



Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Adrian Toman

**Oznaczenie parametrów zapalności
i wybuchowości aerozoli cieczy palnych
w oparciu o nową metodę badawczą**

Promotor: prof. dr hab. inż. Eugeniusz Krause

Promotor pomocniczy: dr inż. Adam Duda

Katowice, 2025

Podziękowania

*Niniejsza rozprawa doktorska nie byłaby możliwa bez wsparcia wielu osób, którym chciałbym serdecznie podziękować. Przede wszystkim pragnę wyrazić najgłębszą wdzięczność moim **promotorom**, za nieustanne wsparcie, cenne rady i konstruktywną krytykę na każdym etapie moich badań.*

Serdeczne podziękowania kieruję również do wszystkich osób, które wspierały mnie podczas przygotowywania i prowadzenia badań do tej rozprawy.

*W szczególności dziękuję moim kolegom i koleżankom z **Kopalni Doświadczalnej „Barbara” GIG–PIB**, kierownikowi i całemu zespołowi z laboratorium za inspirujące dyskusje i nieustanną motywację.*

Największe podziękowania kieruję do mojej rodziny, a w szczególności do mojej żony, za jej wsparcie i cierpliwość. Bez jej obecności ta praca nie byłaby możliwa.

Wreszcie, dziękuję wszystkim, którzy w jakikolwiek sposób przyczynili się do powstania tej rozprawy. Wasze wsparcie i zaufanie były dla mnie niezmiernie ważne.

Spis treści

Wykaz ważniejszych skrótów, nazw i pojęć.....	7
1. Wprowadzenie.....	11
2. Cel i zakres pracy.....	15
3. Tezy pracy	17
4. Podstawy teoretyczne	18
4.1. Gazy.....	18
4.2. Pyły.....	20
4.3. Ciecze/pary cieczy.....	22
4.4. Aerozole cieczy palnych.....	25
5. Przegląd literatury tematu rozprawy doktorskiej	29
5.1. Niebezpieczne zdarzenia z aerozolami.....	30
5.2. Przegląd dotychczasowych osiągnięć.....	31
5.2.1. Metody eksperymentalne	33
5.2.2. Test palności i wybuchowości według normy ASTM D3065-01.....	41
5.2.3. Test palności i wybuchowości według wytycznych dyrektywy UE [32008R1272]	43
6. Opracowanie metody badawczej aerozoli cieczy palnych.....	45
6.1. Założenia nowej metody badania aerozoli	48
6.1.1. Sposób wytwarzania aerozolu.....	50
6.1.2. Sposób pomiaru wielkości kropeł aerozolu	52
6.1.3. Wybór źródła zapłonu	54
7. Aparatura badawcza	56
7.1. Komora badawcza	57
7.2. Układ pompowo-wtryskowy	59
7.2.1. Układ pompowy	59
7.2.2. Wytwarzanie aerozolu.....	63
7.3. Źródło zapłonu	67
7.3.1. Generator iskier indukcyjnych	68
7.3.2. Generator iskier pojemnościowych.....	70
7.4. Układ sterowania i kontroli	72
7.5. System pomiarowy	74

8. Weryfikacja metody badawczej.....	80
8.1. Właściwości fizykochemiczne wybranych cieczy	80
8.2. Sprawdzenie poprawności działania układu pompowo-wtryskowego.....	81
8.3. Test wydajnościowy wtrysku	84
8.4. Pomiar wielkości cząstek aerozolu.....	86
8.5. Test sekwencji czasowej źródła zapłonu.....	98
8.6. Testy sprawdzające.....	103
9. Metoda badawcza	106
9.1. Procedura badawcza	106
9.1.1. Opis przepływu mediów i sygnałów na podstawie schematu.....	107
9.1.2. Procedura badawcza dla różnych czasów opóźnienia zapłonu	110
9.1.3. Procedura badawcza w celu zwiększenia zakresu stężeń	111
9.2. Oznaczanie parametrów wybuchowości i zapalności	112
9.2.1. Oznaczanie parametrów wybuchowości	112
9.2.2. Oznaczenie parametru zapalności	118
9.3. Postępowanie w metodzie badawczej	119
10. Wyniki badań	122
10.1. Oznaczanie parametrów wybuchowości p_{max} i $(dp/dt)_{max}$ dla aerozoli.....	122
10.2. Oznaczenie dolnej granicy wybuchowości DGW aerozoli	129
10.3. Oznaczenie minimalnej energii zapłonu MIE aerozoli	131
11. Analiza uzyskanych wyników	136
11.1. Parametry wybuchowości p_{max} i $(dp/dt)_{max}$	136
11.2. Dolna granica wybuchowości DGW	138
11.3. Minimalna energia zapłonu MIE	139
11.4. Analiza porównawcza uzyskanych wyników badań	140
12. Wnioski	144
Literatura	146
Spis rysunków	156
Spis tabel.....	161

Determination of flammability and explosion parameters of aerosols of flammable liquids based on a new test method

Abstract

The topic of aerosol explosion risk has been previously addressed, yet precise guidelines and preventive measures remain lacking. Implementing such measures requires a detailed understanding of the flammability and explosiveness of aerosols. Currently, the most effective way to expand knowledge in this area is through experimental research. Aerosols of flammable liquids are present in many industrial processes and can also appear accidentally in various technologies. When assessing explosion risks, liquid aerosols occupy an intermediate position between gases, liquid vapors, and dusts.

To comply with the ATEX directive [2014/34/EU] in explosion-hazard areas, it is essential to understand the flammability and explosive properties of aerosols. Unlike dusts and gases, aerosols lack specific guidelines, standardized testing equipment, and established testing methods beyond a simple binary classification (flammable/non-flammable).

This doctoral dissertation presents a novel method for determining the flammability and explosiveness parameters of flammable liquid aerosols, based on a newly designed and constructed test stand. The developed research methodology enables the determination of key flammability and explosiveness parameters, including minimum ignition energy (*MIE*), maximum explosion pressure (p_{max}), maximum rate of pressure rise $(dp/dt)_{max}$, and lower explosion limit (*LEL*).

The designed test station and innovative research method significantly differ from those used by other researchers. The uniqueness of this approach lies in introducing a controlled, shorter aerosol injection time without an additional carrier gas medium, which is typically used in other methods. This methodology allows for testing across a broad concentration range with a defined injection time and a specific particle size distribution range (based on the Sauter mean diameter), in accordance with the aerosol definition in standard [EN 60079-10].

Applying this newly developed method represents an innovative scientific and research solution for assessing aerosol explosion risks in workplaces and industrial installations. This allows for the selection of appropriate explosion prevention measures for aerosols and protective systems. Furthermore, it indicates the possibility of implementing suitable technological solutions and meeting legal requirements.

The determined parameters address an existing gap in research concerning the prevention of flammable liquid aerosol explosions..

Wykaz ważniejszych skrótów, nazw i pojęć

Aerozol	To układ koloidalny, w którym cząstki fazy rozproszonej (stałe lub ciekłe) są zawieszone w fazie rozpraszającej, którą najczęściej jest gaz lub powietrze.
Atmosfera wybuchowa	Mieszanina substancji palnych w postaci gazów, par, mgieł lub pyłów z powietrzem w warunkach atmosferycznych, w której – po zapaleniu – spalanie rozprzestrzenia się na całą niespaloną mieszaninę [PN-EN 14034].
barg	Jednostka ciśnienia w układzie jednostek niemetrycznych wyrażona w odniesieniu do ciśnienia atmosferycznego. Ciśnienie to określa różnicę między ciśnieniem absolutnym w układzie a ciśnieniem otaczającej atmosfery.
Ciecze palne	Substancje, które w określonych warunkach mogą tworzyć zapalne mieszaniny par z powietrzem. Podstawowym parametrem klasyfikującym palność cieczy jest temperatura zapłonu, czyli najniższa temperatura, w której ciecz wytwarza wystarczającą ilość par, aby mogły one ulec zapłonowi od inicjału, np. iskry lub płomienia [PN-EN 60079-10].
Ciężar właściwy	Gęstość cieczy w stosunku do gęstości wody
$(dp/dt)_{ex}$	Maksymalne nachylenie krzywej ciśnienia względem czasu podczas wybuchu mieszaniny paliwo-powietrze w zamkniętym zbiorniku [PN-EN 14034].
$(dp/dt)_m$	Maksymalna wartość szybkości wzrostu ciśnienia w czasie dla danej serii pomiarowej [Cesana-AG, Manual for 20-l-Apparatus].
$(dp/dt)_{max}$	Maksymalna wartość narastania ciśnienia w jednostce czasu podczas wybuchów wszystkich atmosfer wybuchowych z zakresu wybuchowości substancji palnej w zamkniętym zbiorniku, oznaczana w określonych warunkach badania i normalnych warunkach atmosferycznych [PN-EN 14034].
DGW	Dolna granica wybuchowości.

DSD	<i>Differential Size Distribution</i> (ang.) – termin używany w pomiarach rozmiaru cząstek aerozolu. Odnosi się do rozkładu wielkości cząstek w próbce i jest funkcją opisującą, jak liczba cząstek zmienia się w zależności od ich rozmiaru. <i>DSD</i> pokazuje, jak cząstki są rozmieszczone w różnych przedziałach wielkości.
GGW	Górna granica wybuchowości.
GIG-PIB	Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy.
GST	Graniczne dla wybuchu stężenie tlenu.
K_G	Maksymalna wartość przyrostu ciśnienia w jednostce czasu $(dp/dt)_{max}$ podczas wybuchu określonej atmosfery wybuchowej w zamkniętym zbiorniku, w określonych warunkach badania znormalizowana do objętości zbiornika 1 m^3 przez pomnożenie przez $V^{1/3}$ [PN-EN 14797].
K_{max}, K_{St}	Stała pyłowa, niezależna od objętości, wielkość charakterystyczna, którą oblicza się korzystając z równania prawa objętościowego [PN-EN 14034].
Komora Wilsona	Zwana również komorą mgłową, jest urządzeniem służącym do detekcji cząstek jonizujących, takich jak cząstki alfa, beta, protony czy elektrony, przez śledzenie ich torów w formie widocznych śladów w nadprężonej parze. Jest to jedno z najstarszych urządzeń służących do obserwacji promieniowania jonizującego.
Lepkość	Właściwość cieczy stawiająca opór przepływowi ze względu na występowanie w niej wewnętrznego tarcia.
LFL	<i>Lower flammable limit</i> (ang.) – dolna granica palności. Stężenie palnego gazu lub pary w powietrzu, poniżej którego nie powstaje gazowa atmosfera wybuchowa.
MIE	Minimalna energia zapłonu.
Napięcie powierzchniowe	Właściwość cieczy, dzięki której cząsteczki powierzchniowe wykazują silne przyciąganie do wewnątrz, tworząc w ten sposób elastyczną powłokę, która ma tendencję do kurczenia się do minimalnej powierzchni.

Palność	Zdolność materiału do spalania [Dz.U. z 2015 r. poz. 1422 ze zm.].
p_{ex}	Najwyższa wartość nadciśnienia powstającego w zamkniętym zbiorniku podczas wybuchu obłoku pyłu [PN-EN 14034].
p_m	Maksymalna wartość nadciśnienia z serii testów p_{ex} [Cesana-AG Manual for 20-l-Apparatus].
p_{max}	Maksymalna wartość nadciśnienia powstającego w zamkniętym zbiorniku podczas wybuchu atmosfery wybuchowej, oznaczana w określonych warunkach badania i normalnych warunkach atmosferycznych. Jest średnią wartością p_m wyznaczoną w serii testów [PN-EN 14034].
Pył	Małe cząsteczki ciała stałego w atmosferze, osiadające pod wpływem swojego ciężaru, które przez pewien czas mogą pozostawać zawieszone w powietrzu [PN ISO 4225].
SMD (D[3][2])	Średnia powierzchniowa, nazywana również średnią średnicą Sautera.
t_1	Czas spalania – różnica czasu między momentem włączenia zapłonu a momentem kulminacyjnym.
t_2	Czas indukcji – różnica czasu między aktywacją zapłonu, a przecięciem się stycznej przegięcia z linią 0.
t_d	Czas dyspersji.
t_v	Czas opóźnienia zapłonu – najważniejszy parametr kontrolny.
T_{CL}	Minimalna temperatura zapłonu obłoku pyłu.
T_{5mm}	Minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu.
Temperatura wrzenia	Temperatura, w której substancja zmienia się z cieczy w gaz. Dzieje się tak w wyniku osiągnięcia temperatury, w której prężność pary cieczy jest równa ciśnieniu atmosferycznemu obszaru, w którym się ona znajduje.
Temperatura zapłonu	Najniższa temperatura cieczy, przy której w określonych standardowych warunkach ciecz wydziela pary w ilości umożliwiającej utworzenie zapalnej mieszaniny pary i powietrza [PN-EN 60079-10-1:2021]
T_{SI}	Sklonność nagromadzeń pyłu do samozapalenia.

<i>UFL</i>	<i>Upper flammable limit</i> (ang.) – górna granica palności. Stężenie palnego gazu lub pary w powietrzu, powyżej którego nie powstaje gazowa atmosfera wybuchowa.
<i>ρ</i>	Rezystywność pyłu w warstwach.
Zapalność	Łatwość zapoczątkowania spalania materiałów palnych [Dz.U. z 2015 r. poz. 1422 ze zm.].

1. Wprowadzenie

Zagrożenia związane z wybuchami gazów, pyłów oraz par cieczy palnych w przemyśle towarzyszą nam od wielu wieków. Dynamiczny rozwój gospodarczy krajów był ściśle powiązany z rozwojem przemysłu wydobywczego, hutnictwa i budownictwa, przyczyniając się do zwiększenia występowania wybuchów. W związku z tym, w krajach uprzemysłowionych, w tym w Polsce, zaczęto podejmować prace naukowo-badawcze mające na celu przeciwdziałanie zjawiskom wybuchów gazów i pyłów przez dokładniejsze rozpoznanie ich mechanizmu.

Mieszaniny pyłowo-powietrzne, gazowo-pyłowe, gazowe, pary cieczy palnych oraz aerozole od wielu lat są przedmiotem badań prowadzonych w Laboratorium Wybuchowości Pyłów Przemysłowych, w Zakładzie Zwalczania Zagrożeń Pyłowych KD „Barbara” GIG-PIB [Lebecki i Śliż 1972, Dyduch 2017]. Badania te prowadzone są zarówno w skali laboratoryjnej, jak i w dużej skali na specjalistycznych stanowiskach badawczych. Działalność Laboratorium Wybuchowości Pyłów w KD „Barbara” GIG-PIB związana jest głównie z problematyką wybuchowości pyłów oraz doбором metod zwalczania zagrożenia wybuchem pyłów we wszystkich gałęziach przemysłu. Laboratorium realizuje cały zakres badań zapalności i wybuchowości pyłów zgodnie z normami europejskimi, a oznaczane parametry zapalności i wybuchowości pyłów przemysłowych umożliwiają przeprowadzenie oceny ryzyka jego wybuchu. Jednym z najważniejszych aspektów oceny ryzyka jest prawidłowa interpretacja wyników badań wybuchowości oraz oszacowanie skutków potencjalnego ryzyka wybuchu. W instalacjach przemysłowych, gdzie występują niebezpieczne pyły, niezbędne jest dokonanie takiej oceny. Laboratorium, o którym mowa powyżej, przeprowadza badania oraz oceny ryzyka, w oparciu o obowiązujące normy europejskie, w tym normę PN-EN 1127-1.

Ciągły rozwój przemysłu stawia nowe wyzwania badawcze, z uwagi na występowanie nowych zagrożeń. Przeprowadzone w zakładach przemysłowych oceny ryzyka wybuchowego wykazały, że aerozole cieczy palnych występujące w instalacjach przemysłowych stanowią istotne zagrożenie wybuchowe. Zgodnie z wytycznymi dyrektywy ATEX dotyczącymi minimalnych wymagań bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników zatrudnionych na stanowiskach pracy, gdzie mogą wystąpić atmosfery wybuchowe, w tym pyły, gazy i pary cieczy palnych, należy również uwzględnić aerozole cieczy. Aerozole mogą mieć istotny wpływ na wystąpienie zagrożenia związanego z łatwopalnością, co udowodnili między

innymi Bowen i Shirvill (1994) dla cieczy o wysokiej temperaturze zapłonu. Ciecz sama w sobie nie może zostać zapalona poniżej wartości temperatury zapłonu, ponieważ równowagowe stężenie par paliwa jest poniżej dolnej granicy palności (*LFL*). Badania przeprowadzone przez różnych eksperymentatorów takich jak: Sullivan i in. (1947), Eckhoff (1995), Addai i in. (2015-19), Yuan i in. (2019), El-Zahlanieh i in. (2020) wykazały, że chmury aerozolu cieczy palnych mogą być zapalane poniżej ich temperatury zapłonu, w zależności od występujących źródeł zapłonu – iskry elektrycznej, gorącej powierzchni czy otwartego płomienia. W porównaniu do par cieczy, aerozol charakteryzuje się szerszym zakresem granic palności. Gieras i in. (2008) dowiedli, że górna granica palności (*UFL*) aerozolu heksanu jest 3–9 razy wyższa niż mieszaniny wybuchowej heksanu z powietrzem. Problem dotyczy nie tylko cieczy łatwopalnych, ale również tych o wysokiej temperaturze zapłonu. Takie wypadki zostały opisane w publikacji [Kletz, 1975/76].

Mimo tego, że zagrożenie wybuchem aerozoli zostało zidentyfikowane już wcześniej, wciąż brakuje jednoznacznych wytycznych oraz środków profilaktycznych zapobiegających wybuchom. Skuteczne zapobieganie wybuchom aerozoli oraz wdrażanie odpowiednich środków profilaktycznych wymaga szczegółowej wiedzy na temat ich właściwości zapalnych i wybuchowych. W opracowanej w USA normie ASTM D3065-01 opisano dwie standardowe metody badań zapalności produktów aerozolowych: jedną, polegającą na rozpylaniu aerozolu na otwarty płomień i drugą – z użyciem zamkniętego bębna. Obie metody nie są powszechnie stosowane ze względu na niewystarczające dane dotyczące zapalności lub wybuchowości aerozoli.

Zgodnie z normą ASTM D3065-01 aerozol definiuje się jako dynamiczny zbiór kropeł rozproszonych w gazie. Palne ciecze w postaci aerozolu występują w wielu procesach przemysłowych, ponadto mogą także powstać przypadkowo. Przykładem jest rozszczelnienie instalacji zawierającej ciecz, co może w następstwie powodować powstanie aerozolu. Problematyka zagrożenia wybuchem aerozoli staje się coraz bardziej powszechna. Spełnienie wymagań obowiązującej dyrektywy ATEX [2014/34/UE] wymaga posiadania wiedzy na temat właściwości zapalnych i wybuchowych aerozoli. W ocenie ryzyka wybuchu aerozole cieczy zajmują miejsce między gazami i parami cieczy a pyłami. W przeciwieństwie do pyłów i gazów dla aerozoli nie zostały opracowane wytyczne, ani nie zbudowano do badań standardowej aparatury badawczej, ponadto stosowane metody badawcze dostarczają jedynie odpowiedzi binarnej (palny albo niepalny).

W trakcie wykonywania oceny ryzyka wybuchu pyłu w instalacjach przemysłowych wielokrotnie spotykałem się z problemem występowania aerozoli dla których brak jest wytycznych dotyczących ich wybuchowości. Problem ten występuje również w innych państwach Unii Europejskiej. Spalanie rozpylonych cieczy (aerozoli) jest przedmiotem wielu badań, na podstawie których optymalizuje się procesy spalania oraz identyfikuje występowanie potencjalnego zagrożenia. Dla uniknięcia zdarzeń związanych z wybuchami aerozoli lub ograniczenia ich występowania, konieczne jest ilościowe określenie parametrów ich cech zapalnych i wybuchowych.

Dla realizacji pracy doktorskiej zaprojektowałem i zbudowałem prototypowe urządzenie do oznaczania podstawowych parametrów wybuchowości aerozoli cieczy palnych, zapoznając się wcześniej z literaturą przedmiotu. Pomysł i projekt doświadczalnej aparatury badawczej wykonałem uwzględniając pozytywne i negatywne doświadczenia innych badaczy, a ostateczne stanowisko badawcze zbudowałem w kolejnych etapach. Najbardziej wymagający konstrukcyjnie okazał się skonstruowany przeze mnie układ pompowo-wtryskowy oraz jego sterowanie. Wprowadzanie zmian konstrukcyjnych i prowadzenie badań porównawczych, wymagało przeprowadzenia szeregu testów weryfikujących przyjętą metodykę badań. Od opracowania wstępnego projektu, konstrukcja aparatury, sterowanie oraz przyjęta procedura badawcza ulegały zmianom, wynikającym z własnych doświadczeń oraz wiedzy zaczerpniętej z literatury. W trakcie realizacji pracy doktorskiej w oparciu o przeprowadzone badania na wybranych cieczach oznaczyłem podstawowe parametry wybuchowości ich aerozoli.

Przeprowadzone prace umożliwiły mi rozszerzenie możliwości badawczych skonstruowanej aparatury o oznaczanie parametru zapalności, jakim jest minimalna energia zapłonu aerozoli (*MIE*). Różne źródła zapłonu mogą zainicjować wybuch aerozolu, a w większości instalacji przemysłowych podstawowe źródła zapłonu można wyeliminować. Na szczególną uwagę zasługuje możliwość zainicjowania wybuchu aerozolu przez wyładowania elektrostatyczne. Parametr minimalnej energii zapłonu (*MIE*) określa podatność rozpatrywanego aerozolu cieczy na zapalenie inicjowane wyładowaniami elektrostatycznymi. Skonstruowana przeze mnie aparatura i opracowana metodyka badań, pozwalają na wiarygodne i powtarzalne oznaczanie podstawowych parametrów wybuchowości aerozoli cieczy palnych dla których podanie liczbowych wartości parametrów jest niezbędne na etapie projektowania urządzeń i instalacji przemysłowych oraz podczas przeprowadzania oceny ryzyka wybuchu.

Niniejsza rozprawa doktorska przedstawia zakres prac konstrukcyjnych aparatury oraz badań wykonanych w Laboratorium Wybuchowości Pyłów Przemysłowych KD Barbara GIG–PIB. Wyniki badań były częściowo prezentowane na konferencjach i opublikowane. W początkowych rozdziałach przedstawiono cele pracy, tezę oraz podstawy teoretyczne wybuchowości gazów, pyłów i aerozoli. Rozdział 5 zawiera analizę literatury, z uwzględnieniem obecnego stanu wiedzy związanej z przyjętymi celami, a także dodatkowe informacje, uzasadniające potrzebę realizacji tematu pracy doktorskiej. Rozdział 6 omawia eksperymentalny aspekt badań, rozwija tematykę zmian w konfiguracji budowanej aparatury. Ponadto w tym rozdziale przedstawiono dobór elementów aparatury oraz opracowano metodologię badań. W rozdziale 7 opisano budowę aparatury zgodnie z przyjętą koncepcją pracy. Rozdział 8 poświęcony jest weryfikacji metody i kalibracji aparatury. W rozdziale 9 przedstawiono opracowaną metodę dostosowaną do możliwości badawczych zbudowanej aparatury, a także sposób realizacji celów pracy. Rozdział 10 zawiera opis badań zgodnych z przyjętymi celami i tezą pracy doktorskiej. Analiza wyników znajduje się w rozdziale 11, a w rozdziale 12 przedstawiono wnioski.

2. Cel i zakres pracy

Cel poznawczy pracy doktorskiej obejmował **opracowanie metody badawczej umożliwiającej oznaczanie podstawowych parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych na autorskim stanowisku badawczym**. Istniejące metody badawcze dotyczące wybuchowości pyłów [seria PN-EN 14034] oraz gazów [seria PN-EN 1839] nie uwzględniają aerozoli, dlatego koniecznym jest opracowanie nowych, odpowiednich procedur pomiarowych. Wynikiem tych prac było uzyskanie wartości liczbowych parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych, takich jak oznaczenie:

- maksymalnego ciśnienia wybuchu (p_{max}),
- maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia $(dp/dt)_{max}$,
- dolnej granicy wybuchowości (DGW),
- minimalnej energii zapłonu aerozoli cieczy palnych (MIE).

Pierwsze testy przeprowadzono z wykorzystaniem generatora iskier z indukcyjnością. W celu zwiększenia dokładności pomiarów skonstruowano generator iskier bez indukcyjności o zakresie energii od 1 mJ do 30 mJ, co odpowiada wartościom charakterystycznym dla wyładowań elektrostatycznych możliwych do wystąpienia w środowisku pracy.

Cel użytkowy pracy doktorskiej koncentrował się na zastosowaniu opracowanej metody oraz aparatury badawczej dla przeprowadzania oceny ryzyka wybuchu aerozoli na stanowiskach pracy oraz w otoczeniu instalacji przemysłowych. Opracowana metoda umożliwi dobór odpowiednich systemów zabezpieczających i profilaktyki przeciwybuchowej, uwzględniających wymogi prawne, w tym dyrektywy Unii Europejskiej. Obecnie żadna norma nie reguluje kryteriów wybuchowości aerozoli, choć ich definicja została zawarta w normie europejskiej [PN-EN IEC 60079-10-1] jako małe (poniżej 50 μm) cząsteczki cieczy zawieszone w atmosferze. W oparciu o definicję aerozolu, własne doświadczenia oraz badania innych eksperymentatorów [Eckhoff 1995, Addai 2016, Yuan i in. 2019, El – Zahlanieh i in. 2020], **skonstruowałem prototypowe urządzenie do pomiaru parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli, wykorzystując nowatorskie rozwiązania konstrukcyjne oraz opracowaną metodę badawczą**.

Jednym z głównych czynników wpływających na oznaczane wartości parametrów zapalności i wybuchowości jest sposób tworzenia się aerozolu przez rozpylanie cieczy.

