszy awaryjnych, wykorzystanie dostępnych narzędzi obliczeniowych oraz prawidłowa wizualizacja tych wyników na mapach terenowych stanowić może podstawę do prawidłowego planowania oraz zagospodarowania przestrzennego obszarów przewidzianych do zabudowy przez instalacje przemysłowe, w których spodziewane jest stosowanie substancji palnych.

#### 4.2.4.2. Symulacje CFD przejścia do detonacji w gazach

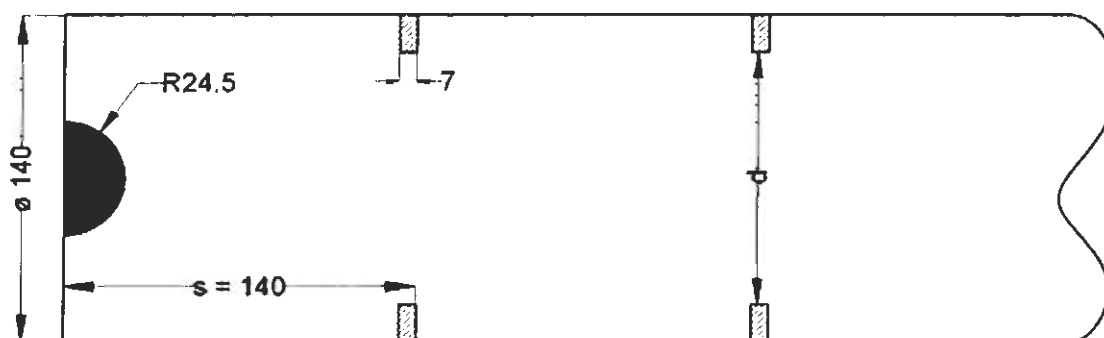
Celem opisanych tu badań numerycznych było przeprowadzenie symulacji numerycznych CFD<sup>2</sup> rozprzestrzeniania się płomienia w kanale z przeszkodami oraz jego przejścia do detonacji, jak również porównanie wyników z wynikami eksperymentalnymi. Symulowaną mieszaniną była mieszanina wodoru z powietrzem technicznym (tlen i azot) o składzie stechiometrycznym i następujących parametrach początkowych: ciśnienie 1 bar oraz temperatura 293 K. W tym celu wykorzystywany był pakiet OpenFOAM wraz ze specjalnym solverem ddtFOAM, dedykowanym do analiz przejścia od spalania deflagacyjnego do detonacji. Symulowana geometria odpowiadała użytym konfiguracjom rury detonacyjnej podczas badań doświadczalnych. Miało to na celu umożliwienie porównania wyników w celu weryfikacji wyników otrzymanych z solvera ddtFoam. Rura detonacyjna użyta w eksperymentach miała średnicę wewnętrzną  $D = 140$  mm, do środka wsuwane były przeszkody tak, aby manipulować wartością wskaźnika blokady przekroju BR od 0,4 do 0,7. Dodatkowo zmieniano również odległości pomiędzy przeszkodami, wynosiły one  $1D = 140$  mm,  $2D = 280$  mm lub  $3D = 420$  mm, w sumie dawało to 12 przypadków. Wynikami przeprowadzonych symulacji były przebiegi ciśnienia oraz temperatury w czasie w ustawionych punktach pomiarowych odpowiadających rozmieszczeniu czujników ciśnienia. Na podstawie przebiegów ciśnienia, wyznaczano średnią

<sup>2</sup> Computational Fluid Dynamics – Numeryczna Dynamika Płynów.