Siła mechaniczna w następstwie ciśnienia cieczy podanego na dyszę rozpyła ciecz na aerozol o wielkości cząstek zależnej od typu dyszy i warunków dyspersji. Należy jednak

uwzględnić, że aerozol o średnicy kropli $< 10\ \mu\text{m}$ może zachowywać się podobnie jak pary cieczy. Małe, rozpylane kropelki aerozolu wytworzone przez dyszę odparowują przed płomieniem, a płomień zasadniczo rozchodzi się jak w mieszaninie para-powietrze. Założenia konstrukcyjne opracowanego stanowiska do badań zapalności i wybuchowości aerozoli uwzględniają zamkniętą, sferyczną komorę spalania o objętości 5 litrów, a średnica wytwarzanych kropelek będzie mieścić się w przedziale wartości 10–50 μm .

Skonstruowane przeze mnie stanowisko badawcze umożliwia oznaczanie podstawowych parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych oraz stanowi podstawę do prowadzenia dalszych prac nad doborem właściwych metod oceny ryzyka w instalacjach przemysłowych.

3. Tezy pracy

Przyjęte cele pracy mogą zostać osiągnięte w oparciu o wyniki z przeprowadzonych badań, na zaprojektowanej i skonstruowanej aparaturze badawczej. Stanowisko badawcze oraz opracowana autorska metoda znacznie różnią się od metod badawczych przedstawionych wcześniej badaczy [Addai 2016, Yuan i in. 2019, El-Zahlanieh i in. 2020]. Opracowana w ramach pracy doktorskiej nowa metoda oznaczania parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych posiada istotne zalety, które odróżniają ją od innych metod.

Na podstawie opracowanej metody wytwarzania aerozolu z cieczy oraz wykonanych przeze mnie badań sformułowano następujące tezy pracy:

- **Zastosowanie sterowanego, krótkiego czasu wytwarzania aerozoli bez dodatkowego medium gazowego prowadzi do bardziej precyzyjnej oceny właściwości zapalnych i wybuchowych aerozoli cieczy palnych.**
- **Właściwości wybuchowe aerozoli cieczy palnych wykazują zależność od temperatury w której są oznaczane oraz stopnia rozdrobnienia cząstek osiągając różne wartości przy średniej średnicy Sautera w przedziale 10–50 μm .**

Udowodnienie wyżej wymienionych tez oraz uwzględnienie ich w metodyce badawczej przyczyni się do właściwej i bardziej dokładnej oceny właściwości zapalnych i wybuchowych aerozoli cieczy palnych, zwiększając dokładność wyników badań aerozoli. Osiągnięcie celu pracy oraz zweryfikowanie tak sformułowanych tez wymaga przeprowadzenia analizy wyników z badań porównawczych wykonanych dla cieczy o zróżnicowanych właściwościach fizykochemicznych.

4. Podstawy teoretyczne

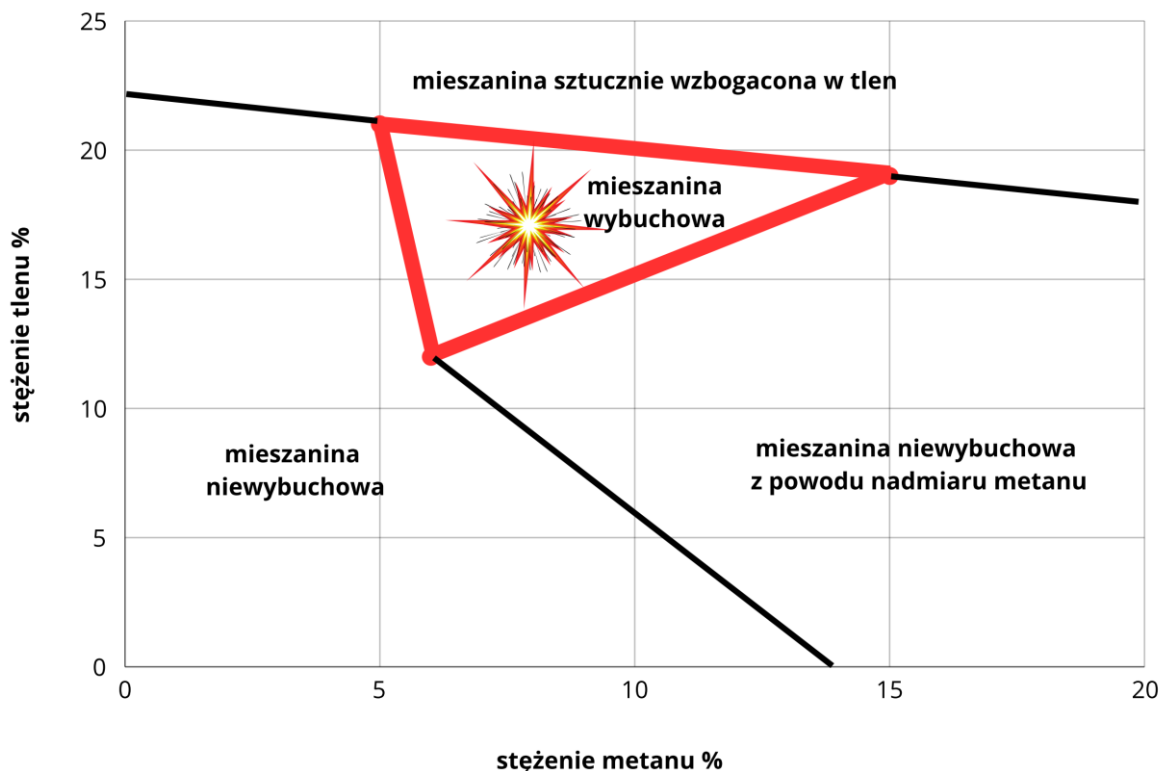
Rozwój techniki i przemysłu w XVIII–XIX wieku wiązał się z powstawaniem nowych zagrożeń [Price i Brown, 1922, Nicholson i in., 1992]. Odkąd zaczęło dochodzić do wybuchów, podejmowano różne wyzwania w celu opracowania metod zapobiegających takim zdarzeniom lub też łagodzących ich skutki [Bowen i Shirvill, 1994]. Nadmienić należy, że całkowite wyeliminowanie wybuchów w przemyśle jest trudne, to jednak na przestrzeni lat wypracowano wiele sposobów przeciwdziałania wybuchom, a także ograniczania ich skutków w przypadku, kiedy już dochodzi do wybuchu [Price i Brown, 1922]. Prowadzone prace w tym zakresie mają na celu wyeliminowanie lub przynajmniej zredukowanie ilości czynnika palnego w zagrożonych obszarach, jego inertyzację przez dodanie odpowiedniej ilości substancji niepalnych oraz ograniczenie źródeł zapłonu zdolnych do zainicjowania wybuchu. Podatność danej substancji takiej jak: pyły, gazy, pary cieczy palnych oraz aerozoli na wystąpienie zagrożenia wybuchowego, określa się zazwyczaj na podstawie parametrów fizykochemicznych, które ją charakteryzują.

4.1. Gazy

Prowadzenie eksploatacji węgla, gazu ziemnego czy ropy naftowej stworzyło między innymi zagrożenie wybuchem mieszaniny powietrzno–gazowej, powietrzno–pyłowej powodując tragiczne w skutkach wybuchy [Cybulski, 1973]. Zdarzenia te stały się powodem podjęcia badań nad granicami palności gazu i innych jego właściwości [Coward i in., 1939]. Gaz definiowany jest ogólnie jako stan skupienia charakteryzujący się całkowitą ruchliwością cząsteczek i nieograniczoną ekspansją [Zabetakis, 1965].

Na przestrzeni lat budowano i konfigurowano aparaturę badawczą do rozpoznawania granic wybuchowości gazów. W latach pięćdziesiątych XX wieku Egerton (1953) zauważył, że „wziąwszy pod uwagę względy praktyczne, ważnym jest też, aby granice wybuchowości były ustalane w warunkach, które reprezentują dobre przybliżenie granic odpowiadających dużym objętością mieszaniny gazowej”. Zjawiska wybuchu gazu zależą silnie od warunków i struktury układu, w którym następuje wybuch [Harris i in., 1977, Harris, 1983]. Aby zaistniał wybuch gazu muszą być spełnione trzy warunki: odpowiednia ilość tlenu (jako utleniacza), paliwo (gaz) oraz źródło zapłonu. Stosunek gazu palnego do utleniacza w obłoku musi się mieścić w zakresie wybuchowym i musi zaistnieć źródło zapłonu, które spowoduje

wybuch. Stosunek tlenu do metanu w mieszaninie powietrzno-metanowej obrazuje tak zwany trójkąt wybuchowości na przykładzie metanu (rys. 4.1).

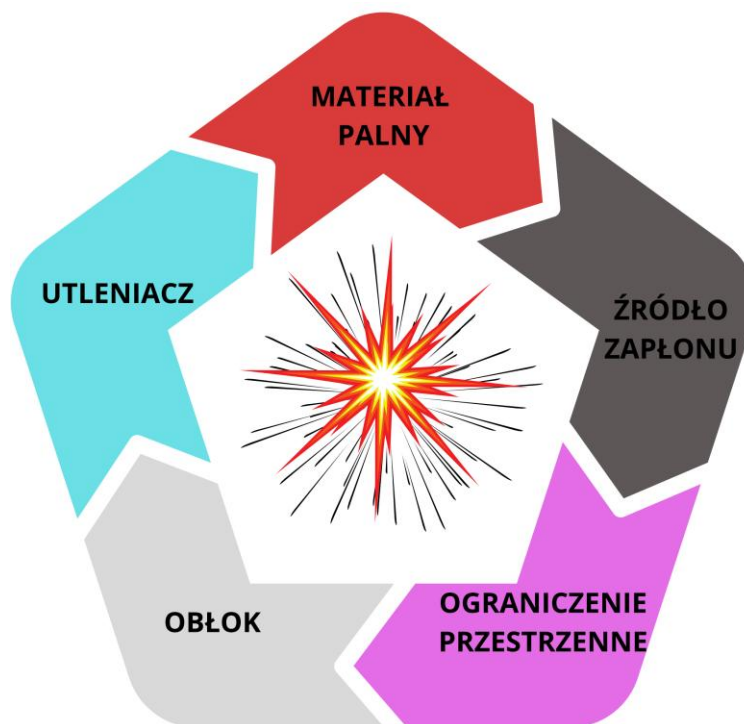


Rys. 4.1. Trójkąt wybuchowości Cowarda mieszaniny powietrzno-metanowej (oprac. własne na podstawie: Kabiesz i in. 2014)

Konsekwencje wybuchu gazu zależą od środowiska, w którym znajduje się chmura gazu [Maremonti i in., 1999]. Wybuch mieszaniny wybuchowej gazu w przestrzeni zamkniętej lub półzamkniętej będzie miał zupełnie inne konsekwencje niż zapłon takiego obłoku w otwartej przestrzeni [Maremonti i in., 1999]. Powszechnie stosowane współcześnie środki do zapobiegania lub łagodzenia skutków wybuchu, to: kontrola wypływu gazów palnych, zabezpieczenia czujnikami gazometrycznymi, eliminacja źródeł zapłonu i instalacja systemów izolacyjnych. Problematyka zagrożeń gazowych w polskich kopalniach węgla kamiennego została poruszona w setkach publikacji zarówno w kraju jak i za granicą. Zakład Zwalczania Zagrożeń Gazowych GIG-PIB opracował szereg zasad, kryteriów i rygorów projektowych oraz prowadzenia robót górniczych w warunkach metanowych. W publikacjach Krause i Cybulski (2000, 2002, 2007), Krause i Łukowicz (2004) oraz Krause (2009, 2019) przedstawiono szeroki zakres zagadnień związanych z projektowaniem i prowadzeniem robót górniczych w kopalniach metanowych.

4.2. Pyły

Problem wybuchowości dotyczy nie tylko gazów, ale również pyłów przemysłowych [Price i Brown 1922, Lebecki 1967, Cybulski, 1973]. Mechanizm wybuchu pyłu jest bardziej złożony w porównaniu z wybuchami gazów. Wybuch pyłu jest możliwy tylko wtedy, kiedy wystąpią określone warunki umożliwiające zapoczątkowanie takiego zjawiska. Warunki te, przedstawia się najczęściej w postaci pięciokąta wybuchowości (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Pięciokąt wybuchowości (oprac. własne)

Na każdym wierzchołku pięciokąta znajduje się czynnik niezbędny do zapoczątkowania wybuchu pyłu, a połączenie wierzchołków symbolizuje warunek, czyli jednoczesność wystąpienia wszystkich czynników na raz. Do wybuchu dochodzi, gdy wystarczająco energetyczne źródło zapłonu pojawi się w obłoku pyłu o stężeniu wybuchowym. W mieszaninach pyłowo-powietrznych ruch cząstek pyłu podlega dominującemu wpływowi sił bezwładności – cząstki charakteryzują się większą gęstością niż otaczające je powietrze. Z tego powodu cząstki pyłu, na skutek oddziaływania grawitacyjnego, mogą utrzymywać się w obłoku tylko przez krótki czas. Po tym czasie pył osiada na powierzchniach poziomych i takich, na których może się utrzymywać tworząc tzw. warstwy i nagromadzenia pyłu osiadłego.

Po dziesięcioleciach od pierwszych wybuchów pyłu węglowego, stwierdzono, na podstawie badań, że może on wybuchać bez udziału metanu [Cybulski, 1973]. Pozwoliło to na wskazanie gałęzi przemysłu, które mogą być narażone na to zagrożenie.

Nad metodami badań pracowano w wielu krajach, także w Polsce. Podstawy metodologii badań zapalności i wybuchowości pyłów w dużym zakresie opracował Wolfgang Bartknecht wraz ze współpracownikami [Bartknecht, 1981]. Jego metody badań zostały najpierw wdrożone w normach krajowych, następnie w normach europejskich EN.

Zakład Zwalczania Zagrożeń Pyłowych KD „Barbara” Głównego Instytutu Górnictwa rozwinął problematykę wybuchowości i zapalności (początkowo pyłów węglowych) pod koniec lat 60. Utworzone wówczas Laboratorium Wybuchowości Pyłów Przemysłowych w KD „Barbara” GIG pod kierownictwem dr Jana Śliża i profesora Kazimierza Lebeckiego opracowywało metody badawcze dla pyłów. Długoletnie badania w tym zakresie [Lebecki i Śliż 1972, Lebecki, Dyduch, Fibich, Śliż 2003, Dyduch i Majcher 2006, Dyduch, Toman, Adamus 2016] przyczyniły się do rozwoju laboratorium, które obecnie oferuje pełen zakres oznaczania parametrów zapalności i wybuchowości pyłów jak:

- maksymalne ciśnienie wybuchu p_{max} ,
- maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{max}$ i stała $K_{St max}$,
- dolna granica wybuchowości DGW ,
- minimalna temperatura zapłonu obłoku pyłu T_{CL} ,
- minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu T_{5mm} ,
- minimalna energia zapłonu obłoku pyłu MIE ,
- graniczne dla wybuchu stężenie tlenu G_{ST} ,
- skłonność nagromadzeń pyłu do samozapalenia T_{SI} ,
- rezystywność pyłu w warstwach ρ .

Definicje wszystkich wymienionych parametrów oraz ich procedury badawcze opisano w normach europejskich.

Możliwość oznaczania parametrów dla pyłów przemysłowych czy dla gazów, pozwala na oszacowanie poziomu zagrożenia, odpowiedni dobór urządzeń, czyli na przeciwdziałanie ewentualnemu zainicjowaniu wybuchu, ponadto w razie potrzeby zabezpieczenie instalacji przed skutkami wybuchu. Wszystkie te działania mają na celu stworzenie bezpiecznych warunków na stanowiskach pracy oraz uniknięcia dużych strat materialnych w następstwie zaistnienia wybuchu.

4.3. Ciecze/pary cieczy

Przemysł wydobywczy ropy naftowej i przemysł przetwórczy, oprócz zagrożenia gazowego i pyłowego, generują inne zagrożenia, których źródłami są ciecze palne i ich pary. Powstawanie nowych cieczy w przemyśle niosło za sobą różnorodne zagrożenia.

Zainteresowanie związkami organicznymi pochodzącymi z ropy naftowej, fermentacji czy procesów chemicznych itp. stale rośnie. Współczesny świat jest uzależniony od węglowodorów pochodzenia ropopochodnego, syntezy chemicznej czy chemicznego wykorzystywania surowców odnawialnych. Procesy produkcji cieczy mogą być złożone, zależą od dostępnych surowców i zapotrzebowania na produkt końcowy. Badania nad palnością cieczy trwają już od lat 30. XX wieku [Kinbara, 1932]. Tak jak dla gazów czy pyłów, tak i dla cieczy palnych, jasno zdefiniowano wytyczne w krajowych czy międzynarodowych regulacjach prawnych i normatywnych oraz opracowano zakres ich badań. Zgodnie z obowiązującymi przepisami ciecze palne klasyfikuje się na podstawie temperatury zapłonu i temperatury wrzenia lub początkowej temperatury wrzenia. Do eksperymentalnego wyznaczenia temperatury zapłonu potrzebna jest również informacja o lepkości cieczy, w celu wybrania odpowiedniej metody badania [Lesiak i in., 2016]. Nie wszystkie metody badania temperatury zapłonu są odpowiednie do analizy próbek o wysokiej lepkości i cieczy półstałych. Z tego powodu ważne jest, aby używać metody badania, której zakres stosowania i procedura są odpowiednie dla rozpatrywanej próbki. Istnieje wiele metod oznaczania temperatury zapłonu, które różnią się między innymi stosowanym do badań aparatem oraz procedurą. Mocno upraszczając, rozróżnia się dwie metody: z zamkniętym lub otwartym tygłem.

Metoda z zamkniętym układem (tygłem) polega na umieszczeniu próbki cieczy w szczelnie zamkniętym naczyniu (tygielku), które jest następnie stopniowo podgrzewane. W trakcie podgrzewania próbka jest okresowo otwierana dla sprawdzenia, czy pary cieczy ulegną zapłonowi w kontakcie z płomieniem.

W metodzie z otwartym tygłem próbka cieczy jest umieszczana, jak sama nazwa wskazuje, w otwartym tygielku i podgrzewana w kontrolowanych warunkach. Zapłon pary cieczy jest sprawdzany przez zbliżenie płomienia do powierzchni cieczy. Temperatura zapłonu jest mierzona w obecności tlenu z otoczenia. W tabeli 4.1 przedstawiono najważniejsze metody oznaczania temperatury zapłonu i odpowiadające im normy:

Tabela 4.1. Wybrane metody oznaczania temperatury zapłonu cieczy

Metoda badania	Normy	
	Tygiel otwarty	Tygiel zamknięty
Pensky’ego-Martensa	ASTM D93	PN-EN ISO 2719 ASTM D93
Tagliabue		ASTM D56
Abel		PN-EN ISO 13736 DIN 51755
Seta		ASTM D3278
Cleveland	PN-EN ISO 2592 ASTM D92	
Równowagowa		ASTM D3941-20 EN ISO 1523:2002
Szybkiej równowagi		ISO 3679-2022
Rampowa		ASTM D7236-16a:2021
Tag	ASTM D1310	

Źródło: Europejski Komitet Normalizacyjny – EN, Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna – ISO, Amerykańskie Stowarzyszenie Badań i Materiałów – ASTM, Niemiecki Instytut Normalizacji – DIN.

Dzięki metodom przedstawionym w tabeli 4.1, możliwe jest określanie właściwości palnych cieczy, co jest kluczowe dla zapewniania bezpieczeństwa w różnych instalacjach przemysłowych oraz podczas transportu i magazynowania materiałów niebezpiecznych. Temperatura zapłonu cieczy jest kluczowym parametrem wykorzystywanym do opracowania oceny ryzyka.

Podział cieczy palnych w polskim prawodawstwie jest oparty na przepisach Unii Europejskiej. Według tych wytycznych oparty jest głównie na ich temperaturze zapłonu, czyli najniższej temperaturze, w której ciecz wydziela pary w ilości wystarczającej do zapalenia się w obecności występującego źródła zapłonu. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej

budynków, innych obiektów budowlanych i terenów, ciecze palne dzielą się na trzy klasy (tab. 4.2):

Tabela 4.2. Klasyfikacja cieczy palnych

Klasyfikacja cieczy palnych			
Klasa	I	II	III
Temperatura zapłonu	poniżej 21°C	od 21°C do 55°C	od 55°C do 100°C
przykłady	benzyna, aceton	nafta, alkohol etylowy (spirytus)	olej napędowy, olej opałowy

Źródło: oprac. własne oparte na przepisach UE.

Ciecze palne o temperaturze zapłonu poniżej 55°C są określone jako materiały niebezpieczne pożarowo. Temperatura zapłonu charakteryzuje zdolność cieczy do tworzenia mieszanin palnych zarówno w zależności od stanu cieplnego cieczy, jak i otoczenia. Jeśli wyznaczona temperatura zapłonu cieczy osiąga wartość poniżej zera w normalnych warunkach badania, należy liczyć się ze stałym utrzymywaniem się stężenia par cieczy powyżej dolnej granicy wybuchowości. Odmienna sytuacja występuje, gdy mamy do czynienia z cieczą o temperaturze zapłonu znacznie wyższej od temperatury otoczenia.

W zależności od klasy cieczy palnej, przepisy dotyczące magazynowania, mogą różnić się pod względem wymagań dla pojemników, wentylacji, ochrony przeciwpożarowej i odległości między magazynowanymi substancjami. Dla cieczy klasy pierwszej przepisy są bardziej restrykcyjne. Stosowanie tych klas w praktyce jest nie tylko wymogiem prawnym w krajach Unii Europejskiej, ale również nieodzownym elementem zarządzania ryzykiem i w przeciwdziałaniu poważnym awariom przemysłowym. Inny podział można natomiast znaleźć w normach amerykańskich. Podział cieczy palnych i łatwopalnych według tych norm, w szczególności norm *National Fire Protection Association* (NFPA), konkretnie dokumentu NFPA 30: *Flammable and Combustible Liquids Code*, jest nieco inny. Klasyfikacja ta jest stosowana w Stanach Zjednoczonych i innych krajach, które przyjęły te standardy. Klasyfikacja NFPA 30 (2015) dzieli ciecze na łatwopalne i palne, w zależności od ich temperatury zapłonu oraz wrzenia (tab. 4.3).

Tabela 4.3. Klasyfikacja cieczy palnych i łatwopalnych

Klasyfikacja NFPA				
Ciecze łatwopalne	Klasa	IA	IB	IC
	Temperatura zapłonu	< 22,7°C	< 22,7°C	od 22,7°C
	Temperatura wrzenia	< 37,7°C	> 37,7°C	do 37,7°C
Ciecze palne	Klasa	IIA	IIB	IIC
	Temperatura zapłonu	od 37,7°C	od 60°C	od 93°C
	Temperatura wrzenia	do 60°C	do 93°C	∞

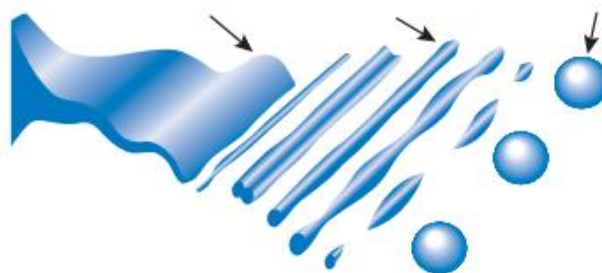
Źródło: oprac. własne na podstawie Narodowego Stowarzyszenia Ochrony Przeciwpożarowej – NFPA

W normach NFPA ciecz jest klasyfikowana bardziej szczegółowo, z podziałem na ciecze łatwopalne i ciecze palne. W przepisach UE oraz polskich rozporządzeniach ciecze są klasyfikowane jako palne w trzech klasach i obejmują szersze zakresy temperatur. Według *European Chemicals Agency* (2017) ciecz łatwopalna oznacza ciecz o temperaturze zapłonu nie wyższej niż 60°C. Temperatura zapłonu to najniższa temperatura cieczy, skorygowana do ciśnienia atmosferycznego 101,3 kPa, przy której przyłożenie płomienia próbnego powoduje chwilowy zapłon oparów cieczy i rozprzestrzenianie się płomienia po powierzchni cieczy. Oznacza to przekroczenie dolnej granicy wybuchowości w temperaturze zapłonu [Bowen P. J., Shirvill L. C. 1994].

4.4. Aerozole cieczy palnych

Aerozole cieczy pod względem właściwości, jak wspomniano w rozdziale 1, zajmują miejsce między gazami i parami cieczy z jednej strony i pyłami z drugiej. W ASTM E1620 (2016) „aerozol jest definiowany jako dynamiczny zbiór kropeł rozproszonych w gazie”. Zwykle aerozol powstaje przez atomizację cieczy. Odziaływująca siła mechaniczna rozpyla ciecz przez dyszę. Ciecz, przepływając przez dyszę zmienia się w drobne krople. Geometria dyszy oraz energia potencjalna cieczy powodują, że ciecz najpierw pojawia się jako małe wiązadła, a następnie rozpadają się na mniejsze jednostki, które są zwykle nazywane

kroplami lub cząsteczkami cieczy [Addai, 2016]. Rysunek 4.3 obrazuje mechanizm tworzenia się kropel.



Rys. 4.3. Proces atomizacji [Schicka, 2008]

Terminy „aerozol” i „mgła” w rozprawie doktorskiej będą używane arbitralnie, tak jak zaproponował Eckhoff, (2016), ponieważ oba są istotnymi terminami w problematyce wybuchów. Aerozole są zwykle wytwarzane przez wtrysk, mechanicznie z dyszy rozpylającej lub przypadkowego wycieku, mgły natomiast to chmury kropelek cieczy o mniejszych rozmiarach, często wytwarzane przez kondensację przesyconej cieczy.