prędkość detonacji pomiędzy kolejnymi parami czujników. Otrzymano również profile ciśnienia, temperatury oraz prędkości dla różnych chwil czasowych na podstawie których określano czy model przewidział przejście do detonacji. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że w każdym przypadku zaszło przejście do detonacji. Sprawdzony został warunek zaproponowany przez Dorofeev'a  $L > 7\lambda$ , który został spełniony w każdym przypadku. Wyniki te stoją jednak w sprzeczności z uzyskanymi w eksperymentach. Rozbieżność ta została przeanalizowana. Pakiet obliczeniowy OpenFOAM<sup>3</sup> umożliwia rozwiązywanie szerokiej gamy zagadnień, poczynając od elektrodynamiki, przez dynamikę ciała stałego, aż do złożonych obliczeń CFD uwzględniających reakcje chemiczne, turbulencje oraz przewodnictwo cieplne. Oprogramowanie to napisane zostało w języku C++ i rozpowszechniane na zasadzie wolnego oprogramowania. Posiada ono metody odpowiednie do rozwiązywania konkretnych problemów naukowych, specjalne biblioteki do przygotowywania siatek obliczeniowych oraz moduły służące do wizualizacji wyników. Dzięki otwartemu źródłu, istnieje możliwość dopisania własnych procedur skonkretyzowanych pod dane zagadnienie. Przykładem takiego podejścia jest używany w tej pracy solver ddtFoam. Jest to specjalne rozszerzenie do programu OpenFOAM zawierające solver dedykowany do symulowania przejścia deflagracji do detonacji. Dostępność programu OpenFOAM na zasadzie wolnego oprogramowania była jedną z przyczyn wybrania tego programu jako podstawy do stworzenia solvera ddtFoam. Dodatkowym argumentem była wbudowana możliwość OpenFOAM do prowadzenia obliczeń na siatkach niestrukturalnych. W kontekście zastosowań oprogramowania do obliczeń w bardziej skomplikowanych geometriach stanowi niewątpliwy atut. Głównym celem stworzenia solvera ddtFoam było umożliwienie symulacji, zarówno deflagracji, jak i detonacji ze szczególnym uwzględnieniem momentu przejścia pomiędzy tymi typami spalania. Bardzo ważnym warunkiem było zrobienie takiego programu, który zapewniłby dostatecznie dokładne wyniki równocześnie nie wnikając we wszystkie szczegóły rozwiązywanego przepływu. Pozwoliłoby to zastosować dużo większą siatkę niż dotychczas, co w konsekwencji umożliwiłoby symulacje spalania w większych oraz bardziej skomplikowanych geometriach. Powszechnie przyjętym jest, że w przypadku stosowania do symulacji CFD jednostopniowego równania Arrhenius'a potrzebna rozdzielczość dla przepływu nielepkiego, to min. 20 [komórek/pół długości reakcji], żeby otrzymać poprawne wyniki wydzielania ciepła, interakcji fali uderzeniowej z płomieniem, jak również wielkości komórki detonacyjnej. W przypadku uwzględnienia efektów dyfuzji (ważne przy szybkich deflagracjach i DDT), wartość ta wzrasta do zakresu 25-300 (w zależności od energii aktywacji mieszaniny), a jeżeli do uproszczonej kinetyki reakcji stosuje się szczegółowe mechanizmy chemiczne, liczba ta rośnie aż do rzędu  $10^3$ . Przy takich wymaganiach, prowadzenie obliczeń dla większych geometrii jest praktycznie niemożliwe, stąd wynika potrzeba stworzenia

<sup>3</sup> <https://openfoam.org/>

oprogramowania, które jak napisano wyżej, dawałoby możliwość prowadzenia symulacji na dużo większych siatkach, bez wnikania we wszystkie szczegóły przepływu, ciągle jednak zachowując odpowiednią poprawność wyników. Na podstawie analiz i porównania wyników eksperymentów z symulacjami, stwierdzono, że wiarygodny model numeryczny DDT nie musi koniecznie rozwiązywać wszystkich, najmniejszych szczegółów badanego przepływu. Wyróżnionymi, najważniejszymi, cechami były możliwość prawidłowego przewidywania lokalnego tempa wyzwiania energii, wzrostu gęstości na skutek sprężania w fali uderzeniowej, prędkości spalania turbulentnego oraz powstawania frontu detonacyjnego. Symulowanym przypadkiem był zapłon mieszaniny gazowej w okrągłej rurze detonacyjnej o długości  $L = 6000$  mm i średnicy wewnętrznej  $D = 140$  mm. Wewnątrz rury znajdowały się przeszkody w kształcie pierścieni o zmiennej średnicy wewnętrznej dające w wyniku zmienny współczynnik blokady przekroju (BR) w zakresie od 0,4 do 0,7 z podziałką co 0,1. Współczynnik ten definiowany jest jako pole zajmowane przez przeszkodę odniesione do pola przekroju nominalnego kanału. Przy lewej krawędzi rury, w chwili  $t=0$ , umieszczano półkolisty obszar spalanej mieszaniny o promieniu 24,5 mm, od którego następował zapłon. W celu uproszczenia oraz przyspieszenia obliczeń symulacje prowadzono w przestrzeni dwuwymiarowej. Rysunek 17 pokazuje schematycznie wygląd przestrzeni obliczeniowej. Opisane powyżej konfiguracje badanej geometrii odpowiadały przypadkom z badań eksperymentalnych.