Zgodnie z Kodeksem Bezpiecznej Praktyki Instytutu Nafty w latach 70. ubiegłego wieku istniały obawy, że ciecze przemysłowe, eksploatowane w temperaturach poniżej ich temperatury zapłonu, mogą zostać sklasyfikowane jako bezpieczne. W warunkach, gdy temperatura procesowa cieczy jest niższa niż ich temperatura zapłonu, przypadkowe lub celowe powstanie aerozolu takich cieczy może doprowadzić do jego dotarcia do ewentualnego źródła zapłonu. Zapalenie cieczy rozproszonej w postaci aerozolu jest znacznie łatwiejsze od zapalenia cieczy w stanie zwartym, ze względu na większą powierzchnię i możliwe szybsze parowanie [Burgoyne i Cohen, 1954, Polymeropoulos, 1984, Thimothée, 2017]. Znacznie łatwiej zawieszonemu w powietrzu aerozolowi cieczy jest dotrzeć do potencjalnego źródła zapłonu. To, że do zapalenia cieczy palnej w postaci aerozolu dochodzi w temperaturze poniżej temperatury zapłonu cieczy przedstawiono w pracy Bowena i Shirvilla (1994). Zagrożenie wybuchem aerozoli początkowo nie było przedmiotem badań, ale już w latach 40. ubiegłego wieku zaczęto zajmować się tym problemem [Sullivan i in., 1947, Burgoyne i Richardson, 1949].

Aerozol i obłok rozproszonego pyłu mają wiele cech wspólnych, między innymi oba są zawieszone w powietrzu [Zehr, 1965]. Różnica jednak polega na tym, że cząsteczki aerozolu są mniej stabilne, a zawieszone kropelki cieczy, zderzając się z innymi kropelkami, mogą łączyć się ze sobą. W takiej sytuacji prędkość sedymentacji gwałtownie rośnie, a taka większa cząsteczka szybko opada z utworzonego obłoku aerozolu [Williams, 1990]. Według pracy Eckhoffa (2003) aerozole cieczy palnych rozproszonych w powietrzu o wielkości kropel

< 100 μm i koncentracji w zakresie 100–500 g/m^3 są wybuchowe niezależnie od temperatury wrzenia danej cieczy. Dla cieczy o niskiej temperaturze wrzenia kropelki mogą częściowo odparować i może powstać mieszanina aerozolu/pary z powietrzem. Jeżeli temperatura jest wysoka, kropelki cieczy, zachowywać się będą tak jak cząsteczki stałe materiału organicznego. W tym przypadku należy jednak spodziewać się łączenia kropel i szybszego ich opadania co potwierdził badaniami cytowany wcześniej Williams (1990). Z pracy Förstera (2000) dowiadujemy się, że na wielkość propagacji płomienia aerozoli duży wpływ ma wielkość kropel. Zgodnie z wynikami pracy Burgoyne i Cohen (1954), dla cieczy o rozdrobnieniu poniżej 10 μm , zauważono całkowite odparowanie kropelek przed spalaniem. Aerosol o takim rozdrobnieniu zachowuje się bardziej jak zmieszany gaz albo pary cieczy. W przypadku kropel o rozmiarze powyżej 40 μm wspomniani autorzy zauważyli, że palą się indywidualnie, zapalając kolejne otaczające krople.

W raporcie badawczym RR980 [Gant S. i in. 2013] na temat zapalności i wybuchowości aerozoli, potwierdzono, że badania nad aerozolami cieczy charakteryzują się większą złożonością w porównaniu z badaniami gazów, pyłów czy par cieczy. Oprócz rozkładu wielkości kropel, poziomu turbulencji i stężenia w przypadku pyłów, uwalnianie mgły nie jest zwykle jednorodne i stabilne, głównie z powodu ewentualnego parowania, rozpadu kropel, koalescencji lub sedymentacji.

Udoskonalanie technologii i procesów rozpraszania cieczy zwiększyło zapotrzebowanie na ciecz w postaci różnych aerozoli i nie jest to jedyny sposób powstawania aerozoli. Powstawanie aerozoli w procesach przemysłowych może zdarzyć się w miejscach, gdzie ciecz palna często występuje pod wysokim ciśnieniem lub są podgrzewane [Lin, 2017]. Przypadkowe rozszczelnienie lub awaria wysokociśnieniowej instalacji, może spowodować uwalnianie cieczy, z której może utworzyć się aerosol. W zależności od temperatury przechowywania i właściwości samej cieczy, rozszczelnienie instalacji i powstanie aerozolu, można różnie klasyfikować, co przedstawiono w publikacji [Cleary i in., 2007].

Aktualnie, pomimo rosnącego zagrożenia ze strony aerozoli cieczy palnych, wciąż jest brak opracowanych dedykowanych wytycznych dla tego rodzaju zagrożenia. Aerozole cieczy palnych są badane przez jednostki naukowo-badawcze od dziesięcioleci, a jednak ich właściwości palne i mechanizmy powstawania pozostają nie do końca wyjaśnione. Istnieją normy i aparatura do badania par cieczy palnych, jednak nie wskazano jednoznacznej metody prowadzenia badań zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych. W normach i przepisach dotyczących zagrożenia wybuchowego od aerozoli uwzględniono głównie

technologie transportu dozowników, takich jak: farby, lakiery oraz inne ciecze, które podczas użycia tworzą aerozol. Sklasyfikowane są według: zawartości łatwopalnych składników, ciepła spalania i wyniku testu zapłonu od otwartego ognia. Brak jest jakichkolwiek wytycznych dla postępowania z aerozolami, które powstają nie tylko z dozowników, ale z różnego typu dysz, wtrysków lub mogą powstawać w wyniku przypadkowego wycieku cieczy/par z rur lub obiektów procesowych jak zbiorniki wysokiego ciśnienia często w podwyższonej temperaturze. Wyżej wymieniony obszar badań jest słabo rozpoznany i brak jest aktów normatywnych dla badania wybuchowości aerozoli.

5. Przegląd literatury tematu rozprawy doktorskiej

Zagrożenie aerozolami cieczy palnych w przemyśle przez wiele lat było bagatelizowane. Aerozole cieczy palnych zaczęły być przedmiotem zainteresowań w przemyśle motoryzacyjnym w odniesieniu do procesów spalania, w mniejszym stopniu jako zagrożenie występujące w przemysłowych procesach technologicznych. W pewnych okolicznościach ciecze mogą stwarzać większe niż oczekiwano zagrożenie zapalnością, w szczególności dotyczy to awarii lub trakcie procesu produkcyjnego, kiedy uwalniana ciecz tworzy aerozol lub mgłę. Po utworzeniu aerozolu jego właściwości zapalne i wybuchowe znacznie różnią się od właściwości cieczy lub par. Aerozole stanowią zagrożenie w technologiach przemysłowych, a mechanizm ich powstawania nie jest do końca rozpoznany. Badania dla oznaczenia parametrów, dotyczących zapalności i wybuchowości aerozoli są znacznie mniej rozpowszechnione niż badania par cieczy, gazów lub pyłów.

Autorzy pracy Gant i in. (2013) przeprowadzili obszerny przegląd literatury na temat parametrów zapalności i wybuchowości rozpuszczalników w postaci aerozoli. Przedstawili dolną granicę wybuchowości, minimalną energię zapłonu i minimalną temperaturę zapłonu dla rozpuszczalników. Zwrócili uwagę na fakt, że wyniki badań dla aerozoli o rozdrobnieniu poniżej 10 μm , w przypadku dolnej granicy wybuchowości, są podobne do wyników badań mieszaniny pary z powietrzem [Zabetakis 1965, Burgoyne i Cohen 1954, Faeth i Olson 1968]. Aerozole o większych rozmiarach kropli wymagają dłuższego czasu dla całkowitego odparowania kropli, zanim zostaną pochłonięte przez zbliżające się czoło płomienia. Każda kropla pali się własnym płomieniem dyfuzyjnym, a nie tak jak jednorodna mieszanina gazów. W przypadku kropelek o medianie średnicy większej niż 40 μm , transfer ciepła z jednej płonącej kropli do sąsiednich, staje się głównym mechanizmem rozprzestrzeniania się płomienia [Burgoyne i Cohen, 1954].

Wyżej wymienieni prekursorzy badań nad zapalnością/wybuchowością aerozoli [Burgoyne i Cohen, 1953, 1954] skupili się głównie na badaniach wpływu rozmiaru kropli na zapalność aerozolu.

5.1. Niebezpieczne zdarzenia z aerozolami

Odkąd zainteresowano się zjawiskiem pożaru i wybuchem rozproszonych cieczy palnych w powietrzu (aerozoli), upłynęło ponad siedemdziesiąt lat. Badania nad aerozolami są przedmiotem wielu prac i można wyciągnąć wniosek, że zapłon aerozolu utworzonego z cieczy palnych jest dobrze rozpoznany zjawiskiem. Z takim wnioskiem można się zgodzić w przypadku cieczy łatwopalnych, jednak w przypadku cieczy o wysokiej temperaturze zapłonu już niekoniecznie. Z reguły ciecze o wysokiej temperaturze zapłonu są uznawane jako bezpieczne i nie poświęca się im tyle uwagi co cieczom łatwopalnym. Temperatura zapłonu cieczy jest jak do tej pory jednym z najważniejszych parametrów określających poziom zagrożenia pożarowego. Prace Santona (2009), Bowena i Shirvilla (1994) wskazują, że do zapalenia cieczy dochodzi w temperaturze poniżej jej temperatury zapłonu przy spełnieniu dwóch warunków. Pierwszy warunek to wsiąknięcie cieczy w porowaty materiał, a drugi warunek, to rozpylenie w powietrzu cieczy palnej, która staje się aerozolem.

Informacje o zdarzeniach z udziałem aerozoli nie są popularne i znane. Ten sam problem początkowo dotyczył również gazów i pyłów. Zagrożenie ze strony aerozoli cieczy palnych jest powszechnie znane na całym świecie, jednak wskaźnik wypadkowości jest zbyt niski, aby wspólnie przeciwdziałać temu zagrożeniu. Publikowane raporty na temat przypadkowych wybuchów od aerozoli są bardzo skąpe. Dokumentowanie takich zdarzeń z biegiem czasu staje się jednak coraz precyzyjniejsze. Wśród opisanych zdarzeń znajdują się:

- Pierwszy incydent związany z aerozolem nafty w 1886 r. w Wielkiej Brytanii [Hazardous Cargo Bulletin, 1981]. Aerozol wytworzony przez nieszczelną spoinę spawalniczą w przedziale ładunkowym SS Petriana został zapalony przez otwarty ogień, co doprowadziło do śmierci dziesięciu osób.
- Wybuchy aerozoli w latach 1946–1952 w Stanach Zjednoczonych (fumigacja budynków i terenów za pomocą generatorów aerozoli, opartych na insektycydach z nośnikami węglowodorowymi). Mimo zaleceń dotyczących stosowania nośników o wysokiej temperaturze zapłonu, odnotowywano wybuchy aerozoli, które spowodowały obrażenia wielu osób i całkowite zniszczenia budynków [Santon, 2009].
- Wybuch aerozolu oleju smarowego podczas testu sprężarki odśrodkowej w 1959 r. w Stanach Zjednoczonych. Sześć ofiar śmiertelnych i trzydziestu rannych [Santon, 2009].

- Zdarzenie podczas napełniania cysterny olejem napędowym w 1975 r. Olej podawany grawitacyjnie metodą rozbryzgową wytworzył naelektryzowany aerozol, co doprowadziło do wyładowania iskrowego między rurą wlewową a olejem, powodując zapłon, mimo zastosowania uziemienia cysterny [Kletz, 1975/76].
- Rozszczelnienie rurociągu na gwincie podczas transportu oleju smarowego do pompy w 1980 r w Belgii. Olej został rozpylony i dotarł do rury parowej o temperaturze 400°C, co spowodowało jego zapłon [Mullier i Rustin, 1984].
- Niewielki wyciek oleju z wysokociśnieniowej instalacji hydraulicznej w rejonie stanowiska spawalniczego w 2003 r. w Stanach Zjednoczonych. W wyniku zapalenia rozpylonego aerozolu oleju od gorących powierzchni jedna osoba poniosła śmierć.
- Wyciek oleju napędowego w 2012 r. w rafinerii Chevron (Richmond, Kalifornia) wytworzył ogromną chmurę aerozolu po czym się zapalił. Sześciu pracowników rafinerii zostało rannych.

Przegląd zdarzeń i wypadków, do których doszło w przedsiębiorstwach chemicznych, gdzie przetwarzane są łatwopalne ciecze, zarówno w pomieszczeniach, jak i podczas transportu z/do zakładów przemysłowych, pokazuje, że większość wypadków zaczynała się od niewielkiego wycieku palnej cieczy [Tauseef i in., 2017].

Instalacje i technologie procesowe ulegają awariom, co może między innymi prowadzić do powstania nieszczelności, a następnie wycieku substancji palnej. W zależności od warunków, z wycieku może wydostać się duża ilość substancji w różnej postaci, np. strumienia, aerozolu, pary lub ich dowolnej kombinacji. W przypadku braku przeciwdziałania takim wyciekom, ewentualnych groźnych skutków wybuchu nie można nigdy wykluczyć.

5.2. Przegląd dotychczasowych osiągnięć

Badania nad zapalnością aerozoli cieczy o wyższej temperaturze wrzenia rozpoczęto w 1947 roku dzięki pracom Sullivana i in. (1947), jednak do dziś takich badań przeprowadzono niewiele. Jak zasygnalizowali w pracy Ballal i Lefebvre (1981), niedobór literatury na ten temat nie jest zaskakujący w świetle ogromnych trudności eksperymentalnych związanych ze stworzeniem jednolitej i powtarzalnej mgiełki wielokropelkowej o różnych stężeniach. Burgoyne i współpracownicy badali zapalność aerozoli olejowych i podjęli próbę oceny granic zapalności [Burgoyne i Richardson, 1949,

Burgoyne i Cohen, 1954, Burgoyne, 1963]. Badając granice zapalności, granice inertyzacji azotem oraz prędkość spalania, określili mechanizm rozprzestrzeniania się płomienia, który ulega całkowitej transformacji w zakresie wielkości kropli od 7 do 55 μm . Wykazali również, że poniżej 10 μm aerozol zachowuje się jak para, a powyżej 40 μm krople palą się oddzielnie w swojej własnej otoczce powietrznej. Jedna płonąca kropla zapala sąsiednie i rozprzestrzenia w ten sposób spalanie. W pośrednich rozmiarach kropli zauważono przejściowe zachowanie.

Hayashi i in. (1977) przeprowadzili eksperymenty spalania aerozolu wytwarzanego komorą mgłową, gdzie kondensacja pary umożliwia tworzenie się drobnych i monodispersyjnych kropelek. Uzyskane wyniki badań potwierdziły, że prędkość propagacji płomienia aerozolu może być większa niż pary.

Początkowo badania aerozoli cieczy koncentrowały się przede wszystkim na szybkości propagacji płomienia deflagacyjnego, ważnej w dziedzinie badań spalania wewnętrznego. W pracach Egertona (1953), Burgoyne'a i Cohena (1954) wykazano wzrost prędkości propagacji płomienia aerozolu wraz ze zmniejszaniem wielkości kropelek. Burgoyne i in. (1949–54) zbadali wpływ wielkości kropli na prędkość propagacji płomienia aerozolu tetraliny i doszli do wniosku, że prędkość propagacji płomienia aerozolu jest większa niż prędkość propagacji płomienia pary, gdy wielkość kropli wynosi 7–15 μm . Na podstawie badań aerozolu dodekanu, wytwarzanego metodą elektrorozpylania, Lin i in. (2017) stwierdzili, że prędkość propagacji płomienia wzrasta wraz ze zmniejszaniem się wielkości kropli. Polymeropoulos i in. (1984) doszli do wniosku, że prędkość propagacji płomienia w niejednorodnych mieszaninach zawierających aerozol cieczy i jej pary w powietrzu jest nieliniowa w zależności od wielkości kropelek. Najpierw wzrósł wraz ze zwiększaniem się kropelek, przejdzie przez maksimum, a następnie zmniejszy się wraz z dalszym wzrostem wielkości kropelek.

Brak pełnego zrozumienia mechanizmów i metod badawczych związanych z aerozolami cieczy palnych wynika z wciąż ograniczonej ilości danych eksperymentalnych, co sprawia, że problem ten pozostaje w dużej mierze nierozpoznany. Niewątpliwie istotne znaczenie w badaniach zapalności i wybuchowości aerozoli ma rozmiar kropli i metoda wytwarzania aerozolu. Pomiar wielkości cząstek w warunkach badawczych pozwala na określenie charakteru i zachowania się aerozolu cieczy, co może umożliwić lepszą analizę i porównanie uzyskiwanych wyników.

Jak stwierdzono w podsumowującej pracy Ganta i in. (2013) badanie gazów czy par cieczy jest o wiele prostsze niż aerozoli cieczy. Opracowanie metody badawczej dającej

kontrole nad wieloma zmiennymi, mając jednocześnie na uwadze różnorodne właściwości fizykochemiczne cieczy, nie jest łatwe. Badania nad nimi prowadzone są od wielu lat, jednak do tej pory nie opracowano standardowej metody, która umożliwiałaby uzyskanie wyników ilościowych.

5.2.1. Metody eksperymentalne

Badania zapalności/wybuchowości aerozoli olejowych, węglowodorów, eterów i innych cieczy zostały wykonane już w latach 40. ubiegłego wieku [Sullivan i in., 1947]. W tym celu stworzono „prymitywne” urządzenie składające się z cylindrycznej rury zamkniętej od spodu, której górny koniec zamykano luźno dopasowaną nasadką. W boku rury, blisko dna, wykonano otwór, przez który aerozol badanych cieczy był rozpylany za pomocą domowego rozpylacza insektycydów. Mieszanina aerozolu z powietrzem w pierwszych testach była inicjowana od góry magnezowym źródłem zapłonu. Szybkie spalanie i eksplozje zawsze powodowały zerwanie górnej luźnej nasadki. W kolejnych badaniach zastosowano wyładowanie iskrowe wysokiego napięcia.

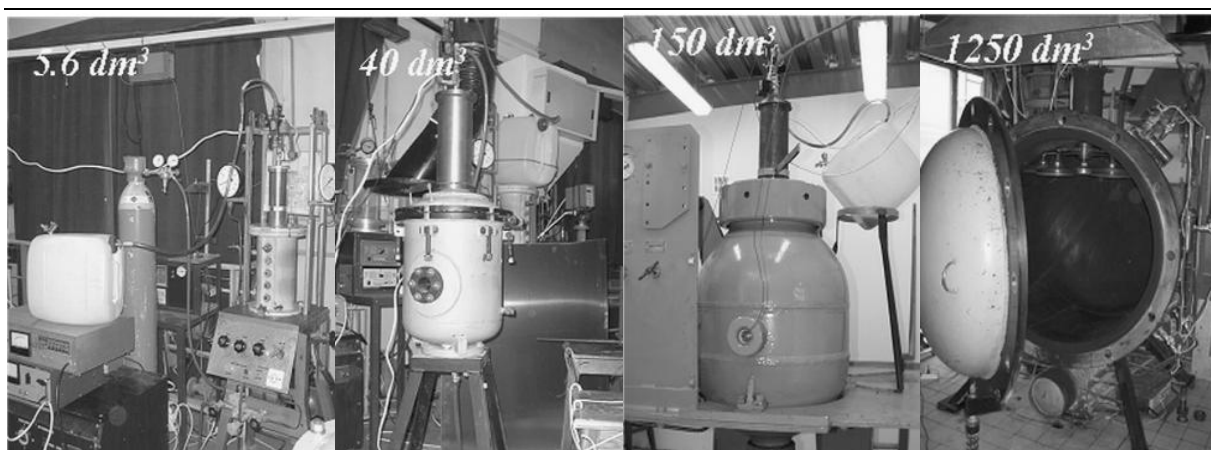
Dolna granica zapalności aerozoli cieczy palnych oraz prędkość propagacji płomienia zostały zbadane przez Burgoyne’a i Cohena (1954). Określono wpływ wielkości kropli na granicę zapalności i szybkość spalania. W celu uniknięcia zapłonu, w używanym generatorze aerozolu do kondensacji kropli zastosowano azot jako gaz nośny, a powietrze wzbogacone tlenem podawano dopiero przy stożku rozprężnym. Regulacja stężenia aerozolu odbywała się przez zmianę ilości dodawanego powietrza. Granice palności określono w rurze pionowej (150 cm długości, 5×4 cm średnicy wewnętrznej) na podstawie prób inicjacji płomienia, który rozprzestrzenił się w górę przez przepływający aerozol.

W 1981 roku Ballal i Lefebvre zaproponowali metodę pomiaru prędkości spalania w niejednorodnych mieszkach aerozoli i par cieczy. Aparatura badawcza, minimalizująca wpływ grawitacji, dzięki opadającej rurze, została podzielona na trzy moduły. Pierwszy moduł odpowiadał za dostarczanie mieszanki aerozol-powietrze przez zwężkę Venturiego, która regulowała przepływ powietrza i mierzyła stężenie aerozolu. W drugim module (sterującym), zaprojektowanym do stabilizacji płomienia, zastosowano siatkę drucianą i zawory sterowane elektromagnetycznie, umożliwiające regulację przepływu i uszczelnienie układu. Trzeci moduł – sekcja testowa, składał się z rury o przekroju kwadratowym, wyposażony w elektrody zapłonowe, fototranzystory i hartowaną szybę do obserwacji

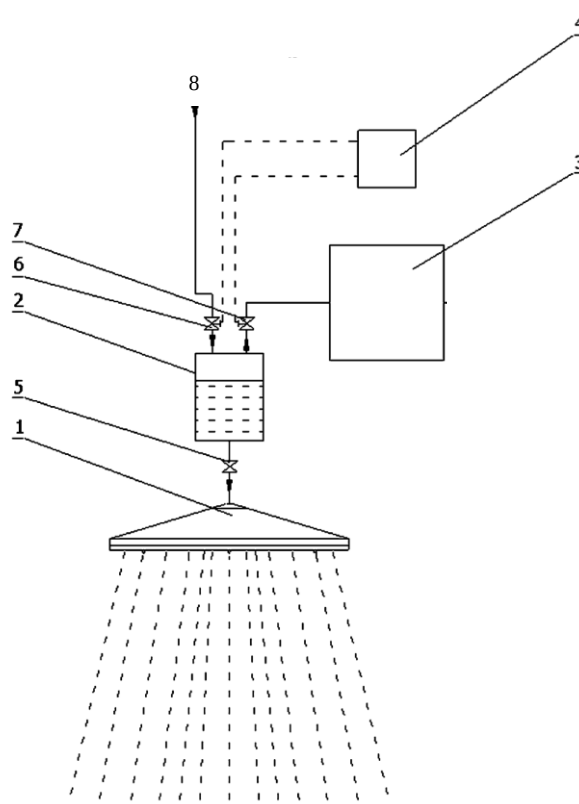
procesu spalania. Cały układ podnoszono na prętach z luźnym umocowaniem, umożliwiając swobodne opadanie na długości 10 m w czasie 1,4 s.

Cernansky i in. (1986) przeprowadzili badania zapłonu monodispersyjnych strumieni n-heptanu, wykorzystując generator aerozolu z wibrującym otworem, opracowanym przez Berglunda i Liu (1973). Jako źródło zapłonu zastosowano pojemnościowy układ generujący iskry. Warunki optymalizowano, dostosowując czas trwania iskry i odległość między elektrodami, dla osiągnięcia maksymalnej częstotliwości zapłonu. Następnie, częstotliwość zapłonu mierzono jako funkcję energii iskry dla współczynników równoważności 0,6, 0,8 i 1,0 oraz średnic kropli wynoszących 25–70 μm . Minimalna energia zapłonu została określona jako wartość energii iskry, zapewniająca 90% częstotliwości zapłonu. Wyniki wykazały wzrost zapalności cieczy przy wyższych współczynnikach równoważności oraz jej spadek wraz ze wzrostem wielkości kropli.

Gieras i in. (2008) przeprowadzili badania nad wpływem objętości komory na GGW mieszanin aerozolowych heksanu z powietrzem, z zastosowaniem komór o objętości od 5,6 dm³ do 1,25 m³. Do wytwarzania aerozolu o różnej średnicy kropli opracowano układ wtryskowy z regulacją ciśnienia rozpraszania i o średnicy dysz w zakresie 0,25–0,7 mm. Gęstość strumienia kontrolowano, kierując ku sobie strumienie wytwarzane przez sąsiednie wtryskiwacze. Głowice rozpraszające i liczbę wtryskiwaczy dopasowano do objętości komór, w celu prowadzenia badań w różnych konfiguracjach. Układ wtryskowy był sterowany zaworami elektromagnetycznymi, które kontrolowały przepływ powietrza i paliwa. Regulacja ciśnienia odbywała się za pomocą reduktora, a wtrysk paliwa przerywano zaworem upustowym. Do zainicjowania wybuchu użyto chemicznego źródła zapłonu o energii 2 kJ, umieszczonego 20 cm od głowicy rozpraszającej. Zmianę ciśnienia wewnątrz komory rejestrowano za pomocą przetworników piezoelektrycznych. Stanowiska badawcze przedstawiono na rysunku 5.1, a schemat zastosowanego układu wytwarzania aerozolu na rysunku 5.2.