Rysunek 17. Schemat początkowego odcinka badanej geometrii

Wykorzystana do obliczeń siatka składała się z kwadratów o wymiarach 1 mm x 1 mm w całej domenie obliczeniowej. Jest to prosta siatka, w której nie wykorzystano żadnych algorytmów adaptacyjnego zagęszczania. W porównaniu do zwyczajowo używanych siatek z algorytmami zagęszczającymi, gdzie wielkość elementu mogła dochodzić nawet do 1/512 cm, rozmiar ten może dziwić, jednak wynika on z charakterystyki solwera zastosowanego do obliczeń. W celu ułatwienia porównywania wyników z otrzymanymi w badaniach doświadczalnych postanowiono przyjąć taki sam podział na przypadki. Wszystkie wyniki zostały zatem podzielone na 4 główne

przypadki wg BR, które następnie dzieliły się na kolejne 3 względem S. Podział ten wygląda następująco:

Przypadek 1: współczynnik BR = 0,7

- przypadek 1A – S = 1D,
- przypadek 1B – S = 2D,
- przypadek 1C – S = 3D,

Przypadek 2: współczynnik BR = 0,6

- przypadek 2A – S = 1D,
- przypadek 2B – S = 2D,
- przypadek 2C – S = 3D,

Przypadek 3: współczynnik BR = 0,5

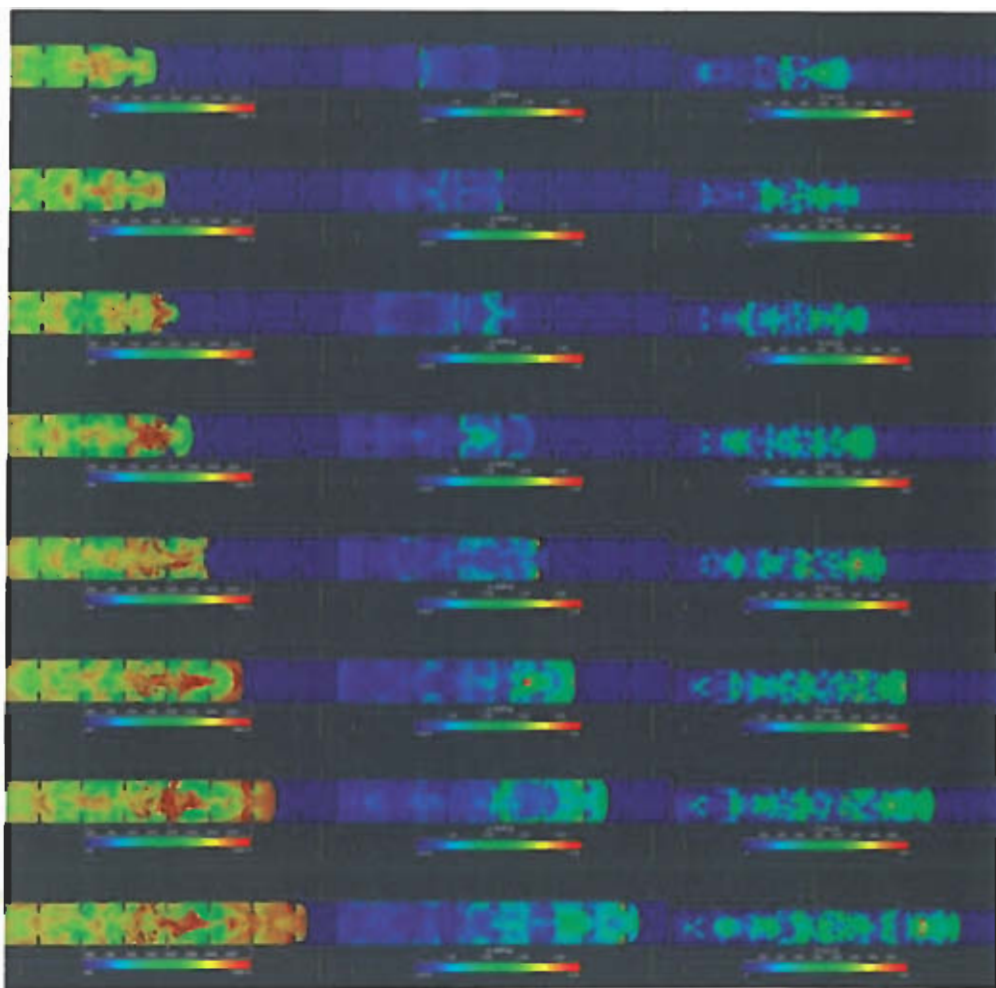
- przypadek 3A – S = 1D,
- przypadek 3B – S = 2D,
- przypadek 3C – S = 3D,

Przypadek 4: współczynnik BR = 0,4

- przypadek 4A – S = 1D,
- przypadek 4B – S = 2D,
- przypadek 4C – S = 3D.

W analizowanych tu badaniach doświadczalnych używano 9 czujników ciśnienia, dzięki którym wyznaczano m.in. średnią prędkość frontu spalania pomiędzy czujnikami. Również w symulacjach ustawiono specjalne punkty pomiarowe tak, aby odpowiadały one pozycjom czujników ciśnienia w eksperymentach. Dla przypadku 1A, współczynnik przekrycia kanału BR wynosi 0,7, natomiast odległość pomiędzy przeszkodami jest równa  $S = 1D = 140$  mm. Średnica wewnętrzna przeszkody wynosi  $d = 77$  mm. Rysunek 18 obrazuje profile temperatury, ciśnienia i prędkości dla kilku kroków czasowych przed oraz po zjawisku DDT. Przejście do detonacji nastąpiło w pobliżu 6 przeszkody, prawdopodobnie po odbiciu się fali uderzeniowej od przeszkody. Można zaobserwować 2 niezależne fronty detonacyjne propagujące z góry i z dołu.





**Rysunek 18.** Profile ciśnienia, temperatury i prędkości w obszarze przejścia do detonacji, uzyskane w programie OpenFOAM i solverze ddtFoam

Badania te pokazują, że przy zastosowaniu odpowiednich modeli numerycznych, większość z nich jest darmowa do pozyskania oraz użytkowania, możliwe jest przeprowadzenie rzetelnych obliczeń w zakresie awaryjnych uwolnień substancji palnych do środowiska i w konsekwencji pożarów lub wybuchów substancji stosowanych w instalacjach przemysłowych. Wydaje się zatem, że wyzwaniem dla inżynierii środowiska w obliczu obecnie dostępnych technik komputerowych jest przygotowanie szeregu modeli obliczeniowych, za pomocą których możliwe będzie dokonywanie zaawansowanych analiz numerycznych w zakresie oddziaływania na środowisko uwolnień substancji palnych lub szerzej substancji niebezpiecznych.