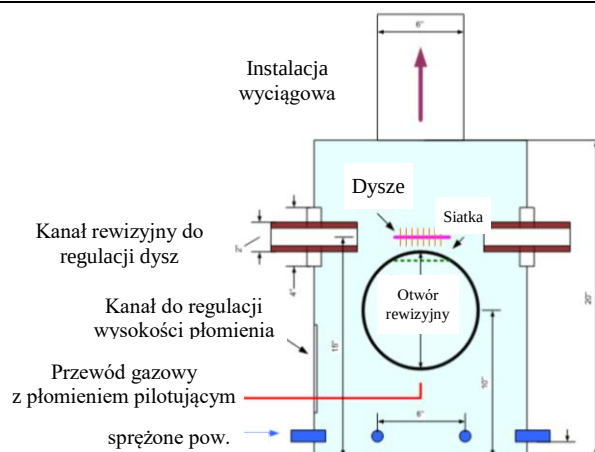


Rys. 5.1. Widok stanowisk badawczych z układami do rozpylania heksanu [Gieras i in., 2008]



Rys. 5.2. Schemat układu wytwarzania aerozolu heksanu: 1 – głowica rozpraszająca wyposażona w dysze wirowe, 2 – zbiornik paliwa, 3 – zbiornik sprężonego powietrza, 4 – zespół sterujący, 5 – zawór zwrotny, 6, 7 – zawory elektromagnetyczne, 8 – wlot sprężonego powietrza [Gieras i in., 2008]

Badania nad zapalnością aerozoli wytwarzanych metodą elektrorozpylania zostały wykonane przez Huanga (2013). Urządzenie do generowania aerozolu obudowano przezroczystym tworzywem z otworami pomiarowymi i wentylacją wyciągową. Jako źródła zapłonu użyto palnika gazowego lub iskry. Długość płomienia regulowano przepływem gazu, a proces spalania rejestrowano szybką kamerą. Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Schemat stanowiska badawczego [Huang, 2013]

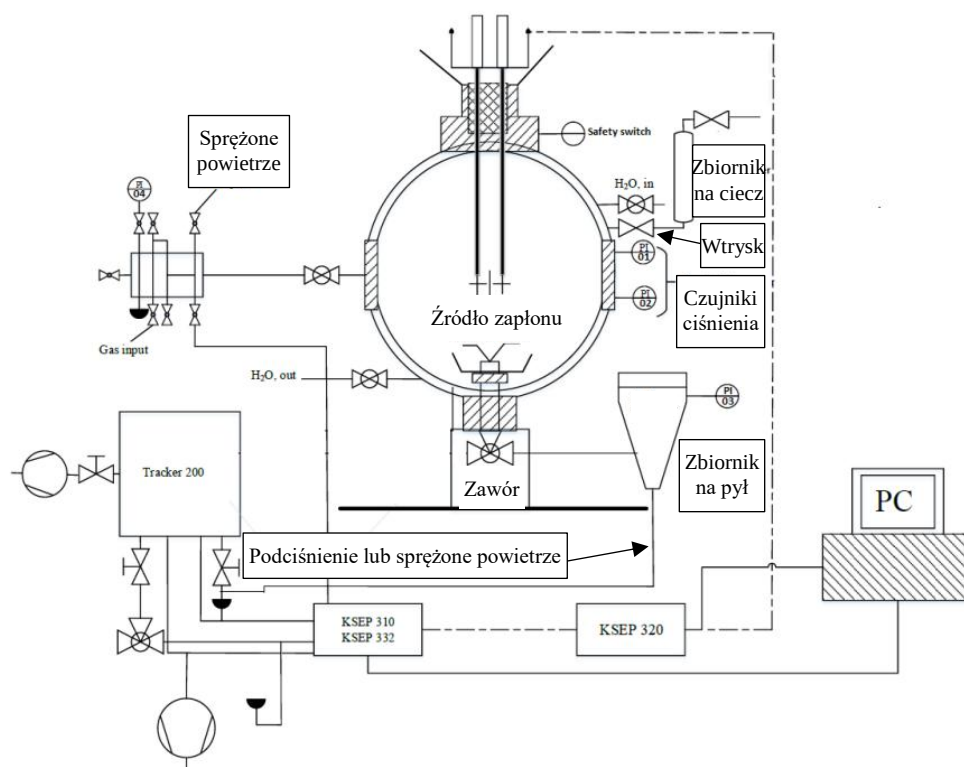
Bai i Wang (2015) przeprowadzili badania wybuchowości aerozolu na próbce eteru dietylowego. W badaniach użyto aparatury składającej się z 20-litrowego naczynia sferycznego z podwójnym dyszowym, pneumatycznym systemem atomizacji, elektrycznym systemem zapłonu oraz systemem rejestracji ciśnienia i temperatury. Jako inicjał zastosowano iskrę indukcyjną generowaną przez wolframowe elektrody o średnicy 5 mm i odstępzie 3 mm. Do pomiarów wielkości cząstek aerozolu i stężenia wykorzystano system optyczny. Ciśnienie dyspersji aerozolu, mieszczące się w zakresie 0,4–0,8 MPa, było regulowane, a powietrze do dyspersji magazynowano w oddzielnych zbiornikach dla każdej z dwóch dysz. Czas opóźnienia zapłonu zdefiniowano jako odstęp między początkiem generowania aerozolu, a inicjacją zapłonu. Eksperymentalną aparaturę przedstawiono na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Stanowisko badawcze [Bai i Wang, 2015]

Badania dotyczące aerozoli cieczy palnych przeprowadził Addai (2016), oznaczając parametry wybuchowości dla heptanu, heksanu, toluenu, acetonu, izopropanolu i etanolu. Eksperymenty wykonano w sferycznym naczyniu o pojemności 20 dm³, wykorzystując aparaturę opracowaną przez Siwka (1988), którą dodatkowo wyposażono we wtrysk i zbiornik na ciecz. W badaniach oznaczono maksymalne ciśnienie wybuchu (p_{max}),

maksymalną szybkość wzrostu ciśnienia $(dp/dt)_{\max}$, dolną granicę wybuchowości (DGW) oraz graniczne dla wybuchu stężenie tlenu (GST). Badania przeprowadzono na podstawie procedur zawartych w normach serii PN-EN-14034 1-4 dotyczących oznaczania parametrów wybuchowości pyłów. Schemat aparatury z komorą badawczą przedstawiono na rysunku 5.5.



Rys. 5.5. Schemat stanowiska badawczego ze sferą o pojemności 20 dm³ [Addai, 2016]

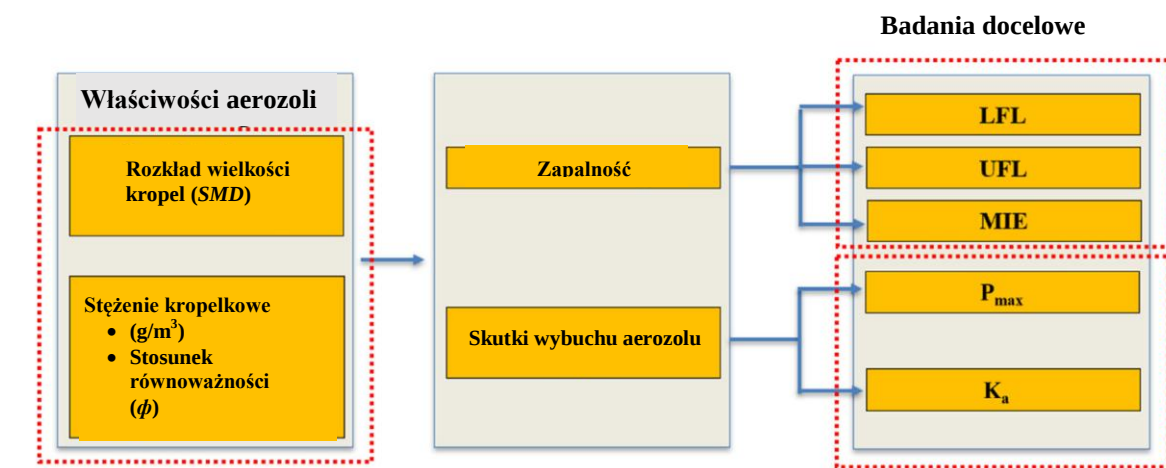
We wszystkich testach zastosowano czas opóźnienia zapłonu wynoszący 60 ms. W celu oznaczenia charakterystyki wybuchowości aerozolu, przed każdym testem, określoną ilość badanej cieczy wprowadzano pipetą do zbiornika cieczy. Następnie przestrzeń nad cieczą w zbiorniku wypełniano sprężonym powietrzem do ciśnienia 10 bar. Sfera 20-litrowa była odpompowywana do ciśnienia 0,4 bara. Po otwarciu zaworu łączącego zbiornik cieczy z wtryskiem, aerozol rozpylano do wnętrza komory badawczej. Wtrysk aerozolu odbywał się zawsze w odstępie czasu między otwarciem zaworu, a zainicjowaniem zapłonu. Czas wtrysku wynosił około 1 s i zależał od badanego stężenia.

Yuan i in. (2019) przeprowadzili eksperymentalne badania wybuchowości aerozoli n-oktanu i n-dekanu w 36-litrowym zbiorniku badawczym (rys. 5.6).



Rys. 5.6. Stanowisko badawcze [Yuan i in., 2019]

Główna część aparatury badawczej składała się z niemal kulistego naczynia wybuchowego o maksymalnym ciśnieniu roboczym wynoszącym 70 bar. Wytwarzanie aerozolu w komorze badawczej odbywało się podobnie jak w rozwiązaniu zastosowanym przez Addai (2016). Badana ciecz była wprowadzana do specjalnego zbiornika ciśnieniowego i, w przeciwieństwie do poprzedniej metody, sprężana azotem. Źródłem zapłonu była iskra indukcyjna o energii 100 mJ, wyzwalana na wolframowych elektrodach umieszczonych centralnie w komorze, 10 cm poniżej wtryskiwacza. Yuan i in. zaproponowali procedurę przeprowadzania testów zapalności aerozoli i oceny skutków wybuchu, według diagramu przedstawionego na rysunku 5.7.

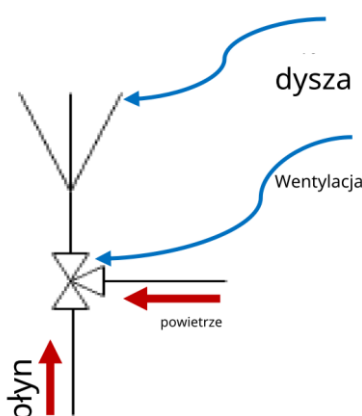


Rys. 5.7. Schemat oceny zapalności i skutków wybuchu przez [Yuan i in., 2019]

Pierwszy etap w metodzie polegał na dokonaniu charakterystyki rozproszonego aerozolu, przeprowadzając analizę rozkładu wielkości kropli i stężenia. W drugim etapie inicjowano aerosol w zamkniętej przestrzeni przy ustalonym źródle zapłonu, oceniając charakterystykę wybuchowości dla różnych stężeń. Badania docelowe obejmowały oznaczenie maksymalnego

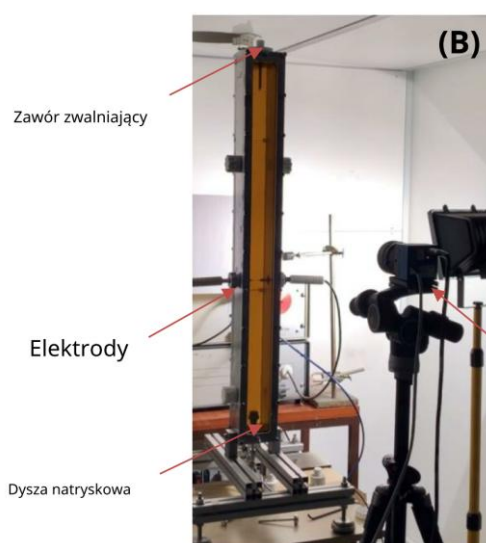
ciśnienia wybuchu (p_{max}), wskaźnika wybuchowości (K_a) oraz oznaczenie parametrów zapalności takich jak: dolna i górna granica palności (LFL , UFL) oraz minimalna energia zapłonu (MIE).

El-Zahlanieh i in. (2020, 2022a,b) przeprowadzili badania w zmodyfikowanej rurze Hartmana oraz 20-litrowej sferze, badając zapalność i wybuchowość mgieł węglowodorowych. W badaniach zastosowano syfonowo-grawitacyjny układ dyspersji z systemem Venturiego, różnymi dyszami oraz nasadkami powietrznymi, regulując ciśnienie w zakresie 1–6 bara (rys. 5.8).



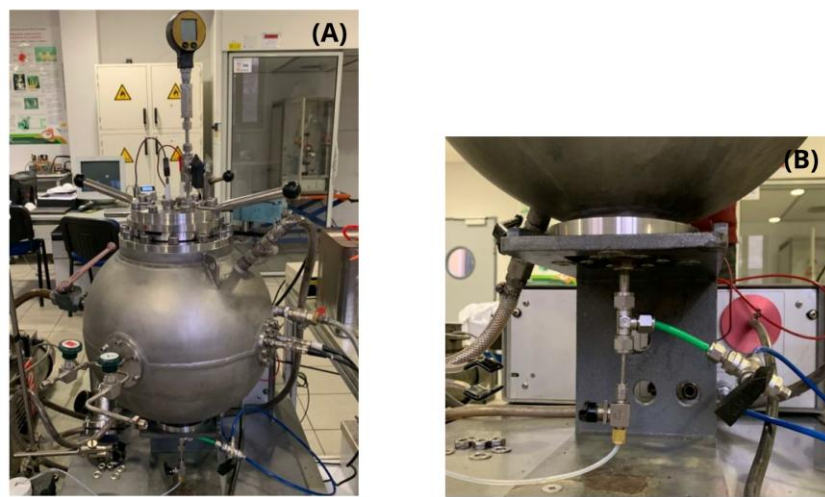
Rys. 5.8. Syfonowo-grawitacyjny układ do generowania mgły [El – Zahlanieh i in., 2020, 2022a,b]

W rurze Hartmana analizowano rozprzestrzenianie się płomienia w przestrzeni o wymiarach 1 m wysokości i o średnicy $0,07\text{ m}^2$, przy czasie wytwarzania aerozolu wynoszącym około 9 s. Iskrę o energii 20 J inicjowano przy opóźnieniach zapłonu od 100 do 1000 ms, a prędkość spalania rejestrowano za pomocą szybkiej kamery (rys. 5.9).



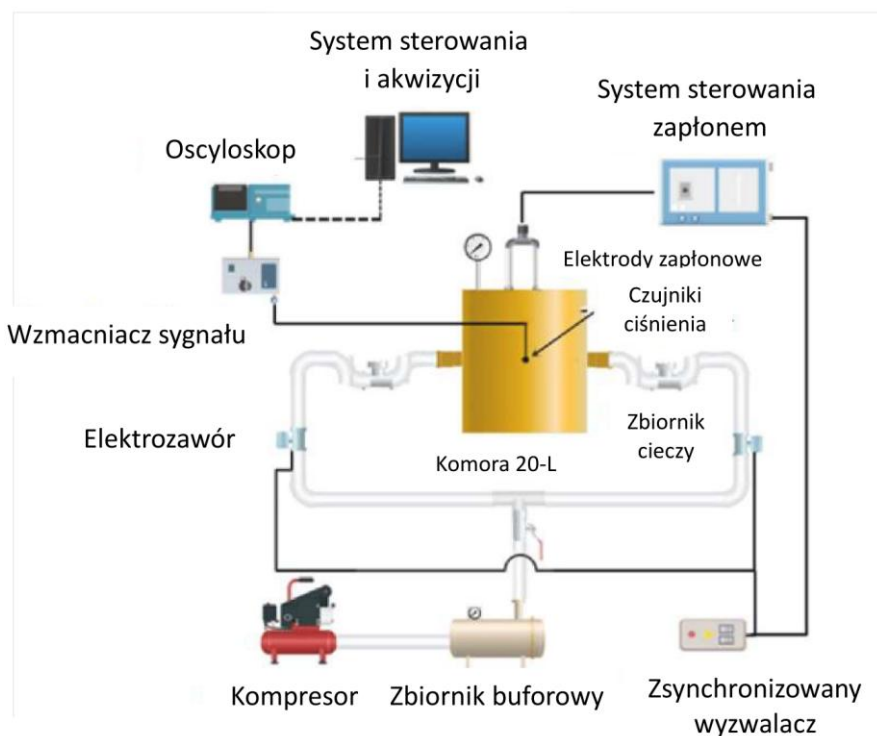
Rys. 5.9. Rura do badań rozprzestrzeniania się płomienia w aerozolu [El – Zahlanieh i in., 2020, 2022a]

W 20-litrowej sferycznej komorze badano intensywność wybuchów (rys. 5.10). Mgłą badanej cieczy wprowadzano dolną dyszą, po częściowym odpompowaniu sfery, co zapewniało osiągnięcie ciśnienia atmosferycznego po dyspersji. Zapłon wywoływano chemicznym źródłem o energii 100 J, a pomiar ciśnienia rejestrowano używając piezoelektrycznych czujników podłączonych do jednostki sterującej.



Rys. 5.10. (A) sfera wybuchowa o pojemności 20 litrów, (B) połączenia dyszy do sfery [El – Zahlanieh i in., 2020, 2022a,b]

Jia i in. (2023) badali aerozole etanolu, analizując korelacje między stężeniem, wielkością kropli, a turbulencją w cylindrycznym naczyniu o pojemności 20 litrów (rys. 5.11).



Rys. 5.11. Konfiguracja eksperymentalna [Jia i in., 2023]

Aparatura składała się z pneumatycznego systemu atomizacji, wyposażonego w dwie półkuliste dysze ze 189 otworami, iskrowego źródła zapłonu typu indukcyjno-pojemnościowego z elektrodami wolframowymi w odstępnie 3 mm oraz systemu akwizycji danych, rejestrującego przebieg ciśnienia wybuchu. Etanol podawano do dyszy za pomocą sprężonego powietrza. Przeprowadzono pomiary rozkładów wielkości kropli oraz intensywności turbulencji przy różnych ciśnieniach atomizacji. Uzyskane wyniki pomiarów parametrów wybuchowości aerozolu etanolu ujawniły wpływ tych czynników na maksymalne ciśnienie wybuchu i na szybkość narastania ciśnienia.

Autorzy prac: Addai (2016), Lin (2017), Shuai i in. (2019), El-Zahlanieh i in. (2020), Jia (2023) wskazali potrzebę ujednolicenia oceny właściwości wybuchowych aerozoli. Badania eksperymentalne prowadzone są przy użyciu różnych metod i urządzeń, co utrudnia porównywanie wyników. Różnice te wynikają z: warunków początkowych, rozdrobnienia aerozolu, źródła zapłonu, objętości, przy jakiej przeprowadza się badania i sposobu wytwarzania aerozolu. Bardziej sprecyzowane i lepsze narzędzia charakterystyki zagrożenia pożarowego aerozolu są niezbędne do zapobiegania stratom w przemyśle [Hung, 2013].

Badania jakościowe, czyli test palności i wybuchowości można przeprowadzić zgodnie z normą ASTM D3065-01 lub według wytycznych zawartych w dyrektywie parlamentu Unii Europejskiej [32008R1272], co bardziej szczegółowo opisano w podrozdziałach 5.2.2 i 5.2.3.

5.2.2. Test palności i wybuchowości według normy ASTM D3065-01

Norma ASTM D3065-01 określa dwie standardowe metody badań palności produktów aerosolowych. Pierwsza z nich obejmuje test rozpylania aerozolu na otwarty płomień w określonych warunkach, natomiast druga dotyczy testów w przestrzeni zamkniętej.

Metoda 1: Test na otwartej przestrzeni

Badanie polega na rozpylaniu aerozolu bezpośrednio na otwarty płomień, w celu dokonania oceny możliwości zapłonu. Jego celem jest określenie, czy produkt aerosolowy jest palny oraz jak zachowuje się w kontakcie z ogniem. Test przeprowadza się, rozpylając produkt aerosolowy w kierunku otwartego płomienia (np. palnika gazowego) z odległości od 15 cm do 90 cm. Ocenie podlegają:

- możliwość zapalenia aerozolu,
- długość płomienia podczas rozpylania.

Na podstawie wyników testu produkt klasyfikuje się do jednej z trzech kategorii:

- palny – aerosol zapala się i utrzymuje płomień przez określony czas,

- łatwopalny – aerozol zapala się natychmiast po kontakcie z płomieniem i wytwarza długi płomień,
- niepalny – aerozol nie zapala się lub płomień gaśnie natychmiast.

Metoda 2: Test w przestrzeni zamkniętej

Test polega na rozpylaniu aerozolu do cylindrycznego naczynia badawczego, w którym znajduje się otwarty płomień. Jeżeli dochodzi do zapłonu, odnotowuje się czas, jaki upłynął do momentu zapłonu oraz ilość rozpylonej cieczy. Na podstawie tej metody ocenia się, czy aerozol może zapalić się w ograniczonej przestrzeni, co mogłoby prowadzić do pożaru lub wybuchu. Celem tego testu jest symulacja warunków, w których aerozol jest rozpylany w słabo wentylowanej przestrzeni. Ocenia się, czy rozpylony aerozol (zawierający np. rozpuszczalniki, gazy pędne itp.) może ulec zapłonowi w obecności otwartego ognia. Dotyczy to przede wszystkim oceny ryzyka pożarowego dla sytuacji codziennego użytkowania aerozolu lub przypadkowego jego uwolnienia w zamkniętym pomieszczeniu.

Norma nie określa dokładnych parametrów komory testowej ani jej dokładnej objętości. Typowe komory mają objętość od 0,2 m³ do 1 m³ i powinny być wyposażone w okna lub inne sposoby pozwalające na bezpieczną obserwację (np. kamery czy wzierniki).

Aerozol jest rozpylany wewnątrz komory w określonej ilości i przez określony czas, dla osiągnięcia odpowiedniego nasycenia przestrzeni cząstkami aerozolu i gazów pędnych. W trakcie testu analizuje się:

- czy nastąpił zapłon,
- jak szybko zapłon się rozprzestrzenił,
- czy płomień utrzymuje się w komorze,
- czy doszło do gwałtownej reakcji (np. wybuchu).

Wyniki testu klasyfikują produkt jako łatwopalny lub wybuchowy w warunkach ograniczonej wentylacji. Na ich podstawie formułuje się ostrzeżenia, które powinny znaleźć się na etykiecie produktu oraz środki ostrożności wymagane podczas używania. Produkty o wysokiej skłonności do zapłonu wymagają specjalnego oznakowania jako „łatwopalne” oraz dodatkowych instrukcji dotyczących ich bezpiecznego stosowania i przechowywania.

Opisany w normie test wybuchowości polega na ocenie, czy produkt aerosolowy może wybuchnąć pod wpływem ciepła lub innych czynników, które mogą spowodować nagłe uwolnienie gazów pod ciśnieniem. Metoda badania polega na symulacji warunków ekstremalnych. Pojemnik z produktem aerosolowym jest umieszczany w komorze testowej,

gdzie poddawany jest wysokim temperaturom (np. w piecu) przez określony czas. Podczas testu ocenia się zachowanie pojemnika z produktem aerozolowym, zwracając uwagę na:

- deformacje,
- pęknięcia,
- eksplozję spowodowaną wzrostem ciśnienia wewnętrznego.

Wyniki testu pomagają określić potencjalne zagrożenie, np. w sytuacji przegrzania produktu (np. w przypadku pozostawienia w zamkniętym samochodzie w gorący dzień). Jeśli produkt wybucha, uznaje się go za niebezpieczny. Może to wymagać zmiany procesu produkcyjnego lub umieszczenie odpowiednich ostrzeżeń na etykiecie.

5.2.3. Test palności i wybuchowości według wytycznych dyrektywy UE [32008R1272]

Dyrektywa zawiera szczegółowe wytyczne dotyczące bezpieczeństwa oraz metod testowania aerozoli, podobnie jak norma ASTM D3065-01. Jest szeroko stosowana w krajach Unii Europejskiej. Obejmuje między innymi:

- ocenę palności – testy mające na celu określenie łatwopalności aerozoli, w tym ocenę zdolności do rozprzestrzeniania się płomienia,
- testy ciśnienia wewnętrznego – sprawdzanie ciśnienia gazu pędnego w pojemnikach,
- testy wydajności rozpylania – polegające na ocenie ilości produktu rozpylanego z pojemnika w określonym czasie,
- testy wybuchowości – badania mające na celu określenie, czy produkt może wybuchnąć pod wpływem działania ciepła.

Dyrektywa UE dotycząca produktów aerozolowych określa wymagania, które muszą zostać spełnione, aby produkt mógł być legalnie wprowadzony na rynek europejski. Określa szerszy zakres wymagań niż norma ASTM D3065-01, z naciskiem na zgodność z unijnymi regulacjami, w tym wymogami dotyczącymi bezpieczeństwa, etykietowania oraz testowania w różnych warunkach środowiskowych.

Zarówno dyrektywa UE, jak i norma ASTM nie uwzględniają badań dotyczących cieczy palnych, z których w wyniku nagłego, niekontrolowanego wypływu może powstać aerozol. Dla gazów, pyłów oraz par cieczy palnych istnieją odrębne akty normatywne, które szczegółowo określają procedury oznaczania parametrów zapalności i wybuchowości.

W przypadku tego typu aerozoli, poza wymienionymi wymaganiami, nadal brak jest szczegółowych regulacji w tym zakresie.

6. Opracowanie metody badawczej aerozoli cieczy palnych

Na podstawie analizy literatury dotyczącej metod badania zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych przyjęto, że zasada działania oraz konstrukcja aparatury badawczej powinny być oparte na doświadczeniach zdobytych podczas badań wybuchowości gazów i pyłów. Koncepcja ta stanowi solidną podstawę do określania właściwości wybuchowych i zapalnych aerozoli cieczy palnych, co może wnieść istotny wkład do oceny zagrożeń w środowiskach przemysłowych.

Celem badań było wytworzenie jednolitej chmury aerozolu wewnątrz komory badawczej, jej zainicjowanie oraz precyzyjny pomiar zmian ciśnienia podczas procesu spalania.

W fazie projektowania przyjęto kluczowe wymagania, które aparatura do oznaczania parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli musi spełniać:

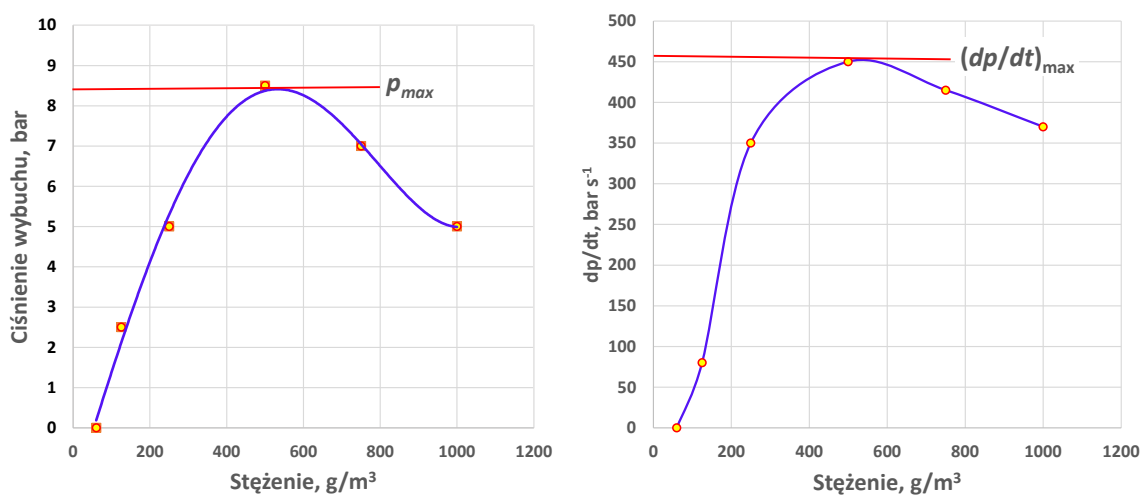
- komora spalania o geometrycznym kształcie i objętości 5 dm³,
- odpowiedni kształt i kierunek strumienia wytwarzanego aerozolu,
- znana intensywność rozpylania i zasięg strumienia paliwa dla zadanych ustawień,
- wytwarzanie aerozolu w określonym zakresie wielkości kropeł,
- wytwarzanie aerozolu za pomocą ciśnienia cieczy bez użycia medium gazowego,
- brak przyrostu ciśnienia wewnątrz komory badawczej podczas wytwarzania aerozolu,
- pomijalna turbulencja w fazie testu,
- możliwość regulacji czasu trwania wtrysku aerozolu,
- krótki czas wytwarzania aerozolu,
- zapewnienie tego samego czasu wytwarzania aerozolu dla szerokiego zakresu stężeń,
- możliwość regulacji czasu opóźnienia zapłonu,
- możliwość zmiany energii iskry inicjującej.

Badania nad aerozolami cieczy palnych powinny koncentrować się na oznaczeniu podstawowych wskaźników wybuchowości. Kluczowe jest oznaczenie tzw. charakterystyki wybuchowości aerozolu, która zawiera dwa istotne elementy:

- przyrost ciśnienia podczas wybuchu w zamkniętej przestrzeni (komorze badawczej), w funkcji stężenia,

- szybkość narastania ciśnienia podczas wybuchu w zamkniętej przestrzeni, w funkcji stężenia.

Głównym celem przeprowadzenia charakterystyki wybuchowości jest oznaczenie maksymalnego ciśnienia wybuchu p_{max} i maksymalnej szybkości wzrostu ciśnienia $(dp/dt)_{max}$. Oba te parametry określa się w oparciu o serię testów przeprowadzonych w szerokim zakresie stężeń najczęściej z powtórzeniami w dwóch seriach dla najwyższych wartości z pierwszej serii, zgodnie z normami [PN-EN 14034-1 i 2, 2011], jeżeli badania pyłów przeprowadza się w innej niż standardowa komora badawcza mająca objętość 1 m³. W pierwszej serii testów maksymalne nadciśnienie wybuchu i maksymalna szybkość wzrostu ciśnienia są określane w szerokim zakresie stężeń – od niskiego stężenia, przez stopniowe jego zwiększanie, aż do momentu wyraźnego określenia maksymalnych wartości ciśnienia wybuchu oraz szybkości wzrostu ciśnienia (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Przykładowy przebieg wyznaczania parametrów wybuchowości p_{max} i $(dp/dt)_{max}$ (oprac. własne)

Kolejne serie są przeprowadzane dla stężeń, w których uzyskano najwyższe wartości w pierwszej serii. Zgodnie z instrukcją KSEP i serią norm PN-EN 14034 wskaźniki wybuchowości p_{max} i $(dp/dt)_{max}$ definiuje się jako średnie wartości z maksymalnych wartości każdej serii, łącznie z trzech serii wyznaczanych w komorze 20-litrowej opisanej w normie jako alternatywna objętość do badania wybuchowości pyłów.

Maksymalne ciśnienie wybuchu, określone w zamkniętych kulistych lub sześciennych naczyniach o odpowiedniej wielkości (dla pyłów o objętości ≥ 20 dm³), z centralnym źródłem zapłonu, jest praktycznie niezależne od objętości naczynia [PN-EN 60079-10-1 2021]. Ta zasada powinna również mieć zastosowanie, przynajmniej w teorii, dla aerozoli. W praktyce wyniki badań innych eksperymentatorów [Gieras i in., 2008], prowadzonych w różnych objętościach i wyniki uzyskane w tej pracy w porównaniu z wynikami Addaia (2016), różnią

się. Różnice mogą wynikać ze swoistych właściwości aerozoli i zastosowanej metody. Niewielka liczba testów przeprowadzonych dla aerozoli w różnych objętościach, nie daje jednoznacznej odpowiedzi.

Maksymalna szybkość wzrostu ciśnienia $(dp/dt)_{max}$ dla pyłów i gazów jest natomiast ściśle zależna od objętości naczynia, w którym jest oznaczana. Dynamika wybuchu, zarówno w skali laboratoryjnej, jak i przemysłowej, zależy od objętości komory, w której dochodzi do wybuchu. Aby uzyskać dane niezależne od wielkości komory, stosuje się tzw. stałą K , która dla pyłów jest oznaczana jako K_{St} , a dla gazów jako K_G . Stałą K definiuje się jako maksymalną szybkość narastania ciśnienia w komorze o objętości 1 m^3 . W przypadku badań prowadzonych dla innych objętości komór, stałą K można wyznaczyć przy użyciu prawa objętościowego, które przedstawia się wzorem (6.1):

$$K = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{max} V^{1/3} \quad (6.1)$$

gdzie:

V – objętość komory badawczej.

Zależności wynikające z prawa objętościowego znajdują szerokie zastosowanie w badaniach pyłów dla objętości od 20 dm^3 oraz w badaniach gazów i cieczy dla objętości od 5 dm^3 . Dla aerozoli zdecydowano się na zastosowanie komory badawczej o objętości 5 dm^3 , analogicznie do badań gazów. Wynikało to z faktu, że wytworzenie stabilnej chmury aerozolu i przeprowadzenie badań w większych komorach badawczych jest znacznie trudniejsze. Korzystanie z zależności prawa objętościowego umożliwia ekstrapolację wyników uzyskanych dla małej komory na większe przestrzenie, charakterystyczne dla środowiska przemysłowego.

Przyjęte wymagania dla aparatury badawczej aerozoli powinny pozwolić na przeprowadzenie badań cieczy palnych o różnych właściwościach fizykochemicznych. Elastyczność układu pompowo-wtryskowego odgrywa kluczową rolę w tym procesie. Układ ten musi być zdolny do pracy z różnymi cieciami. Powinien być zdolny do wytworzenia odpowiedniego ciśnienia, osiągającego nawet kilkaset bar, niezbędnego do skutecznego rozpylania cieczy i uzyskania jednorodnej chmury aerozolu w komorze badawczej.

Krótki czas rozpraszania aerozolu jest niezbędny, do ograniczenia wpływu parowania cieczy na wyniki badań. Optymalizacja parametrów układu wytwarzającego aerozol powinna pozwolić na dostosowanie aparatury do specyficznych wymagań różnych cieczy, co przekłada

się na niezawodność i dokładność pomiarów, niezależnie od zmieniających się warunków pracy.

Badania wybuchowości i zapalności aerozoli cieczy palnych mają istotny wpływ na zapewnianie bezpieczeństwa przemysłowego. Zagrożenia związane z wybuchami pyłów i gazów wymagają zastosowania skutecznych środków ochronnych i odpowiedniego projektowania instalacji przetwarzających substancje palne. Parametry, takie jak maksymalne ciśnienie wybuchu p_{max} i maksymalna szybkość narastania ciśnienia $(dp/dt)_{max}$, są niezbędne dla przeprowadzenia właściwej oceny ryzyka wybuchu.

Dzięki dobrze zaprojektowanej i zbudowanej aparaturze badawczej i przyjętej odpowiedniej procedurze badawczej, z możliwością pomiaru wielkości cząstek aerozolowych, możliwe jest uzyskanie kompleksowych danych dotyczących charakterystyki wybuchowości aerozoli. Mają one praktyczne zastosowanie w przemyśle i stają się integralną częścią strategii minimalizacji ryzyka związanego ze stosowaniem aerozoli w środowisku przemysłowym.

6.1. Założenia nowej metody badania aerozoli

Opracowanie założeń nowej metody badawczej dla oznaczania właściwości zapalnych i wybuchowych aerozoli cieczy palnych ma kluczowe znaczenie dla uzyskania wiarygodnych danych, które mogą być wykorzystane do oceny ryzyka wybuchu w warunkach przemysłowych. W niniejszym podrozdziale omówiono kryteria metody, których celem jest uzyskanie ilościowych informacji na temat zapalności i wybuchowości aerozoli. Informacje te są niezbędne na etapie projektowania bezpiecznych instalacji przemysłowych, w tym opracowania systemów ochronnych jak i spełnienia wymogów dyrektywy ATEX.

Jak wykazano w poprzednich rozdziałach, aerozole cieczy palnych znacząco różnią się właściwościami zapalnymi od cieczy w stanie ciekłym. Mają one często niższą temperaturę zapłonu, a wybuchy z ich udziałem mogą mieć bardziej dotkliwe skutki niż w przypadku par tych cieczy. Badania aerozoli wymagają zatem stosowania metod uwzględniających specyfikę cieczy rozproszonych, takich jak możliwość precyzyjnego pomiaru wielkości cząstek aerozolu. Kluczowe znaczenie ma również elastyczność metody w regulacji parametrów, takich jak czas generowania aerozolu, stężenie, moment zapłonu czy energia iskry inicjującej. Niższa temperatura zapłonu oraz specyficzne właściwości aerozoli wskazują na konieczność stosowania metod dostosowanych do różnych warunków przemysłowych. Istotne jest także ograniczenie wpływu czynników zewnętrznych, takich jak turbulencje oraz wykluczenie

stosowania powietrza sprężonego w procesie wytwarzania aerozolu. Dzięki temu uzyskane dane mogą dokładniej odzwierciedlać rzeczywiste zagrożenia i wspierać dobór profilaktyki skutecznie minimalizując ryzyko wybuchu.

Autorzy Maragos i Bowen (2002) oraz Eichhorn (1955) podkreślają konieczność stosowania zróżnicowanych technik diagnostycznych dla uzyskania pełnego obrazu zapalności i wybuchowości aerozoli. Do kluczowych parametrów, które należy oznaczyć, należą minimalna energia zapłonu (*MIE*) oraz dolne i górne granice palności (*LFL/UFL*). Niestety, brak uniwersalnych standardów badawczych w tym obszarze, stanowi nadal istotną barierę dla dokładnej oceny tych właściwości.

Zasada działania aparatury badawczej powinna uwzględniać doświadczenia oparte na sprawdzonych stosowanych badaniach wybuchowości gazów i pyłów, z uwzględnieniem specyfiki cieczy w formie aerozoli. Opracowanie założeń nowej metody badawczej powinno uwzględniać kilka kluczowych elementów:

- geometria komory badawczej – zastosowano sferyczną komorę o objętości 5 dm³, zgodną z wymaganiami dla badań gazów; taka geometria zapewnia równomierne rozproszenie aerozolu i zbadanie jego chmury,
- układ generowania aerozolu – system wykorzystuje wysokociśnieniową pompę pneumatyczną z nierdzewnych, odpornych na korozję materiałów, wytwarza krople o średnicy 10–50 µm, kluczowe dla stworzenia jednorodnej chmury aerozolu; przed każdym badaniem wykonywany jest pomiar wielkości cząstek dla uwzględnienia różnic we właściwościach cieczy,
- źródło zapłonu – w badaniach wybuchowości zastosowano generator iskier o stałej energii 7 J; do badań innych parametrów, np. minimalnej energii zapłonu zastosowano generator iskier o różnej mocy wyładowania i o różnym charakterze iskry – z indukcyjnością lub bez,
- precyzyjna regulacja stężenia i czasu zapłonu – stężenie aerozolu i czas trwania wtrysku są kontrolowane za pomocą zaawansowanego układu sterowania, co pozwala na analizę wpływu różnych warunków na dynamikę wybuchu.

Chociaż nie istnieje dedykowana aparatura i procedury badawcze dotyczące oznaczania parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli, w praktyce badawczej często stosuje się urządzenia wykorzystywane do testowania wybuchowości gazów i pyłów. Zbudowane stanowisko badawcze do testowania wybuchowości aerozoli, zostało zaprojektowane na podstawie dotychczasowych doświadczeń ze stosowania tego rodzaju urządzeń i badanych

mediów. Przystosowano 5-litrową sferyczną komorę badawczą, analogiczną do badań gazów, jej konstrukcję jednak odpowiednio zmodyfikowano. Przyjęcie sferycznej komory badawczej pozwala na dokładne pomiary przyrostu ciśnienia i szybkości jego narastania. Dzięki zastosowaniu prawa objętościowego wyniki badań mogą być ekstrapolowane na inne wielkości komór, co zwiększa ich uniwersalność.

Opracowana nowa metoda badawcza uzupełnia lukę braku standardowych procedur w obszarze badań aerozoli i jest narzędziem, które może być szeroko wykorzystywane w przemyśle do oceny ryzyka i projektowania systemów ochronnych zgodnych z wymaganiami dyrektywy ATEX.

6.1.1. Sposób wytwarzania aerozolu

Na podstawie dokonanego w rozdziale 5.2 przeglądu metod wytwarzania aerozolu można stwierdzić, że najbardziej odpowiednia jest metoda ciśnieniowa. Jest to technika szeroko stosowana w przemyśle, która wiernie odwzorowuje procesy technologiczne oraz związane z tym możliwe awarie. Atomizacja ciśnieniowa, czyli proces wytwarzania kropeł, polega na rozpraszaniu cieczy przez przepchnięcie jej przez otwór dyszy, co prowadzi do powstania małych więzadeł cieczy, które następnie rozpadają się na drobne krople. Zjawisko to jest wynikiem działania energii potencjalnej cieczy oraz geometrii dyszy, prowadząc do wytworzenia „kropelek” lub cząsteczek cieczy [Schick, 2008; Graco, 1995]. Właściwości cieczy, które mają kluczowy wpływ na proces atomizacji, to:

- gęstość,
- napięcie powierzchniowe,
- lepkość.

Parametry te w połączeniu z innymi czynnikami, takimi jak: ciśnienie otoczenia, ciśnienie wtrysku, a także temperatura rozpylanej cieczy, wpływają na efektywność atomizacji oraz wielkość wytworzonych kropli [Włodarczak, 2016]. Ważnym czynnikiem jest także temperatura wrzenia cieczy, ponieważ dostarcza informacji o szybkości parowania w temperaturze pokojowej, co może wpływać na zapalność i wybuchowość aerozolu.

Zasadniczą właściwością cieczy, która determinuje kształt powstających kropli, jest napięcie powierzchniowe. Jest to siła, która sprawia, że krople cieczy dążą do przyjęcia kształtu kulistego, co minimalizuje ich powierzchnię. Dzięki temu ciecz w postaci cienkich więzadeł jest niestabilna i rozpada się na mniejsze jednostki. Wielkość powstałych kropli zależy od kilku czynników, między innymi od ciśnienia wtrysku – wraz ze wzrostem

ciśnienia wielkość kropli maleje, a spadek ciśnienia powoduje wzrost rozmiaru kropli. Natężenie przepływu cieczy przez dyszę ma również znaczący wpływ na wielkość kropli. Wzrost natężenia przepływu cieczy przyspiesza spadek ciśnienia i zmniejsza rozmiar kropli, natomiast spadek natężenia przepływu ma efekt odwrotny [Addai, 2016].

Proces rozpylania cieczy, prowadzący do powstania aerozolu, jest złożony i uzależniony od szeregu zmiennych, jak już wcześniej wspomniano: lepkości cieczy, napięcia powierzchniowego, szybkości przepływu oraz ciśnienia natryskiwania. Każdy z tych parametrów ma bezpośredni wpływ na końcową wielkość kropli w aerozolu. Im wyższe ciśnienie natrysku, tym mniejsze krople, podczas gdy wzrost lepkości cieczy oraz napięcia powierzchniowego prowadzi do zwiększenia energii wymaganej do rozpylania, a tym samym większej wielkości kropli [Lim i Sivathanu, 2005]. Według Orzechowskiego i Prywera (2008) dla cieczy o większej gęstości można uzyskać mniejsze krople.

Z przeprowadzonych przez Hayashi i in. (1977) doświadczeń dotyczących rozpylania cieczy i wytwarzania aerozoli wynikało, że aerozole o niejednorodnych kroplach po zapaleniu charakteryzują się wyższą prędkością płomienia niż aerozole o jednorodnej wielkości kropli. Wyniki tych badań miały kluczowe znaczenie przy wyborze metody wytwarzania aerozolu w opracowanej aparaturze prototypowej, decydując o zastosowaniu wtrysku cieczy ukierunkowanego na osiągnięcie pożądanego efektu.

Jednym z trudniejszych wyzwań związanych z budową aparatury było dobranie odpowiedniego wtryskiwacza, który spełniałby założone wcześniej wymagania eksperymentu. Taka geometria komory badawczej wymagała precyzyjnego rozprowadzenia aerozolu z jednoczesnym zminimalizowaniem osiadania kropli na ściankach komory. Przetestowałem wiele typów wtryskiwaczy, ostatecznie wybierając sześciootworowy wtryskiwacz elektromagnetyczny Bosch, który dla testowanych cieczy pozwolił na wytworzenie kropli aerozolu o wielkości od 10 do 50 μm . Szeroki kąt natrysku wynoszący 110° oraz odpowiedni zasięg rozpylania cieczy umożliwiają równomierne rozprowadzenie aerozolu w komorze badawczej. Stężenie aerozolu w naczyniu można kontrolować między innymi przez czas otwarcia wtryskiwacza i ciśnienie. Ten sposób pozwala na rozproszenie aerozolu w określonym stężeniu przyjmując ten sam czas dyspersji. Innym sposobem może być zmiana liczby dawek i regulacja ciśnienia wtrysku co pozwala na precyzyjną kontrolę procesu badawczego. Wszystkie parametry są monitorowane, z możliwością dokładnej regulacji przez system sterowania. Pozwala to na stałą kontrolę parametrów wytwarzanego

aerozolu co daje dużą pewność uzyskania jednorodnej chmury aerozolu o pożądanej wielkości kropeł oraz pożądanym stężeniu.

Wybór odpowiedniej metody wytwarzania aerozolu jest kluczowy dla prawidłowego przeprowadzenia eksperymentów oraz uzyskania powtarzalnych wyników, co jest istotne w kontekście dalszych badań dla określenia wybuchowości aerozoli.

6.1.2. Sposób pomiaru wielkości kropeł aerozolu

W badaniach nad zapalnością i wybuchowością aerozoli niezwykle ważne jest dokładne określenie wielkości cząstek aerozolu. Jedną z najczęściej stosowanych metod w tym zakresie jest dyfrakcja laserowa, która umożliwia szybki i dokładny pomiar rozmiaru cząstek. Technika jest oparta na zjawisku rozpraszania światła, które zachodzi, gdy wiązka światła laserowego przechodzi przez próbkę aerozolu lub cieczy rozpylonej w powietrzu. Krople aerozolu rozpraszają światło pod różnymi kątami, a zależność między kątem rozproszenia a wielkością cząstki jest kluczowa dla precyzyjnego pomiaru. Większe cząstki (krople) rozpraszają światło pod mniejszym kątem, a mniejsze cząstki (krople) rozpraszają światło pod większym kątem. Zaletą tej technologii jest możliwość pomiaru kropeł w szerokim zakresie ich rozmiarów, co czyni ją wszechstronną i idealną do badania aerozoli w różnych warunkach. W przeprowadzonych badaniach do pomiaru wielkości cząstek aerozolu zastosowano urządzenie Spraytec firmy Malvern Panalytical (2007), które działa w oparciu o metodę dyfrakcji laserowej. Urządzenie Spraytec wykorzystuje laser jako źródło światła. Promień lasera przechodzi przez chmurę cząstek, które rozpraszają światło w różnych kierunkach, a następnie, detektory rozmieszczone pod różnymi kątami, rejestrują intensywność rozproszonego światła. System ten jest wyjątkowo precyzyjny i umożliwia pomiar cząstek o średnicach w zakresie od 0,1 μm do 2000 μm , co stanowi szeroki zakres wielkości typowych dla aerozoli. Spraytec charakteryzuje się wysoką czułością i szybkością działania, co umożliwia dynamiczne śledzenie zmian rozkładu wielkości cząstek w czasie rzeczywistym. Urządzenie Spraytec wykorzystuje zaawansowane algorytmy matematyczne do analizy rozproszonego światła i przekształca dane w rozkład wielkości cząstek. W tym celu stosowane są dwa główne modele dyfrakcyjne:

- Fraunhofer Diffraction – ten model wykorzystywany jest do pomiaru większych cząstek, gdzie dominującym zjawiskiem jest dyfrakcja światła. Model ten jest stosunkowo prosty i zakłada, że światło rozprasza się głównie na granicach cząstek.

- Mie Theory – to bardziej zaawansowany model używany do precyzyjnych pomiarów mniejszych cząstek, gdzie długość fali światła laserowego jest porównywalna z rozmiarem cząstki. Teoria Mie uwzględnia zarówno dyfrakcję, jak i załamanie światła, co pozwala na bardzo dokładne odzwierciedlenie rozkładu wielkości drobnych cząstek.

Spraytec generuje dane w postaci szczegółowych wykresów rozkładu wielkości cząstek oraz danych statystycznych. Kluczowe parametry, które można uzyskać za pomocą tego systemu, to:

- średnia wielkość cząstek – wyrażona jako na przykład średnica Sautera ($D[3,2]$), która daje uśredniony obraz rozmiaru cząstek w próbce,
- rozkład objętościowy i powierzchniowy – pozwala na ocenę, jak cząstki rozkładają się względem swojej objętości lub powierzchni,
- wielkości charakterystyczne (D_{10} , D_{50} , D_{90}) – wskazują wielkości cząstek, poniżej których znajduje się odpowiednio 10%, 50% i 90% objętości wszystkich cząstek w próbce.

Analizator ten umożliwia prowadzenie zarówno ciągłych pomiarów strumienia aerozolu, jak i pomiarów impulsowych, co jest szczególnie przydatne w badaniach nad aerozolami dynamicznie zmieniającymi się w czasie. Oznacza to, że urządzenie może być używane do monitorowania procesów rozpylania w czasie rzeczywistym, na przykład w warunkach zmieniającego się ciśnienia lub temperatury. Dzięki możliwości precyzyjnego określenia wielkości cząstek, Spraytec dostarcza dane niezbędne do analiz w oznaczaniu parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli, co ma bezpośrednie przełożenie na ocenę ryzyka wybuchowego dla różnych aplikacji przemysłowych. Precyzyjne badanie rozkładu wielkości cząstek umożliwia lepsze zrozumienie mechanizmów zapalania się aerozoli oraz wpływu ich rozmiarów na proces spalania, co jest kluczowe dla przewidywania i zapobiegania niebezpiecznym sytuacjom.

W tej pracy wykorzystywana będzie głównie średnia wielkość cząstek, czyli $D[3,2]$ powszechnie nazywana średnią średnicą Sautera (SMD). Wyznacza się ją na podstawie stosunku całkowitej objętości do całkowitej powierzchni cząstek w próbce. Jak już wcześniej wspomniano, analizator Spraytec oblicza (SMD) w oparciu o rozkład wielkości cząstek metodą dyfrakcji laserowej według wzoru (6.2):

$$D_{3,2} = \frac{\sum V_i}{\sum A_i} = \frac{\sum d_i^3 n_i}{\sum d_i^2 n_i} \quad (6.2)$$

gdzie:

$D_{3,2}$ – średnia średnica Sautera,

d_i – średnica cząstki w danym przedziale rozmiarów,

n_i – liczba cząstek o średnicy d_i ,

V_i – objętość cząstek w danym przedziale rozmiarów,

A_i – powierzchnia cząstek w danym przedziale rozmiarów.

6.1.3. Wybór źródła zapłonu

W procesie przemysłowym elektryczność statyczna może łatwo powstawać podczas transportu materiału, działania urządzeń mechanicznych czy na człowieku. W rzeczywistości elektryczność statyczna jest trudna do całkowitego wyeliminowania, co może skutkować przypadkowym zapłonem i wybuchem niebezpiecznych substancji [Eckhoff, 2002; Eckhoff i in., 2010]. Wyładowanie elektrostatyczne występuje w pięciu postaciach:

- wyładowanie koronowe,
- wyładowanie iskrowe,
- wyładowanie snopiaste,
- propagujące się wyładowanie snopiaste,
- wyładowanie stożkowe.

Ważne jest właściwe zrozumienie charakterystyki wyładowań dla zapobieżenia niebezpiecznym zdarzeniom zapłonu. Zagrożenie pożarem lub wybuchem powstaje, gdy energia wyładowania elektrostatycznego osiąga wartość porównywalną do minimalnej energii zapłonu występującego tam medium. Wielkość ta charakteryzuje zdolność zapłonową materiału. Jest to najmniejsza wartość energii wyładowania elektrostatycznego, zdolnego wywołać zapłon danej substancji palnej lub zainicjować wybuch mieszaniny tworzonej przez tę substancję z powietrzem bądź tlenem. Substancją taką może być materiał stały, zwłaszcza w postaci pylistej, ciecz lub gaz. Niższą energię zapłonu mają na ogół mieszaniny gazów lub par niż obłoki pyłów czy sama ciecz.

W normach dotyczących oznaczania parametrów zapalności i wybuchowości gazów źródłem zapłonu jest iskra indukcyjna. Występuje ona w normach amerykańskich i europejskich [ASTM-E2079, ASTM-E681-09, EN-1839, EN-15967] dotyczących określania granic wybuchowości, granicznego dla wybuchu stężenia tlenu, maksymalnego ciśnienia wybuchu i maksymalnej szybkości wzrostu ciśnienia gazów i par oraz w międzynarodowej

normie dotyczącej oznaczania wybuchowości gazów [PN-EN ISO/IEC 80079-20-1:2015]. Norma [PN-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016-12] dotycząca oznaczania parametrów zapalności i wybuchowości pyłów dla parametru minimalnej energii zapłonu (*MIE*) nakazuje stosowanie iskry indukcyjnej lub pojemnościowej. Iskrowe źródło zapłonu stosowane jest również dla cieczy łatwopalnych [PN-EN-15794].