### 4.3. Podsumowanie

W monografii pt. „Awaryjne uwolnienia substancji palnych do środowiska”, stanowiącej osiągnięcie naukowe na potrzeby postępowania habilitacyjnego, przedstawiono podsumowanie dorobku naukowego autora na podstawie przeprowadzonych przez niego prac badawczych w okresie 2012-2017 wraz z opisem najważniejszych badań doświadczalnych oraz symulacji numerycznych w obszarze awaryjnych uwolnień substancji palnych, w tym pożarów oraz wybuchów oraz metod ograniczania tego typu uwolnień do środowiska, którym niewątpliwie jest zarówno środowisko naturalne, w tym m.in. powietrze, jak również bezpośrednie otoczenie miejsc pracy, jako tzw. środowisko pracy. We wstępie do monografii opisano typowe scenariusze awaryjne towarzyszące uwolnieniom substancji palnych do środowiska w warunkach przemysłowych, w tym przede wszystkim pożar błyskawiczny typu Flash Fire, pożar strumieniowy typu Jet Fire, wybuch fizyczny typu BLEVE, czy też wybuch chemiczny typu VCE. Wszystkie tego typu zdarzenia nie są oderwane od doświadczeń krajowego oraz międzynarodowego przemysłu, a skalę ich oddziaływania negatywnego na środowisko potwierdzają tylko zdarzenia i awarie przemysłowe, które miały miejsce. Omówiono również mechanizmy powstawania tych zjawisk, różnice pomiędzy nimi oraz odnośniki do literatury w celu poszerzenia wiedzy czytelników. Przedstawiono również analizę statystyczną uwolnień substancji palnych do środowiska, która jest dobrym potwierdzeniem słuszności celu tego opracowania. Kilka wybranych awarii, w których doszło do uwolnienia substancji palnych do środowiska opisano również w treści tej monografii, w rozdziale 3. Na zdarzenia te składają się dwa przypadki spoza terenu Polski, w tym wyciek i eksplozja cykloheksanu w Flixborough i pożar oraz wybuch w bazie paliw w Buncefield, jak również przykłady awarii z Polski, w tym pożar rafinerii w Czechowicach-Dziedzicach oraz uwolnienie i zapalenie się gazu ziemnego w Jankowie Przygodzkim. Opisano tu na podstawie dostępnych analiz prawdopodobne przyczyny, mechanizm oraz skutki tych zdarzeń. W kolejnym, czwartym rozdziale opisano oddziaływanie pożarów oraz wybuchów na środowisko, za pomocą przeglądu stanu wiedzy w tym obszarze. Składają się na to: oddziaływanie fali nadciśnienia, promieniowania cieplnego, emisja toksycznych produktów spalania oraz oddziaływanie odłamków z instalacji i urządzeń. Rozdział ten stanowi dalsze uzasadnienie celu przedstawionych dalej oryginalnych prac badawczych i zwraca uwagę na konkretne zagrożenia związane z pożarami i wybuchami. Na uwagę zasługuje szczególnie rozdział 5 i 6. W rozdziale 5 przedstawiono wyniki oryginalnych badań doświadczalnych, wnoszących nową wiedzę techniczną w dziedzinie inżynierii środowiska. Rozdział 6 obejmuje opis prac naukowych prowadzonych przez autora w zakresie metod i sposobów ograniczania awaryjnych uwolnień substancji palnych do środowiska. Opisano tu wyniki oryginalnych prac doświadczalnych w zakresie detekcji pożarów, wpływu

dotatku wody podczas wybuchów par cieczy palnych, redukcji stężeń substancji palnych poprzez wylądowanie gazu obojętnego, czy też aktywnych metod i środków tłumienia wybuchów oraz detonacji w warunkach awaryjnego uwolnienia substancji palnej do środowiska. Metody te, pomimo tego, że stanowią tylko część prac badawczych autora, stanowią istotny wkład w rozwój dziedziny inżynierii środowiska, zapewniając tym samym możliwość ograniczenia negatywnego oddziaływania substancji palnych na środowisko podczas ich uwolnienia z instalacji przemysłowych. Rozdział 7 to opis badań numerycznych z wykorzystaniem nowoczesnych technologii informatycznych oraz zaawansowanych modeli komputerowych, dzięki którym w inżynierii środowiska możliwe jest przeprowadzanie skomplikowanych obliczeń oraz symulacji numerycznych obrazujących skalę oddziaływania na środowisko zjawisk takich jak pożary, czy wybuchy substancji palnych. Możliwość wykorzystania takich technologii obliczeniowych wraz z rosnącym dostępem do dużej mocy obliczeniowych zapewniają, że w inżynierii środowiska przeprowadzać można pewnego rodzaju „wirtualne eksperymenty” za pomocą komputerów, co znacznie ułatwia prowadzenie badań naukowych, a także nie wymaga ogromnych środków finansowych na prowadzenie długich i skomplikowanych badań doświadczalnych. Wydaje się zatem, że przyszłość inżynierii środowiska to walidacja dostępnych modeli numerycznych oraz opracowywanie nowych technologii w obszarze przewidywania negatywnego oddziaływania na środowisko w konsekwencji zarówno działalności człowieka, przemysłu, jak również klęsk żywiołowych.