Wybór źródła zapłonu i jego moc są bardzo istotne i mogą mieć duży wpływ na wynik, jak stwierdzono w pracach Frankego (1978); Askara i Schroedera (2019); Rose'a i Priede'a (1958); Bane'a (2010); Shepherd i in. (2000), Spitzera i in. (2021). Oprócz energii zapłonu, która jest faktycznie wprowadzana do układu, istnieje kilka innych czynników źródła zapłonu, które mogą wpływać na skuteczność źródła zapłonu, w szczególności czas zapłonu i początkowa objętość, na którą wpływa źródło zapłonu, co zależy również od odległości i orientacji elektrod [Spitzer S. i in. 2021]. Zapłon iskrowy jest prawdopodobnie najczęstszym źródłem zapłonu w przypadku wybuchu gazu. Charakteryzuje się on, w porównaniu zapłonu opisanego w normach pyłowych, zazwyczaj niską energią zapłonu ($< 10 \text{ J}$) i długim czasem zapłonu (200–400) ms.

7. Aparatura badawcza

Opracowana aparatura badawcza składa się z następujących podzespołów:

- Komora badawcza,
- Układ pompowo-wtryskowy,
- Układ zapłonowy,
- Układ sterowania i kontroli,
- Układ akwizycji danych,
- Układ chłodzenia.

Zasada działania i budowa aparatury przeznaczonej do pomiaru wskaźników wybuchowości aerozoli oparta jest na koncepcji aparatury do oznaczania parametrów wybuchowości gazów i pyłów. Główną część aparatury (rys. 7.1) stanowi zmodyfikowana 5-litrowa komora sferyczna, która jest jedynym elementem wykorzystanym z aparatury do badań wybuchowości pyłów firmy Adolf Kühner. Wykonany został całkowicie nowy, dolny adapter komory. Komorę badawczą wyposażono w układ wytwarzania aerozolu, układ sterowania i akwizycji danych, generator iskier oraz układ regulacji/kontroli temperatury. Komora sferyczna otoczona jest płaszczem wodnym, dzięki czemu jest możliwość utrzymywania stałych warunków temperaturowych podczas badań. W górnym wieku komory badawczej zamontowane są dwie elektrody zapłonowe, w dolnej części zamontowano wtrysk. Na froncie kuli znajduje się przeźroczyste okienko do obserwacji wnętrza. W bocznej ścianie są dwa piezorezystancyjne przetworniki ciśnienia Kistler 4624, służące do pomiaru ciśnienia wybuchu i temperatury. Sygnały rejestrowane są przez system akwizycji danych. Jako źródło zapłonu zostały zastosowane różne generatory iskier – z indukcyjnością i bez. Odległość między elektrodami wolframowymi podczas badań wynosiła 3,3 mm.



Rys. 7.1. Stanowisko badawcze (fot. A. Toman)

7.1. Komora badawcza

Główną częścią stanowiska badawczego jest komora sferyczna Adolfa Kühnera o pojemności 5 dm³ (rys. 7.2) pierwotnie przeznaczona do badania wybuchowości pyłów.



Rys. 7.2. Komora badawcza 5 dm³ (fot. A. Toman)

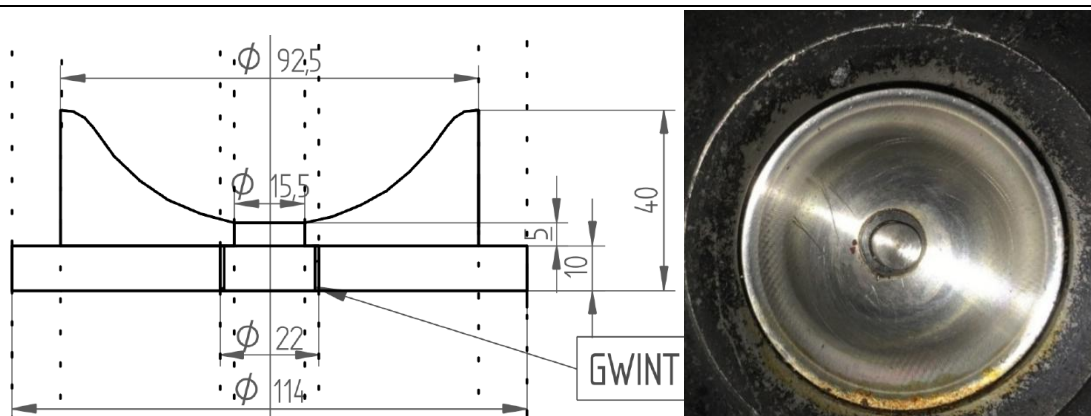
Średnica wewnętrzna kuli wynosi 21,22 cm. Dostosowanie jej do badań aerozoli wymagało gruntownej modyfikacji. Komora testowa to od środka pusta kula wykonana ze stali nierdzewnej, która jest odporna na wysokie temperatury i ciśnienie generowane podczas testów wybuchowych. Płaszcz wodny, w który wyposażono komorę, służy do odbierania ciepła wybuchu, stabilizując i utrzymując stałą temperaturę wewnątrz komory. Realizacja tego zadania wymagała wyposażenia komory w czujniki temperatury oraz pompę z buforowym wymiennikiem ciepła. Dodatkowo w szeregu zainstalowano chłodnicę z wentylatorem w przypadku niewydolności układu z buforem. Taka konfiguracja umożliwia prowadzenie badań w stabilnych i powtarzalnych warunkach dla wszystkich testów.

Komora jest wyposażona w różne porty służące między innymi do przewietrzania przestrzeni wewnętrznej po wybuchu, otwory montażowe (czujniki ciśnienia, czołowe okno kontrolne pozwalające na obserwację przestrzeni wewnętrznej) oraz dwa otwory rewizyjne do obsługi podczas badań. Otwory te ulokowano od góry i od spodu komory. W górnym wieku komory zainstalowano adapter umożliwiający montaż dwóch prętów elektrod zapłonowych (rys. 7.3).



Rys. 7.3. Górny adapter komory z elektrodami zapłonowymi (fot. A. Toman)

Pręty te poprowadzono do geometrycznego środka kuli. Na ich końcach zamontowano wolframowe zaostrome końcówki, między którymi dochodzi do wyzwolenia (przeskoku) iskry. Dolna część komory została wyposażona w adapter umożliwiający montaż wtrysku (rys. 7.4).



Rys. 7.4. Dolny adapter komory na wtrysk (fot. A. Toman)

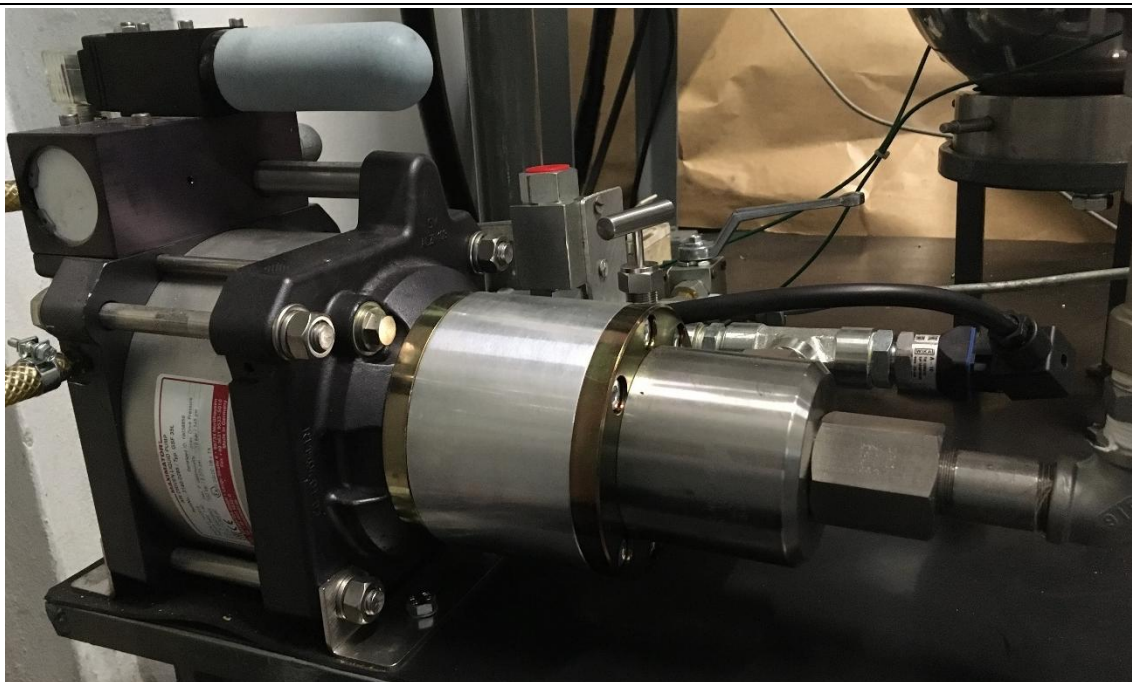
Oryginalny element odpowiedzialny za dyspersję pyłu został zastąpiony specjalnie wyprofilowanym adapterem ze stali nierdzewnej, umożliwiającym szczelne zamknięcie komory od spodu i montaż wtrysku. Całość, wraz z osprzętem, została zamocowana na specjalnie przygotowanym stole. Komorę uzbrojono w dodatkową niezbędną armaturę typu zawory, węże przewietrzające oraz cyrkulację wody. Stół wyposażono również w ramię z linką stalową oraz przeciwwagę, co ułatwia wygodne otwarcie komory i podniesienie górnej dennicy lub całej komory bez dolnego adapteru.

7.2. Układ pompowo-wtryskowy

W skład zestawu wytwarzania aerozolu wchodzi głównie pompa wysokiego ciśnienia Maximator GSF 35 wraz z systemem kontroli i sterowania ciśnieniem cieczy oraz wtryskiwacz elektromagnetyczny Bosch HDEV 0 261 500 109 z precyzyjnym układem sterowania wtryskiem Motoelektron.

7.2.1. Układ pompowy

Zgodnie z wcześniejszymi założeniami do wytwarzania odpowiedniego ciśnienia cieczy, do wtrysku wykorzystano wysokociśnieniową pompę Maximator GSF 35 (rys. 7.5). Wybrana pompa, w wykonaniu z uszczelnieniem specjalnym, spełnia kryteria doboru i jest przeznaczona do różnego rodzaju cieczy palnych.

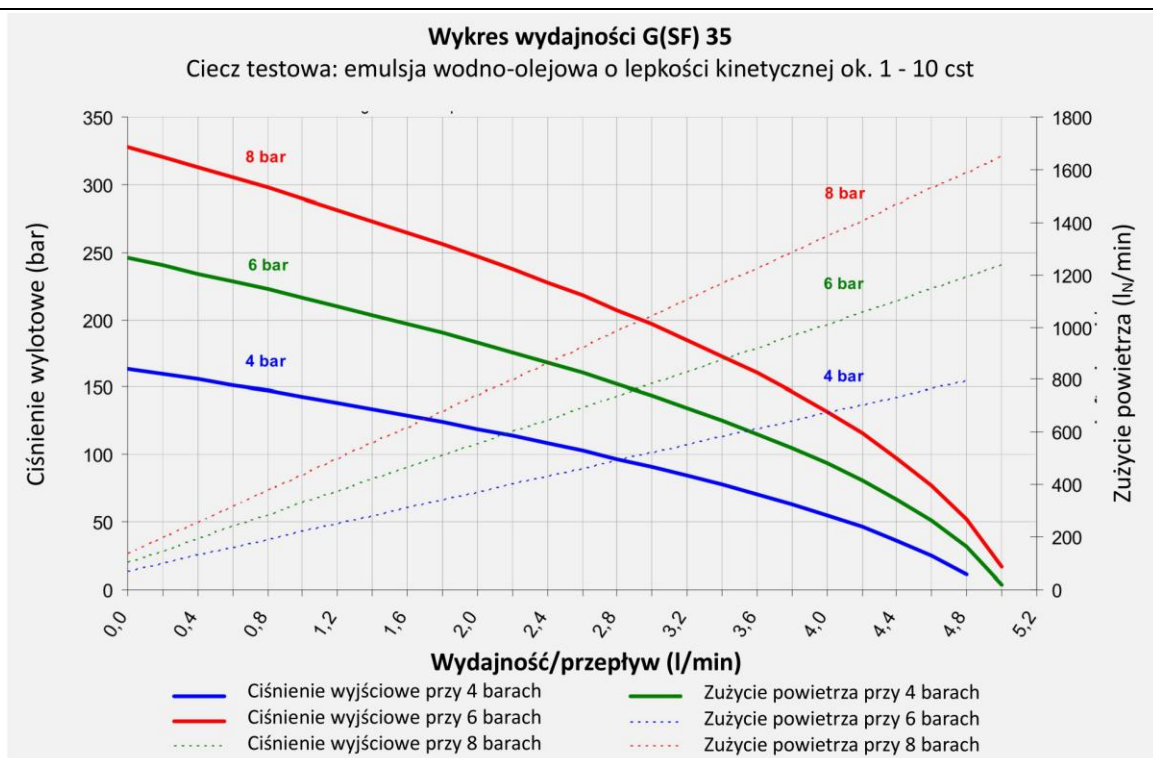


Rys. 7.5. Wysokociśnieniowa pompa Maximator GSF 35 (fot. A. Toman)

Dane techniczne pompy:

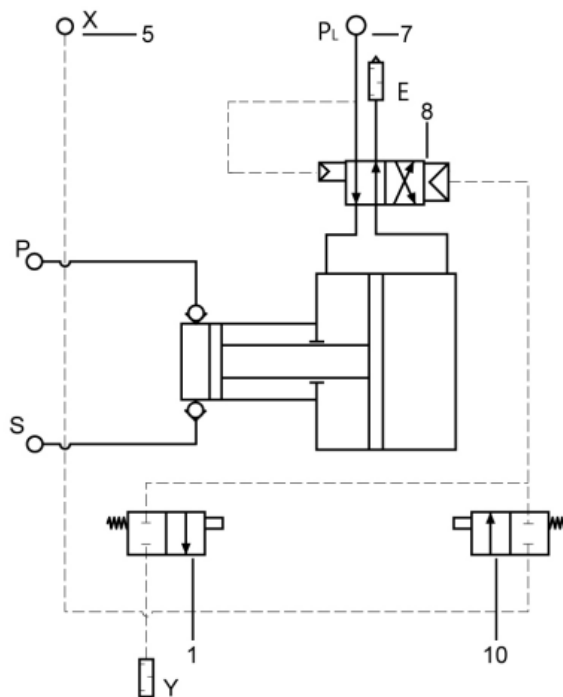
- tłok ze stali nierdzewnej,
- wersja z uszczelnieniami dla specjalnych mediów,
- stosunek ciśnień 1:40,
- maksymalne ciśnienie 400 bar,
- pojemność skokowa 24,5 cm³,
- minimalne ciśnienie napędowe 1 bar,
- maksymalne ciśnienie napędowe 10 bar.

Na rysunku 7.6 przedstawiono charakterystykę wydajnościowo-ciśnieniową zastosowanej pompy GSF 35.



Rys. 7.6. Charakterystyka wydajnościowa pompy GSF 35 (źródło: dokumentacja techniczna)

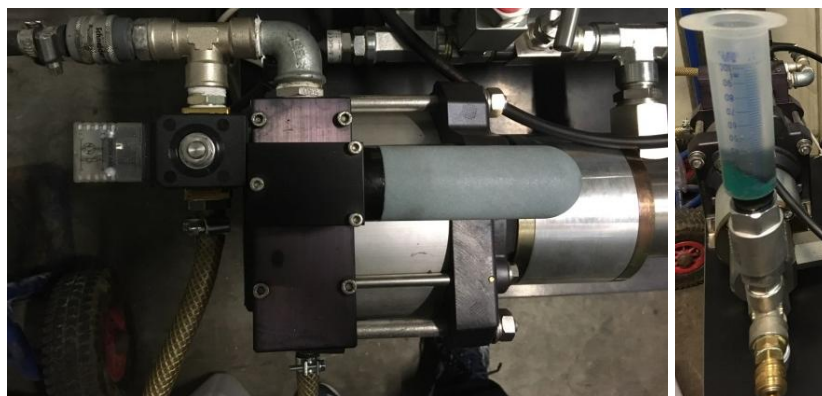
Pompa wysokociśnieniowa z napędem pneumatycznym działa na zasadzie przekładnika ciśnienia przedstawionego na rysunku 7.7.



Rys. 7.7. Schemat połączenia pompy wysokociśnieniowej: 1 – dolna zaślepka zaworu pilotowego. 2 – przylącze wlotowe (S), 3 – tłok wysokiego ciśnienia, 4 – przylącze wylotowe (P), 5 – przylącze powietrza sterującego (X), 6 – króciec powietrza wylotowego, 7 – wlot powietrza napędowego (PL), 8 – suwakowy zawór sterujący, 9 – tłok powietrza, 10 – górna zaślepka zaworu pilotowego (źródło: instrukcja montażu i obsługi)

Duża powierzchnia tłoka powietrza (9) jest zasilana niskim ciśnieniem, następnie oddziałuje wysokim ciśnieniem na mały obszar tłoka wysokiego ciśnienia (3). Tłok pompy wysokociśnieniowej wykonuje ruchy oscylacyjne aż do osiągnięcia ciśnienia postojowego. Tłok wysokiego ciśnienia tłoczy i spręża tłoczoną ciecz za pomocą zaworów zwrotnych w przyłączy wlotowym (S) i wylotowym (P). Ciśnienie wylotowe wynika z ustawionego ciśnienia napędowego i przepływu objętościowego. Ciągłe tłoczenie zapewniają sterowane wewnętrznie zawory rozdzielające i suwakowy zawór sterujący (8). Suwakowy zawór sterujący naprzemiennie kieruje płyn napędowy w obie strony tłoka powietrza. Suwakowy zawór sterujący jest sterowany przez dwa zawory rozdzielające, tak zwane zawory pilotowe (1, 10), które są uruchamiane mechanicznie przez tłok powietrza w jego położeniach końcowych. Zawory pilotowe zwiększają ciśnienie lub opróżniają komorę uruchamiającą suwakowy zawór sterujący. Po osiągnięciu ciśnienia postojowego następuje równowaga sił po stronie napędu i po stronie wysokiego ciśnienia. Pompa wysokociśnieniowa zatrzymuje się i nie zużywa już płynu napędowego. Spadek ciśnienia po stronie wysokiego ciśnienia lub wzrost ciśnienia po stronie napędu prowadzi do samoczynnego, ponownego uruchomienia pompy wysokociśnieniowej i sprężania tłoczonego płynu, aż do przywrócenia równowagi sił.

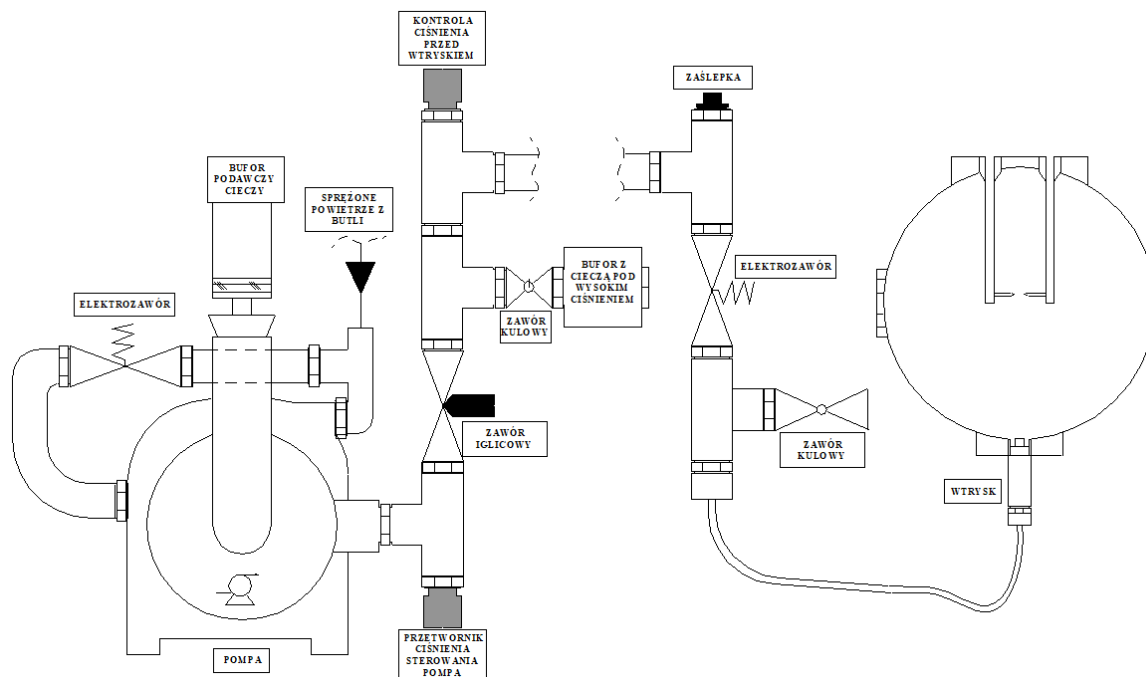
Do odpowiedniego funkcjonowania pompy i jej wykorzystania zgodnie z założeniem pompę uzbrojono w niezbędną armaturę przyłączeniowo-sterującą oraz w gardziel pompy, do której zamontowano bufor podawczy próbki cieczy badanej (rys. 7.8).



Rys. 7.8. Pompa wysokociśnieniowa z zamontowanym lejkiem na ciecz (fot. A. Toman)

Podczas pierwszych prób przy wykorzystaniu sprężonego powietrza sieciowego pompa wykazała się niestabilną pracą i skokami ciśnienia sprężanej cieczy. Układ zewnętrznego zasilania sprężonego powietrza został więc zastąpiony sprężonym powietrzem z butli przez reduktor ciśnienia. Układ zasilania pompy poprzedzono buforem pośrednim z dodatkowym reduktorem niższego ciśnienia, zapewniając w ten sposób stabilną pracę pompy. Po tych

zmianach w układzie zgodnym z poniższym rysunkiem 7.9 przeprowadzono badania wstępne wybranych wtrysków rozpylających ciecz (izopropanol) w komorze badawczej.



Rys. 7.9. Schemat układu pompowego (oprac. własne)

Ciśnienie pompy jest kontrolowane za pomocą dwóch przetworników ciśnienia Wika A-10 o zakresie pomiarowym 0–600 bar, zasilanym w zakresie 10–30 V. Jeden z nich jest odpowiedzialny za pracę pompy i sterowany za pomocą regulatora Lumel RE-72. Drugi, jako kontrola ciśnienia przed wtryskiem, podaje sygnał do systemu akwizycji danych. Elektrozawór T250, odpowiedzialny za podanie cieczy do wtrysku, jest sterowany przez przekaźnik ETM-442.

7.2.2. Wytwarzanie aerozolu

Najtrudniejszym wyzwaniem podczas budowy aparatury badawczej był wybór wtryskiwacza. Istotnym problemem okazało się znalezienie odpowiedniego wtryskiwacza, który zapewniłby jednorodne rozproszenie cieczy w określonej objętości. Należało dobrać wtryskiwacz w taki sposób, aby kształt, kierunek strumienia oraz jego zasięg najbardziej odpowiadały geometrycznemu kształtowi komory. Geometria badanej objętości ogranicza kształt chmury aerozolu. Niezwykle ważne było uniknięcie zbyt intensywnego osadzania się kropeł na ściankach naczynia, przy jednoczesnym równomiernym wypełnieniu aerozolem całej objętości kuli badawczej. Po przetestowaniu wielu typów wtryskiwaczy wybrano sześciootworowy wtryskiwacz elektromagnetyczny Bosch HDEV (rys. 7.10).



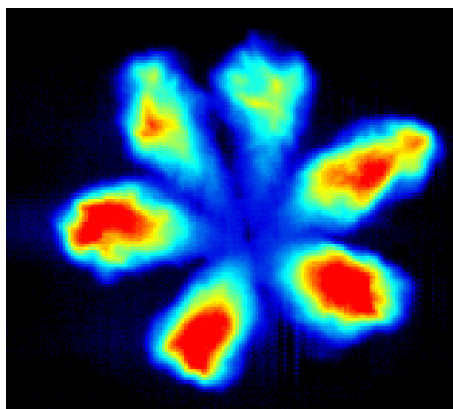
Rys. 7.10. Wtryskiwacz BOSCH HDEV 0 261 500 109 (fot. A. Toman)

Wtryskiwacz ten w największym stopniu spełniał wymagania techniczne i założenia projektowe, a przykładowy efekt rozpylania aerozolu nafty w przezroczystej 5-litrowej sferze, sfilmowany szybką kamerą, przedstawiono na rysunku 7.11.



Rys. 7.11. Przezroczysta komora sferyczna i rozproszony aerosol nafty o koncentracji 336 g/m^3 (fot. A. Toman)

Wyniki badań Skowrona i Pielechy (2015) również potwierdzają oczekiwany efekt z użyciem wtryskiwacza Bosch HDEV (rys. 7.12).



Rys. 7.12. Rozpylenie paliwa z wielootworowego wtryskiwacza elektromagnetycznego Bosch HDEV (widok od frontu) po czasie $t = 0,6 \text{ ms}$, $P_{\text{wtr}} = 20 \text{ MPa}$, $t_{\text{wtr}} = 0,3 \text{ ms}$, $P_{\text{pow}} = 1,5 \text{ MPa}$ [Skowron i Pielecha, 2015]

Wtryskiwacz tego typu działa pod wysokim ciśnieniem (100–200 bar), co pozwala na uzyskanie drobnej mgiełki aerozolowej. Umożliwia on wytwarzanie kropelek aerozolu w zakresie $10\text{--}50 \text{ }\mu\text{m}$. Charakteryzuje się również szerokim kątem rozpylania 110° , co zapewnia odpowiednie rozprowadzenie aerozolu w komorze badawczej.

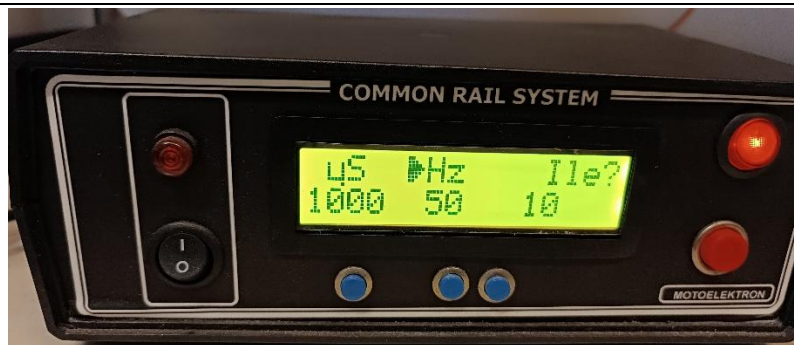
Tabela 7.1. Dane techniczne wtryskiwacza BOSCH HDEV 0 261 500 109

Wydajność dla przepływu przy ciśnieniu 100 bar	Do 1500 cm ³ /min
Liczba otworów	6
Całkowity kąt rozpylania	110°
Kąt rozwarcia pojedynczej strugi	8–20°
Tolerancja dla przepływu statycznego	+/- 5%
Tolerancja dla przepływu dynamicznego	+/- 6% dla 1,5 ms
Dawkowanie przy ciśnieniu 100 bar	308–1026 g/min
Maksymalne ciśnienie pracy	200 bar
Zasilanie boostera	65–90 V
Prąd boostera	13,2 A
Czas boostera	500 μs
Zasilanie	12 V
Prąd podniesienia iglicy	9,6 A
Czas podniesienia iglicy	800 μs
Rezystancja cewki	1500 mΩ
Napięcie podtrzymania otwarcia	12 V
Prąd podtrzymania otwarcia	3 A

Źródło: [Skowron i Pielecha, 2015]

Wbudowany mechanizm elektromagnetyczny umożliwia precyzyjne dozowanie aerozolu. Jedną z najważniejszych cech wybranego wtryskiwacza jest bardzo krótki czas otwarcia i zamknięcia, co zapewnia dokładne dawkowanie aerozolu, nawet przy krótkich impulsach.

Za sterowanie i kontrolę pracy wtryskiem odpowiedzialny jest precyzyjny układ sterowania Motoelektron CR1 (rys. 7.13).



Rys. 7.13. Układ sterowania wtryskiem Motoelektron CR1 (fot. A Toman)

Układ ten ma za zadanie dokładne dawkowanie cieczy według ustawionych wartości. Charakterystyka układu sterowania wtryskiem jest następująca:

- regulowany czas impulsu wtrysku 100–10000 μ ,
- regulowana częstotliwość impulsów 1–50 Hz (rozdzielczość 1 Hz),
- wybór ilości generowanych impulsów od 1 do 60000,
- generowanie pojedynczego impulsu o regulowanym czasie 0,1–2 s (rozdzielczość 0,1 s) i regulowanym natężeniu prądu podtrzymania 5–95%.

Przy tej metodzie wytwarzania aerozolu wzrost ciśnienia w przestrzeni badawczej powodowany jest wyłącznie objętością wprowadzonego tam aerozolu.

7.3. Źródło zapłonu

Jako źródło zapłonu w aparaturach badawczych używany jest układ zapłonowy z indukcyjnością lub bez, tak zwaną iskrą pojemnościową. Takie rozwiązanie jest wymagane między innymi w normach PN-EN 13821, ASTM E2019-03 i PN-EN ISO/IEC 80079, z uwzględnieniem różnych scenariuszy. O ile w układzie zapłonowym występuje zarówno pojemność (kondensator i inne elementy), jak i indukcyjność (cewka), to charakter iskry elektrycznej (pojemnościowy lub indukcyjny) ma istotny wpływ na zapłon badanego medium. Różnice te szczególnie ujawniają się w zakresie mocy i energii iskry podczas poszczególnych faz wyładowania elektrycznego. Czasy trwania tych faz i ilość wyzwalanej energii mogą być różne w zależności od budowy układu zapłonowego [Sulaiman i in., 2013]. Rodzaj układu zapłonowego decyduje też o dominującej fazie rozładowania, ponieważ w fazach rozpadu i łuku następuje rozładowanie energii zmagazynowanej w pojemności, a faza żarzenia zasilana jest z energii zmagazynowanej w indukcyjności. Randeberg i in. (2006) podali, że przy badaniu pyłów dla niskiej energii zapłonu większość metod wytwarzania iskiei zawodzi jeśli nie są spełnione podane niżej warunki:

- musi być dostępna precyzyjna synchronizacja między rozproszeniem pyłu i pojawieniem się iskry,
- straty energii muszą być nieznaczne lub uwzględniane przy obliczaniu energii iskry,
- wytwarzane iskry powinny być jak najbardziej podobne do czysto pojemnościowych wyładowań elektrostatycznych.

Kierując się powyższymi wskazówkami, w badaniach zastosowano generator iskiei indukcyjnych i pojemnościowych. Iskrowe źródło zapłonu dla każdego generatora było zamontowane w geometrycznym środku kuli z elektrodami ze stali nierdzewnej o średnicy 2 mm, z zastrzonymi końcówkami. Odstęp między elektrodami ustalono na 3,3 mm, jako optymalny, przyjęty na podstawie literatury i doświadczeń innych eksperymentatorów [Danis i in., 1985, Bane i in., 2013]. Do oznaczenia charakterystyki wybuchowości i dolnej granicy wybuchowości zastosowano generator iskiei z indukcyjnością. Do oznaczenia minimalnej energii zapłonu (MIE) aerozolu użyto regulowanego generatora z indukcyjnością, a dla dalszych testów zbudowano cztery pojemnościowe źródła zapłonu, osobno dla każdej energii 1, 3, 10 i 30 mJ bez indukcyjności.

7.3.1. Generator iskier indukcyjnych

Główne elementy generatora iskier indukcyjnych to: cewka indukcyjna, kondensator oraz układ sterowania. Cewka odpowiada za wytwarzanie impulsu elektrycznego zmagazynowanego w kondensatorze. Układ sterowania kontroluje proces ładowania i rozładowania kondensatora, utrzymując stale te same warunki podczas badania. Do badań wykorzystano dwa generatory: jeden o stałej określonej energii wynoszącej 7 J (rys. 7.14), oraz generator indukcyjny o regulowanej energii.



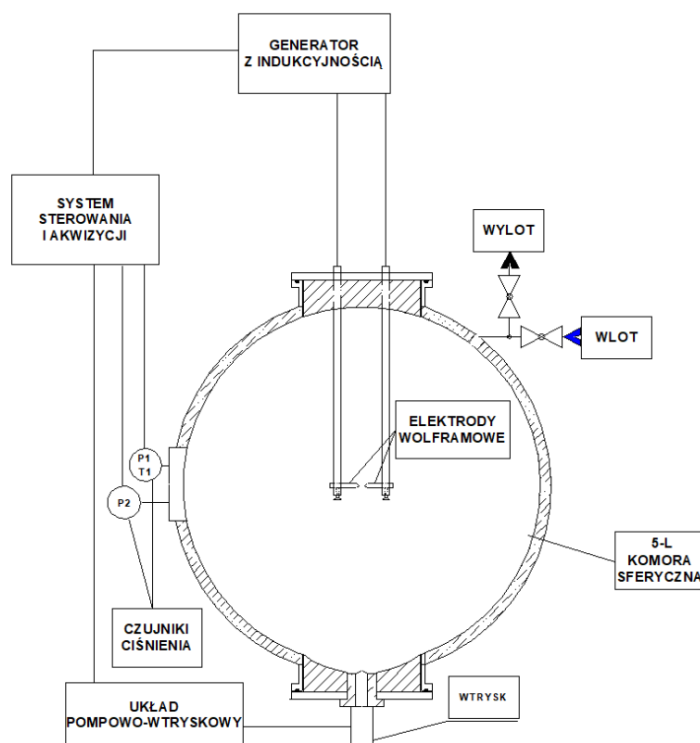
Rys. 7.14. Generator iskier indukcyjnych o energii 7 J (fot. A. Toman)

Uruchomienie generatora rozpoczyna proces magazynowania energii w kondensatorze. Po procesie ładowania i sygnale z układu sterowania do wyzwolenia energii, następuje rozładowanie. Układ pozwala na skierowanie zmagazynowanej energii do cewki indukcyjnej, która rozładowuje napięcie między elektrodami. Moment rozładowania energii powoduje szybkie wyładowanie w postaci iskry indukcyjnej (rys. 7.15).



Rys. 7.15. Wyładowanie iskrowe pomiędzy elektrodami z generatora indukcyjnego (fot. A. Toman)

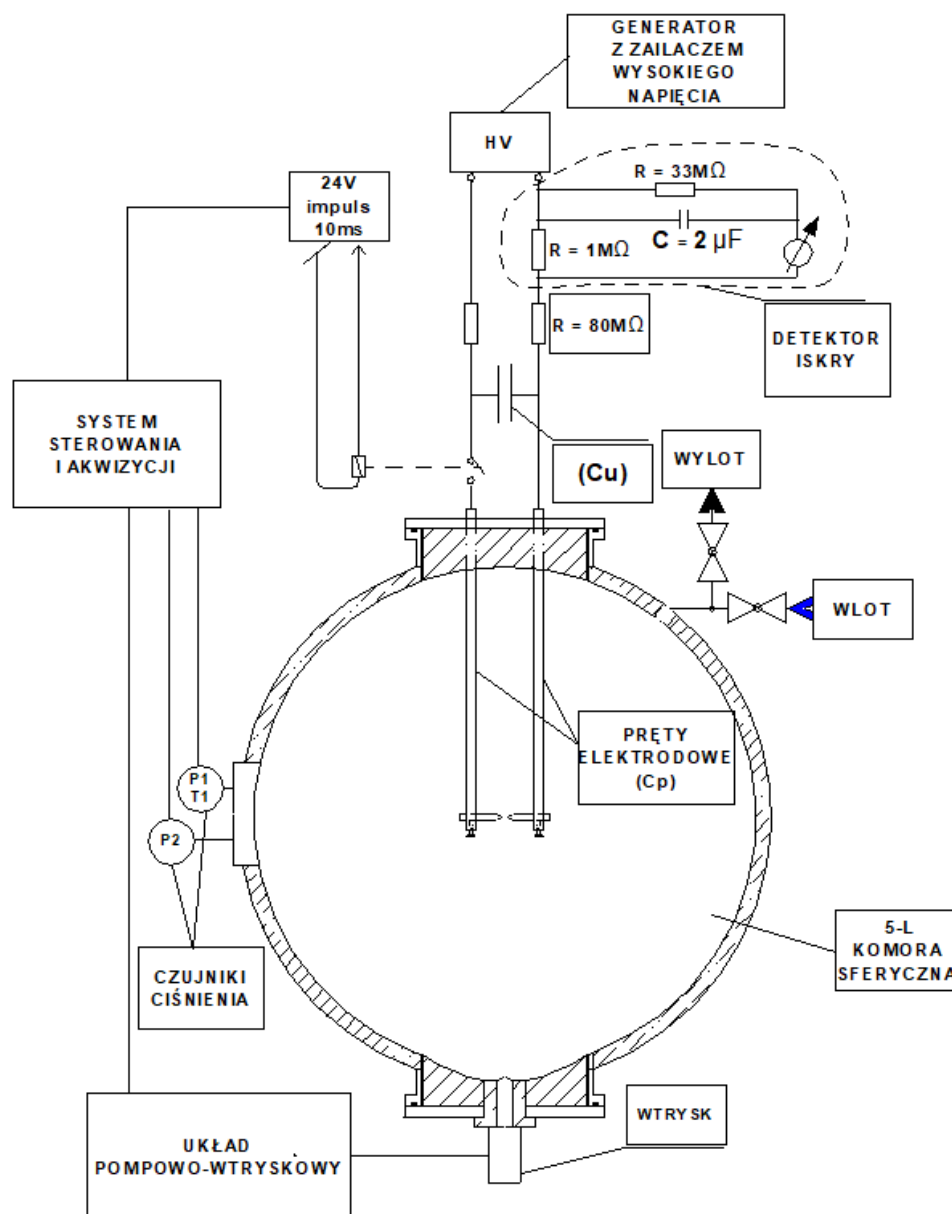
Tego typu generatory, ze względu na swoją konstrukcję, wytwarzają iskrę o dłuższym czasie trwania niż generatory iskier pojemnościowych. W zastosowanym generatorze o regulowanej energii możliwe jest dostosowanie napięcia ładowania kondensatora lub zmiana pojemności samego kondensatora. Umożliwia to płynną regulację energii iskry. Schemat stanowiska badawczego z indukcyjnym źródłem zapłonu przedstawiono na rysunku 7.16.



Rys. 7.16. Szkic stanowiska badawczego z indukcyjnym źródłem zapłonu [Toman i Adamus, 2024]

7.3.2. Generator isker pojemnościowych

Zbudowany układ, odpowiedzialny za wyładowanie iskrowe pojemnościowe montowano bezpośrednio do prętów elektrod (rys. 7.17).



Rys. 7.17. Szkic stanowiska badawczego z pojemnościowym źródłem zapłonu [Toman i Adamus, 2024]

Miało to na celu jak największą redukcję pojemności pasożytniczej, szczególnie istotnej dla energii poniżej 30 mJ. Za sterowanie układem odpowiedzialny był generator z zasilaczem wysokiego napięcia do 11 kV, który umożliwia dokładne ustawienie energii z tolerancją $\pm 5\%$, umieszczony obok stanowiska badawczego (rys. 7.18).



Rys. 7.18. Generator iskier pojemnościowych (fot. A. Toman)

Wartość energii iskry obliczano według wzoru (7.1):

$$W = \frac{1}{2} CU^2 \quad (7.1)$$

gdzie:

W – zmagazynowana energia [J],

C – pojemność kondensatora [pF],

U – napięcie naładowanego kondensatora w woltach [V].

Zastosowanie wzoru 7.1 wynika z faktu, że energia zgromadzona w kondensatorze jest obliczana jako połowa iloczynu pojemności kondensatora (C) i kwadratu napięcia (U).

W każdej konfiguracji układu uwzględniano pojemność pasożytniczą i jej wpływ na energię iskry. Szczególnie istotny wpływ na tę pojemność miały pręty elektrodowe i przyłącza. Przy każdej zmianie głowicy zapłonowej mierzono pojemność pasożytniczą w celu dostosowania napięcia zasilania (HV). Efektywna pojemność kondensatora (C) dla niskiej energii jest tylko nieznacznie większa, więc pominięcie pojemności pasożytniczej może prowadzić do znacznego błędu w wyniku. Korekty napięcia dokonywano według wzorów (7.2 i 7.3):

$$Up = \frac{\sqrt{2W}}{Cu + Cp} \quad (7.2)$$

$$Uu = \frac{Up * (Cu + Cp)}{Cu} \quad (7.3)$$

gdzie:

Uu – napięcie ładowania kondensatora Cu [V],

Up – napięcie rozładowania (napięcie przeskoku iskry) [V],

Cu – pojemność robocza [F],

Cp – pojemność pasożytnicza [F],

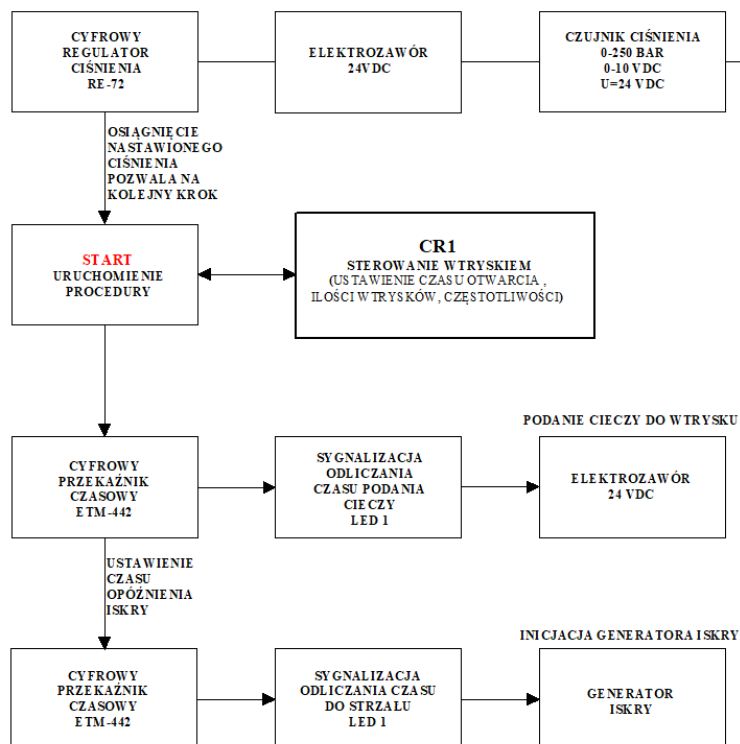
W – energia wyładowania iskrowego [J].

Przeprowadzono szereg prób w celu określenia energii resztkowej po przeskoku iskry. Wyniki tych prób wykazały, że dla najbardziej niekorzystnego przypadku błąd wyniósł 3 % całkowitej energii iskry, dlatego został on pominięty. W celu kontroli wyzwolenia iskry w układzie dodatkowo zastosowano system detekcji przeskoku iskry. W badaniach jest to istotne dla potwierdzenia zapłonu lub braku zapłonu mieszaniny, ponieważ ewentualny brak iskry może sugerować brak zapłonu mieszaniny.

7.4. Układ sterowania i kontroli

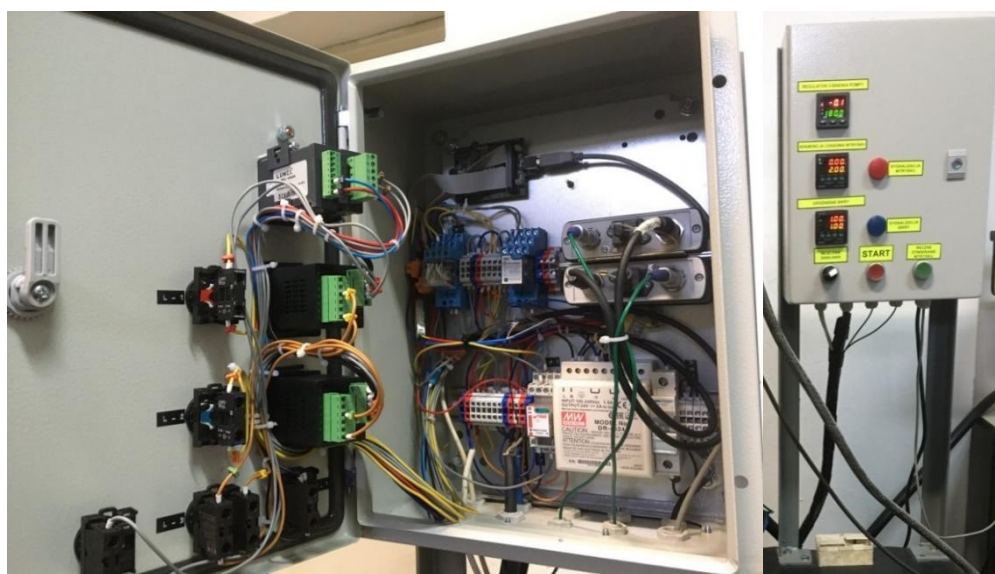
Zadaniem układu, według założeń, ma być sterowanie układem pompowo wtryskowym, generatorem iskieł oraz akwizycją danych. Układ ten ma być odpowiedzialny za stabilizację ciśnienia w układzie pompowym, kontrolę ciśnienia przed wtryskiem, kontrolę temperatury przestrzeni wewnętrznej komory badawczej oraz sekwencji czasu trwania wtrysku i opóźnienia źródła zapłonu. Schemat blokowy układu sterowania przedstawiono na rysunku 7.19. Dokładny opis i instrukcję użytkowania zamieszczono w procedurze badawczej.

**SCHEMAT
BŁOKOWY UKŁADU
STEROWANIA**



Rys. 7.19. Schemat blokowy układu sterowania (oprac. własne)

Układ sterowania umieszczono w metalowej obudowie, którą przymocowano do wcześniej przygotowanego stelażu przytwierdzonego do stołu stanowiska. W obudowie umieszczono: regulator Lumel RE-72, dwa cyfrowe przekaźniki czasowe ETM-442, zasilacz 24 VDC, styczniki, dwa piezorezystywne wzmacniacze czujników ciśnienia Kistler typu 4624 (rys. 7.20).



Rys. 7.20. Układ sterowania (fot. A. Toman)

Sterowanie wtryskiem Motoelektron CR1, generator iskier oraz system akwizycji Dewesoft, ulokowano obok stanowiska. Elementy te były sprzężone z układem sterowania, przez połączenia kablowe.

Zasadnicze elementy stanowiska do badania zapalności i wybuchowości aerozoli wraz z przepływem mediów i sygnałów przedstawiono w rozdziale 9.1 dotyczącym procedury badawczej (rys. 9.2).

7.5. System pomiarowy

System toru pomiarowego składał się z dwóch czujników ciśnienia, wzmacniaczy, systemu pomiaru temperatury oraz układu akwizycji danych. Do zbierania danych wykorzystano system akwizycji SIRIUS HS (rys. 7.21), który posiada pięć kanałów STG. Specyfikację techniczną przedstawiono w tabeli 7.3. Każdy z tych kanałów umożliwia pomiar:

- napięcia,
- pełnego, pół oraz ćwierć mostka,
- ciśnienia z czujników piezoelektrycznych typów IEPE/ICP,
- rezystancji,
- temperatury (od PT 100 do PT 2000 oraz termopary),
- ciśnienia z czujników ładunkowych,
- innych parametrów, z maksymalną prędkością próbkowania wynoszącą 1 MHz na każdy kanał.

Tabela 7.2. Dane techniczne kanałów STG urządzenia pomiarowego Sirius HS

Analogowe wejście na moduł	1
Analogowe wejście	16 bit (równoległe)
Maksymalna częstotliwość próbkowania na 1 kanał	1 MHz
Pasmo przenoszenia	1 MHz
Zakresy pomiarowe napięcia	± 50 ; 20; 10; 5; 2; 1; 0,4; 0,2; 0,1; 0,04 i 0,02 V
Dokładność pomiaru napięcia	$\pm 0,05\%$ odczytu $\pm 0,015\%$ zakresu $\pm 10 \mu\text{V}$

Źródło: SIRIUS Technical Reference Manual



Rys. 7.21. System akwizycji Sirius HS; wejścia pomiarowe
(fot. A. Toman)

Do pomiaru ciśnienia w komorze sferycznej zainstalowano dwa piezorezystancyjne czujniki ciśnienia firmy Kistler typu 4011A20DSH. Membrana pomiarowa czujnika znajdowała się równo z wewnętrzną ścianką komory badawczej. Jest to uniwersalny czujnik ciśnienia absolutnego do stosowania w pomiarach precyzyjnych. Konstrukcja czujnika jest oparta na krzemowym przetworniku obciążeniowym połączonym w mostek Wheatstone'a, na który wpływa stalowa membrana. Czujnik działa na zasadzie przekształcania ciśnienia na sygnał elektryczny przez zmiany oporności w mostku Wheatstone'a. Element pomiarowy jest oddzielony od mierzonego medium przez olej, co zwiększa odporność na różne substancje i zapewnia trwałość czujnika. Zastosowano również cyfrową kompensację temperatury, pozwalającą na minimalizację błędów związanych z wahaniami temperatury. Dzięki temu możliwe jest utrzymywanie stabilności pomiarów w zmieniających się warunkach termicznych. Czujnik współpracuje między innymi z technologią PiezoSmart firmy Kistler, umożliwiającą łatwą integrację ze wzmacniaczem. Upraszcza to konfigurację i zmniejsza zapotrzebowanie na dodatkowe urządzenia pomiarowe. Zastosowanie dwóch całkowicie niezależnych kanałów pomiarowych zapewnia dobre zabezpieczenie przed błędnymi pomiarami.

Czujnik ten charakteryzuje się parametrami technicznymi przedstawionymi w tabeli 7.4, a jego zdjęcie i rysunek techniczny przedstawiono na rysunkach odpowiednio 7.22 i 7.23.

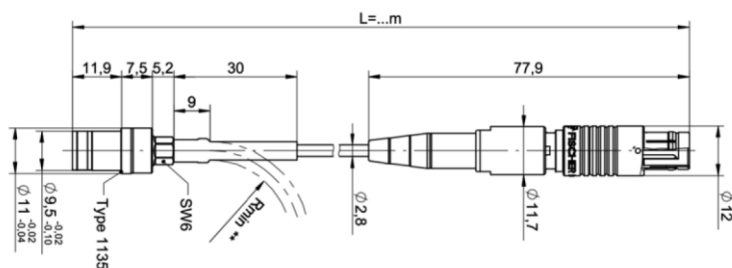
Tabela 7.3. Dane techniczne czujników ciśnienia Kistler typu 4011A20

Typ czujnika	4011A020DSH
Zakres pomiarowy ciśnienia, bar	0...20
Temperatura odniesienia, °C	15
Czujnik temperatury, min./maks.	–40/180
Maksymalne odchylenie ciśnienia, %FSO	< ±0,5
Liniowość w (Temp. odniesienia), %FSO	<±0,1
Czułość, mbar/g	
Promieniowa	< 0,4
osiowa	< 0,2
Maksymalne ciśnienie przeciążenia, bar	50
Zasilanie, VDC	Ze wzmacniacza
Częstotliwość, kHz	> 60
Cyfrowa kompensacja temperaturowa, °C	od 15 do 180

Źródło: Kistler – dane techniczne



Rys. 7.22. Czujnik ciśnienia firmy Kistler 4011A020DSH, zamontowany w adapterze (fot. A. Toman)



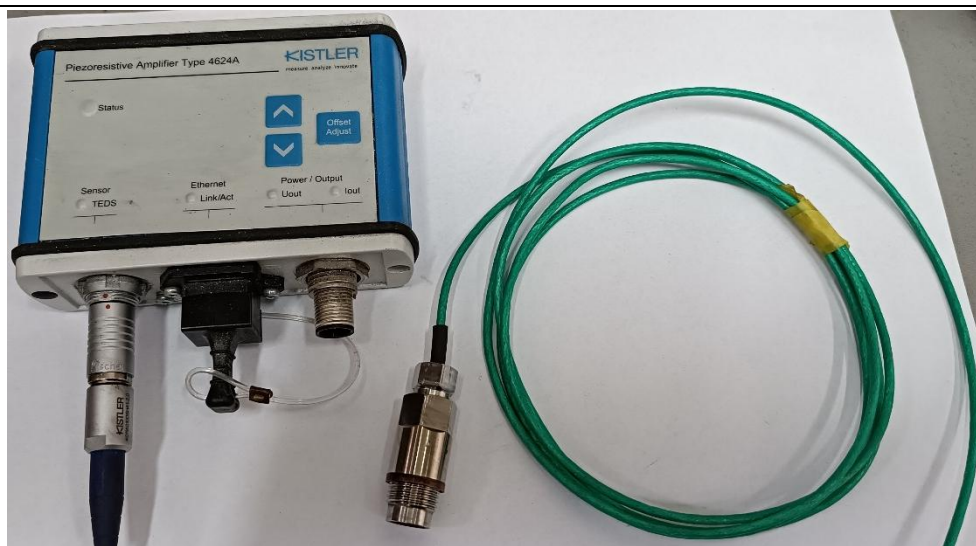
Rys. 7.23. Schemat czujnika ciśnienia firmy Kistler 4011A020DSH (źródło: Kistler data sheet)

Sposób i miejsce montażu czujnika ciśnienia w komorze badawczej przedstawiono na rysunku 7.24.