##### **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych**

Wynikiem mojej pracy naukowej po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych są łącznie **32 publikacje**, z czego **7 publikacji** w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports oraz **25 publikacji** w czasopismach naukowych z tzw. listy „B” czasopism naukowych MNiSW. Ponadto, jestem autorem następujących rozdziałów w monografiach oraz współautorem skryptu dla studentów Politechniki Warszawskiej:

1. Porowski R., Gieras M., Laboratorium Spalania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2018, ISBN: 978-83-7814-706-0.
2. Porowski R., Teodorczyk A., Rudy W., Bezpieczeństwo stosowania mieszanin metanowo-wodorowych w przemyśle, 2013, ISBN: 978-83-938045-0-4.
3. Porowski R., Małozieć D., Naukowe metody wspomagające proces ustalania przyczyn powstawania pożarów, rozdział w książce pt. „Czerwona Księga Pożarów”, Tom II, 2016, str. 151-209, ISBN: 978-83-61520-79-5.
4. Porowski R., Małozieć D., Lesiak P., Dziechciarz A., Modelowanie zagrożeń powstałych w wyniku awarii przemysłowych z wykorzystaniem programów ALOHA i RIZEX-2, rozdział

w książce pt. „Wybrane zagadnienia z zakresu planowania cywilnego w systemie zarządzania kryzysowego RP”, 2014, ISBN: 978-83-61520-23-8.


Poniżej przedstawiono listę dodatkowych publikacji w ww. czasopismach naukowych, opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych:

1. Rudy W., Kuznetsov M., Porowski R., Teodorczyk A., Grune J., Sempert K., Critical conditions of hydrogen-air detonation in partially confined geometry, *Proceedings of the Combustion Institute*, 34 (2013), 1965-1972, Impact factor: 3,214, Liczba punktów MNiSW: 40.
2. Porowski R., Rudy W., Teodorczyk A., Analiza mechanizmów samozapłonu wodoru przy jego uwolnieniu do atmosfery, *Przemysł Chemiczny*, 92/1 (2013), 76-81, Impact factor: 0,385, Liczba punktów MNiSW: 15.
3. Porowski R., Lesiak P., Teodorczyk A., Analiza zjawiska boilover podczas pożarów cieczy naftopochodnych magazynowanych w zbiornikach, *Przemysł Chemiczny*, 92/4 (2013), 518-521, Impact factor: 0,385, Liczba punktów MNiSW: 15.
4. Grabarczyk M., Porowski R., Teodorczyk A., Badanie granic wybuchowości par cieczy palnych w podwyższonych temperaturach, *Przemysł Chemiczny*, 92/11 (2013), 1000-1002, Impact factor: 0,385, Liczba punktów MNiSW: 15.
5. Porowski R., Teodorczyk A., Experimental study on DDT for hydrogen-methane-air mixtures in tube with obstacles, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26 (2013), 374-379, Impact factor: 1,818, Liczba punktów MNiSW: 25.
6. Porowski R., Wnęk W., Tłumienie wybuchów w przemyśle chemicznym, *Przemysł Chemiczny*, 94/4 (2015), 605-607, Impact factor: 0,385, Liczba punktów MNiSW: 15.
7. Porowski R., Odciażanie wybuchów w przemyśle: Przegląd stanu wiedzy, *Przemysł Chemiczny*, 95/11 (2016), 1000-1005, Impact factor: 0,385, Liczba punktów MNiSW: 15.
8. Porowski R., Rudy W., Teodorczyk A., Analiza metod badawczych granic wybuchowości cieczy palnych, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 04, 2012, 63-70, Liczba punktów MNiSW: 13.
9. Porowski R., Małozieć D., Zagrożeń wybuchem pyłów palnych oraz metody zapobiegania, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 04, 2012, 107-117, Liczba punktów MNiSW: 13.
10. Lesiak P., Porowski R., Ocena skutków awarii przemysłowej w instalacjach procesowych, w tym efektu domino, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 03, 2012, 13-26, Liczba punktów MNiSW: 13.

11. Porowski R., Lesiak P., Rudy W., Strzyżewska M., Zjawisko ciągu wstecznego: Backdraft, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, vol. 30, issue 2, 2013, 41-50, Liczba punktów MNiSW: 13.
12. Porowski R., Rudy W., Teodorczyk A., Badania doświadczalne i numeryczne temperatury zapłonu wybranych mieszanin cieczy palnych, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, vol. 31, issue 3, 2013, 103-110, Liczba punktów MNiSW: 13.
13. Kielin J., Porowski R., Małozieć D., Majka A., Lesiak P., Budynek do ćwiczeń pożarowych dla ratowników KSRG: Analiza wymagań i przykładowe rozwiązania, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, vol. 32, issue 4, 2013, 115-121, Liczba punktów MNiSW: 13.
14. Porowski R., Alternative ignition source for testing dust explosion characteristics in closed vessel, *Archivum Combustionis*, vol. 34 (2014), no. 1, Liczba punktów MNiSW: 12.
15. Grabarczyk M., Porowski R., Teodorczyk A., Flammability characteristics of butanol fuel blends at various initial temperatures. *Archivum Combustionis*, vol. 34 (2014), no. 1, Liczba punktów MNiSW: 12.
16. Porowski R., Bodalski D., Strzyżewska M., Badania doświadczalne i analiza cyfrowa ziarnistości pyłów palnych, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, vol. 36, issue 4, 2014, 77-84, Liczba punktów MNiSW: 13.
17. Porowski R., Zjawisko detonacji mieszanin pyłowych, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, vol. 36, issue 4, 2014, 85-93, Liczba punktów MNiSW: 13.
18. Kłapsa W., Porowski R., Bodalski D., Reakcja na ogień kabli elektrycznych - Nowe podejście w zakresie klasyfikacji, *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, 04/2014, 17-23, Liczba punktów MNiSW: 5.
19. Porowski R., Wnęk W., Wybrane aspekty projektowania wentylacji pożarowej tuneli drogowych, *Rynek Instalacyjny*, 09/2015, 54-58, Liczba punktów MNiSW: 6.
20. Porowski R., Wprowadzenie do teorii wybuchów jądrowych, *Zeszyty Naukowe SGSP*, 55(3), 2015, 25-38, Liczba punktów MNiSW: 7.
21. Wnęk W., Kubica P., Porowski R., Zabezpieczanie przeciwpożarowe serwerowni poprzez obniżenie poziomu tlenu, *Elektro Info*, 10, 2015, Liczba punktów MNiSW: 6.
22. Wnęk W., Porowski R., Jargiello M., Wpływ pyłów pochodzenia drzewnego na działanie czujek pożarowych dymu, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, vol. 42, issue 2, 2016, 43-55. Liczba MNiSW: 13.
23. Porowski R., Węsierski T., Małozieć D., Application of data statistics for fire risk analysis in residential buildings, *Archivum Combustionis*, vol. 36 (2016), no. 2, Liczba punktów MNiSW: 12.



24. Porowski R., Janik N., Wnęk W., Wpływ rodzaju drewna na czas zadziałania liniowych czujek dymu, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, vol. 43, issue 4, 2016, Liczba punktów MNiSW: 13.
25. Porowski R., Zjawisko przejścia do detonacji w mieszaninach gazowych - Przegląd stanu wiedzy, *Zeszyty Naukowe SGSP*, 59/3, 2016, 21-44, Liczba punktów MNiSW: 7.
26. Porowski R., Analiza metod określania ciepła spalania oraz wartości opałowej paliw, *Zeszyty Naukowe SGSP*, 59/3, 2016, 393-418, Liczba punktów MNiSW: 7.
27. Mazur R., Porowski R., Klapsa W., Wybuchy zbiorników z gazami technicznymi - Realne zagrożenie, czy przejawiony strach?, *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, vol. 43, issue 4, 2016, Liczba punktów MNiSW: 13.
28. Idzikowska T., Porowski R., Bezpieczeństwo lotów kosmicznych – Przegląd stanu normalizacji w Europie, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej: Transport*, z. 114, 2016, 139-148, Liczba punktów MNiSW: 7.
29. Porowski R., Siatkowski S., Numerical investigation on the effect of obstacles in DDT of hydrogen-air mixtures using OpenFOAM, *Archivum Combustionis*, vol. 37 no. 1, 2017, Liczba punktów MNiSW: 12.
30. Porowski R., Wnęk W., Wskazówki do przygotowania scenariuszy pożarowych, *Rynek Instalacyjny, Rynek Instalacyjny*, 03/2017, 24-28, Liczba punktów MNiSW: 6.
31. Porowski R., Zieziula D., Aktywne metody tłumienia detonacji w mieszaninach gazowych, *Zeszyty Naukowe SGSP*, nr 62, tom 2, 2017, 83-100, Liczba punktów MNiSW: 7.
32. Porowski R., Analiza termiczna, *Zeszyty Naukowe SGSP*, nr 64, 2017, Liczba punktów MNiSW: 7.



.....  
dr inż. Rafał Porowski