Rys. 7.24. Umieszczenie czujnika ciśnienia w komorze badawczej (fot. A. Toman)

Czujnik ciśnienia współpracuje ze wzmacniaczem firmy Kistler 4624A (rys. 7.25).



Rys. 7.25. Piezorezystancyjny wzmacniacz Kistler 4624A z podłączonym czujnikiem ciśnienia (fot. A. Toman)

Używany piezorezystancyjny wzmacniacz jednokanałowy jest wyposażony w identyfikację czujnika Kistler PiezoSmart. Wzmacniacz jest przystosowany do stosowania z cyfrowo kompensowanymi czujnikami. Wartości charakterystyczne czujnika są automatycznie odczytywane przez elektroniczną kartę danych czujnika (TEDS), dzięki czemu tor pomiarowy jest gotowy do rozpoczęcia pomiaru w bardzo krótkim czasie. Zapewnia to maksymalną niezawodność i jednocześnie dużą elastyczność.

Tabela 7.4. Dane techniczne wzmacniacza czujnik ciśnienia Kistler typu 4624A

Typ wzmacniacza	4624A
Zasilanie, VDC	10...30
Pobór prądu, mA	< 400
Zasilanie czujnika (zintegrowane), mA	1,00
Wyjściowe sygnały analogowe	
Napięcie wyjściowe (ciśnieniowe), V	0...5 ±0,025 0...10 ±0,05
Wzmocnienie zdefiniowane przez użytkownika, % FS	±25
Błąd punktu zerowego, V	< ±0,05
Zakres częstotliwości (−3 dB), kHz	0...> 40

Źródło: Kistler – dane techniczne

Pomiar temperatury odbywał się za pomocą wewnętrznego sensora temperatury czujnika ciśnienia Kistler 4011A i termopary (rys. 7.26). Mierzono wewnętrzną temperaturę komory oraz ciecz chłodzącą układ.



Rys. 7.26. Termopara typu K (fot. A. Toman)

8. Weryfikacja metody badawczej

Prawidłowe oznaczanie parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych wymaga zastosowania odpowiednio zaprojektowanej i zbudowanej aparatury badawczej wraz z dedykowaną do niej procedurą badawczą. Zasadniczym etapem przed rozpoczęciem docelowych badań jest weryfikacja opracowanej metody badawczej oraz potwierdzenie wiarygodności uzyskiwanych wyników. Wymagało to przeprowadzenia szeregu testów sprawdzających, mających na celu ocenę wszystkich istotnych aspektów działania aparatury oraz weryfikacji zastosowanej procedury badawczej. Na etapie przygotowawczym w pierwszej kolejności zweryfikowano właściwości fizykochemiczne wybranych cieczy, zwracając szczególną uwagę na te parametry, które mogą mieć istotny wpływ na proces rozpylania aerozolu. Kolejnym krokiem było sprawdzenie poprawności działania układu pompowo-wtryskowego, obejmujące test powtarzalności sekwencji czasowej oraz wizualną ocenę jakości wytwarzanego aerozolu przez wtrysk. Pozytywna ocena tej analizy umożliwiła przeprowadzenie testu wydajnościowego wtrysku, istotnego do określenia stężenia aerozolu podczas badań. Następnie dokonano analizy wielkości cząstek rozpylanego aerozolu badanej cieczy, co ma istotny wpływ dla procesów spalania i wybuchowości oraz pozwala na ewentualne porównanie wyników z innymi badaniami. Po weryfikacji poprawności działania układu pompowo-wtryskowego przeprowadzono test sekwencji czasowej źródła zapłonu w celu synchronizacji z rozpylanym aerozolem. Ostateczna seria testów miała na celu potwierdzenie synchronizacji układów i niezawodności aparatury. Przeprowadzona weryfikacja metody stanowi fundament dla dalszych badań nad zapalnością i wybuchowością aerozoli cieczy palnych. Uzyskane wyniki pozwoliły na wyeliminowanie potencjalnych błędów pomiarowych co potwierdza rzetelność i powtarzalność uzyskanych wyników.

8.1. Właściwości fizykochemiczne wybranych cieczy

W badaniach wstępnych wykorzystywano naftę i izopropanol, następnie, ze względu na dość powszechne zastosowanie w przemyśle, również etanol 99% i diethyl ether 99,5%. Wytwarzanie kropelek aerozolu zależy nie tylko od zastosowanego systemu, ale także od właściwości cieczy. Czynniki takie, jak: gęstość, napięcie powierzchniowe i lepkość wpływają na proces wytwarzania aerozolu. W badaniach aerozoli istotna jest również temperatura wrzenia, ponieważ dostarcza informacji o szybkości parowania w temperaturze pokojowej. Tabela 8.1 przedstawia podstawowe właściwości czterech badanych cieczy.

Tabela 8.1. Właściwości fizykochemiczne badanych cieczy

Parametr	Nafta świetlna Dragon	Izopropanol	Etanol 99%	Diethyl Ether 99,5%
Gęstość (g/cm ³)	0,84	0,78	0,801	0,714
Lepkość (mm ² /s)	< 3 w +40°C	2,43 (ASTM D-4052)	1,36 w +20°C	0,31 w +20°C
Napięcie powierzchniowe (kg*s ²)	0,027	0,022	0,022	0,017
Granice palności (% obj.)	0,5–6,5	2–12	3.3–19	1.7–39
Temperatura zapłonu (°C)	38	11,7	12	-45
Temperatura wrzenia (°C)	180	85,5	78	34,6
Prężność par (hPa) w 20°C	1–10	43	60	586

Źródło: oprac. własne

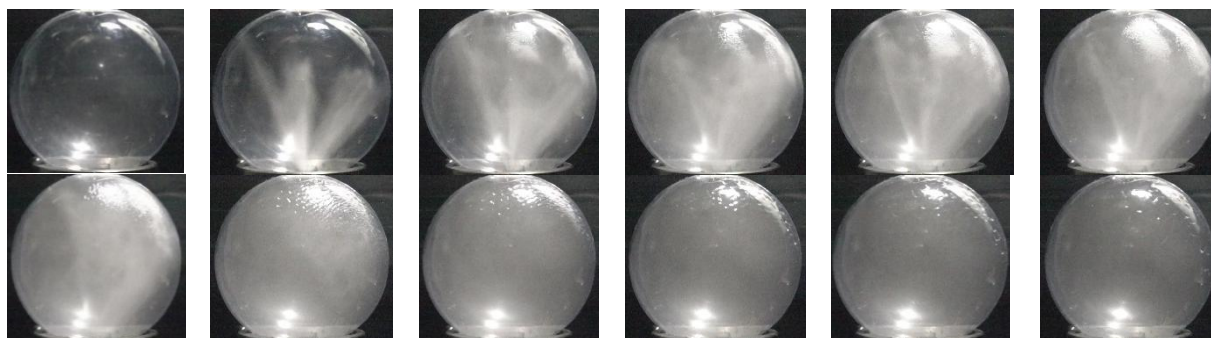
8.2. Sprawdzenie poprawności działania układu pompowo-wtryskowego

W celu oceny jakości wytworzonej chmury aerozolu i przetestowania działania układu pompowo-wtryskowego zastosowano przezroczystą kulę o objętości zbliżonej do komory badawczej. Transparentna kula została zamontowana w miejscu docelowej komory i umożliwiła wizualną kontrolę rozkładu chmury podczas atomizacji cieczy. Proces rejestrowano za pomocą szybkiej kamery Sony o częstotliwości nagrywania 1000 klatek na sekundę (fps). Poklatkowe uchwycenie dynamicznych zmian podczas rozpraszania aerozolu umożliwiło obserwację jakości dyspersji generowanej przez wtrysk, formowania się chmury aerozolu, turbulencji oraz określenie szacunkowej ilości osadzania się cieczy na ściankach naczynia.

Testy wizualne umożliwiły wykrycie potencjalnych niedoskonałości systemu wtryskowego oraz wprowadzenie odpowiednich korekt w jego ustawieniach. Przeanalizowano ponadto jakość wytworzonej chmury aerozolu dla różnych ciśnień cieczy w zakresie od 100 do 200 bar, co pozwoliło na wybór optymalnego zakresu ciśnień dla

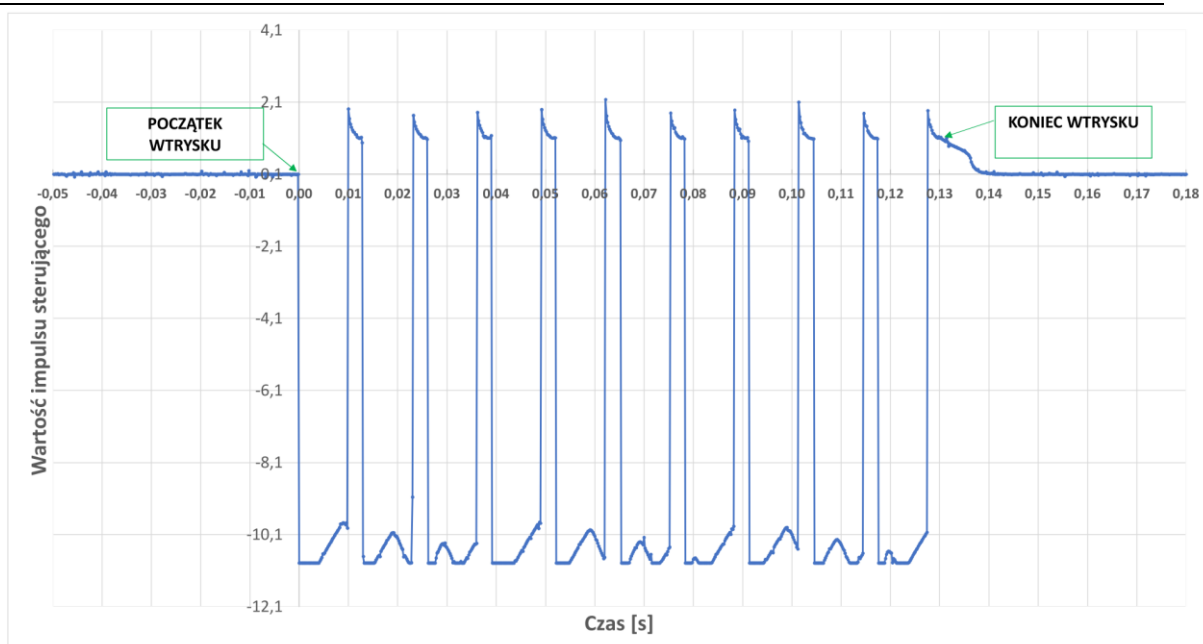
badanych cieczy. Testy te umożliwiły odniesienie się do rzeczywistych warunków panujących wewnątrz 5-litrowej komory badawczej.

Pierwotnym założeniem było zastosowanie pojedynczego wtrysku tak, jak zastosowali to inni eksperymenciści. Analiza wizualna nagrań z szybkiej kamery wtrysku pojedynczego w porównaniu z wtryskiem sekwencyjnym ujawniła jednak znaczące różnice między tymi dwoma podejściami. W przypadku pojedynczego wtrysku osadzanie się cieczy na ściankach było znacznie większe już od najmniejszych stężeń, w porównaniu do sekwencyjnego wtryskiwania aerozolu. Zilustrowany przebieg przykładowego procesu wytwarzania aerozolu nafty dla pojedynczego wtrysku i stężeniu 150 g/m^3 przedstawiono na rysunku 8.1.



Rys. 8.1. Wytwarzanie aerozolu w przezroczystej, sferycznej kuli o objętości około 5 dm^3 ; stężenie aerozolu 150 g/m^3 , pojedynczy wtrysk (oprac. własne)

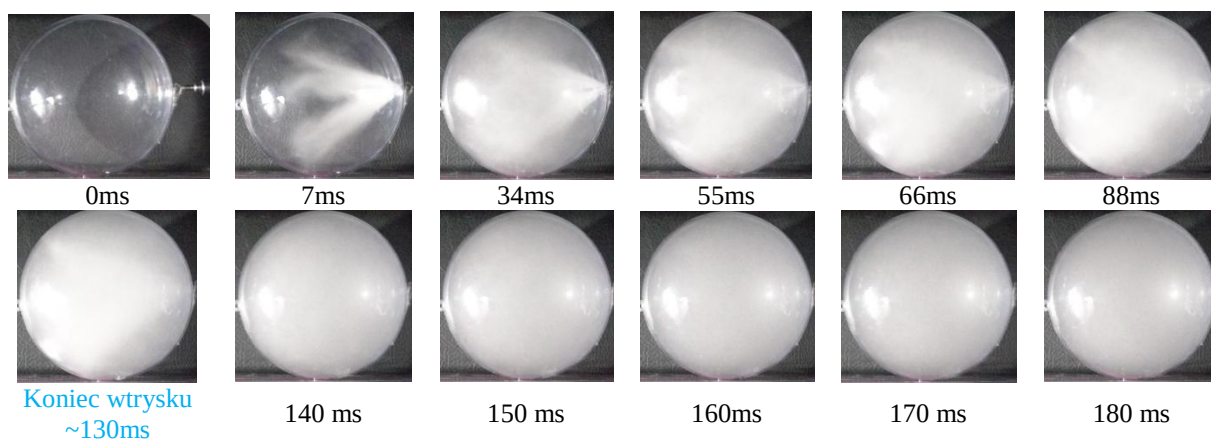
Ustawienie sekwencyjne z częstotliwością 50 Hz wykazało znacznie lepszą jakość wytwarzanego aerozolu oraz lepszą wydajność układu. Początkowo przyjęto 10 wtrysków, dla których sprawdzono możliwości badawcze dla różnych stężeń w tym ustawieniu. Czas trwania sekwencji 10 wtrysków wynosi około 130 ms . Umożliwia to wykonanie badań w szerokim zakresie stężeń aerozolu. Ilość rozpylonego aerozolu kontrolowano poprzez zmianę czasu pojedynczego impulsu wtrysku w przedziale od 1250 do $10\,000 \mu\text{s}$. Na rysunku 8.2 przedstawiono przykładowy czasowy przebieg sekwencji 10 impulsów dla najdłuższego czasu pojedynczego wtrysku, zarejestrowany za pomocą systemu akwizycji danych.



Rys. 8.2. Przykładowy przebieg czasowy sekwencji 10 wtrysków (oprac. własne)

Rysunek 8.2. przedstawia szczegółowy przebieg czasowy sekwencji 10 wtrysków, co umożliwia analizę dynamiki pracy układu pompowo-wtryskowego oraz ocenę stabilności układu sterowania. Dzięki dokładnej rejestracji czasowej było możliwe określenie powtarzalności impulsów wtrysku oraz ich wpływu na jakość rozproszenia cieczy.

Na rysunku 8.3 zilustrowano przebieg przykładowego procesu wytwarzania aerozolu dla próbki nafty. Wybrane klatki z filmu, rejestrowanego kamerą o częstotliwości 1000 fps, pokazują najbardziej interesujący przedział czasowy, w którym następuje maksymalna dyspersja aerozolu i stabilizacja parametrów chmury.



Rys. 8.3. Wytwarzanie aerozolu nafty w przezroczystej, sferycznej kuli o objętości około 5 dm³; stężenie aerozolu 336 g/m³, sekwencja 10 impulsów (oprac. własne)

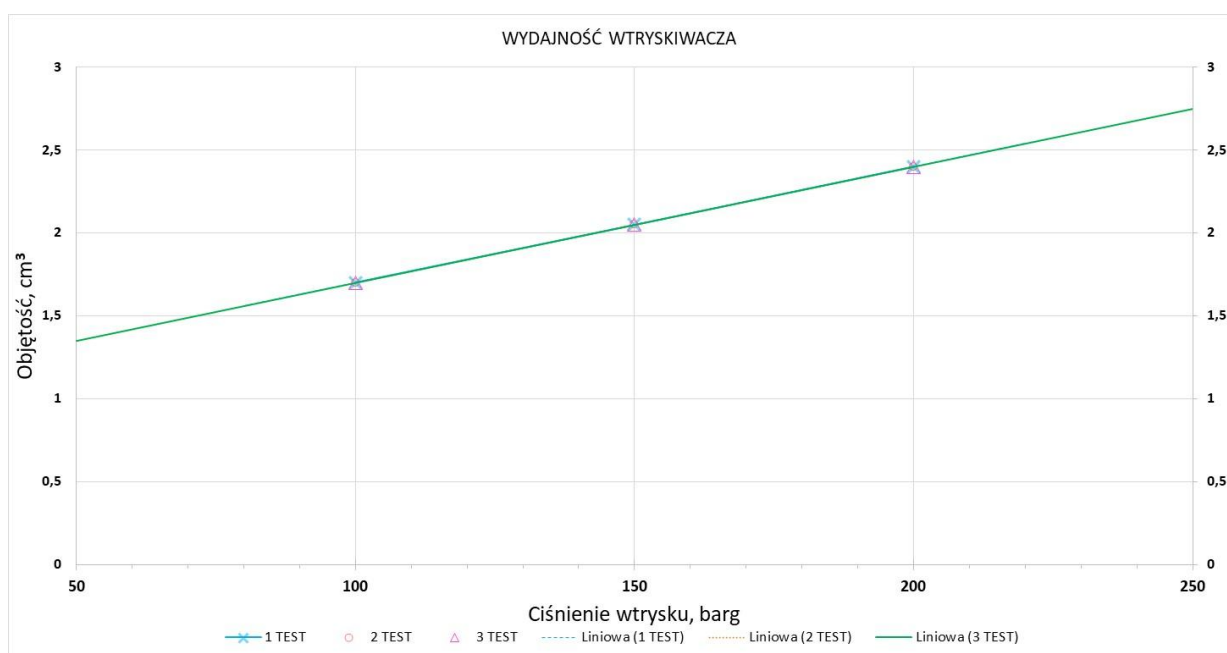
Analiza wizualna nagrań wideo umożliwiła oszacowanie czasu formowania się jednorodnej mieszaniny aerozolu z powietrzem. Stwierdzono, że w przypadku nafty chmura aerozolu stabilizowała się i równomiernie wypełniała całą objętość kuli testowej po około

20 ms od zakończenia wtrysku. Wynik ten został potwierdzony pomiarami wykonanymi za pomocą analizatora wielkości cząstek Spraytec, który pozwolił na określenie średniej średnicy Sautera (SMD) w różnych ustawieniach wtrysku.

Przeźroczysta kula pozwoliła także na wykonanie precyzyjnych pomiarów wielkości cząstek cieczy wytworzonego aerozolu i ich rozkładu w badanym zakresie. Narzędzie to wykorzystano również do synchronizacji czasowej źródła zapłonu, co pozwoliło na precyzyjne ustalenie momentu inicjacji wybuchu w odniesieniu do wygenerowanego aerozolu.

8.3. Test wydajnościowy wtrysku

Test wydajnościowy wtrysku polegał na określeniu ilości podawanej cieczy w różnych ustawieniach, co jest istotne dla dokładnego określenia stężenia podczas badania aerozoli. Kluczowymi parametrami wpływającymi na wydajność wtrysku to czas pojedynczego impulsu otwarcia i ciśnienie wtrysku. Testy przeprowadzono dla trzech różnych ciśnień wynoszących 100, 150 i 200 bar, a każdy pomiar powtórzono trzykrotnie, co potwierdziło bardzo dobrą powtarzalność wyników. Zakres badanych czasów otwarcia wtrysku wynosił od 1250 μ s do 10 000 μ s, z krokiem 250 μ s. Wyniki testów wskazują na liniową zależność między czasem otwarcia impulsu, a wydajnością wtrysku, przy czym wzrost ciśnienia powodował proporcjonalny wzrost ilości podawanej cieczy. Na rysunku 8.4 przedstawiono przykładowy wykres dla maksymalnego czasu otwarcia (10 000 μ s) z zaznaczoną linią trendu, która ułatwia interpretację danych oraz prognozowanie wydajności w innych konfiguracjach.



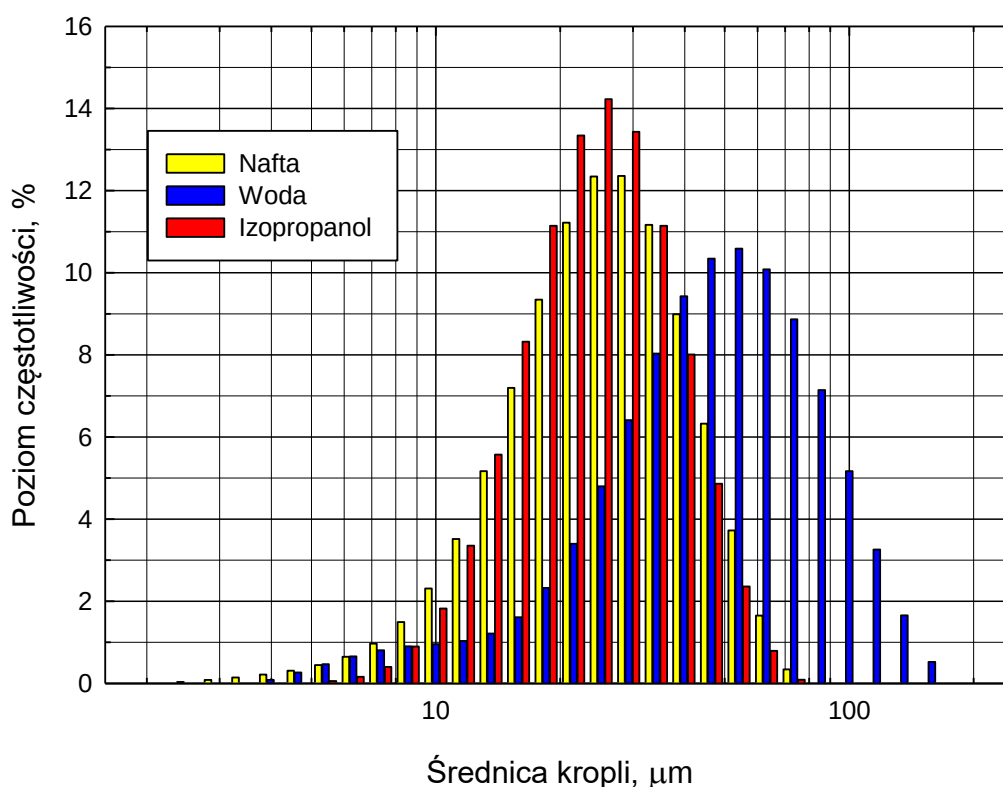
Rys. 8.4. Test wydajnościowy wtryskiwacza dla ciśnienia wtrysku 100, 150, 200 barg (oprac. własne)

W ramach testów wydajnościowych porównano dwie ciecze (naftę i izopropanol), mając na celu ocenę spójności wyników pomiarów objętościowych i uniwersalności metody. Mimo różnic w ich właściwościach fizykochemicznych, takich jak lepkość i napięcie powierzchniowe, wyniki objętościowe dla obu cieczy były identyczne. Testy wykazały, że wtrysk w danym ustawieniu wytwarza stałą objętość cieczy, co pozwala na precyzyjne obliczenie stężenia aerozolu na podstawie jej gęstości. Sekwencje o tej samej długości w identycznych warunkach rozpraszają tę samą objętość cieczy, niezależnie od jej rodzaju. Taka precyzja umożliwia kontrolę ilości cieczy rozproszonej w naczyniu zarówno w jednostkach objętości, jak i masy.

Dla każdej badanej cieczy stwierdzono zależność między nominalnym stężeniem aerozolu a parametrami wtrysku sekwencyjnego. Na podstawie tej zależności można stwierdzić, że ilość wtryskiwanego płynu może być kontrolowana przez czas impulsu wtrysku i liczbę generowanych impulsów. Ważnym czynnikiem zapewniającym spójność wyników jest stałość ciśnienia przed wtryskiem, które nie powinno przekraczać 150 barg. Wyższe ciśnienie prowadzi do większego osiadania aerozolu na ściankach komory, co może wpłynąć na dokładność wyników.

8.4. Pomiar wielkości cząstek aerozolu

W celu dokonania analizy rozkładu wielkości kropeł aerozoli wytwarzanych przez układ pompowo-wtryskowy, przeprowadzono badania za pomocą laserowego dyfrakcyjnego analizatora cząstek Malvern Panalytical Spraytec. Początkowo badania przeprowadzono w otwartej przestrzeni, aby wyeliminować wpływ geometrii komory badawczej na dyspersję cząstek. Testom poddano naftę, izopropanol oraz w celach porównawczych, wodę. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rysunku 8.5.



Rys. 8.5. Pomiar wielkości cząstek aerozoli; ciśnienie cieczy 150 barg [Toman i Adamus, 2023)

Wytworzone aerozole nafty i izopropanolu wykazywały bardzo podobne rozkłady wielkości kropeł. W przypadku wody zaobserwowano z kolei, że wytwarzane krople były znacznie większe, mimo jej wyższej gęstości w porównaniu do badanych cieczy łatwopalnych. Różnice te pokazują, że decydujący wpływ na wielkość kropeł mogą mieć inne właściwości fizykochemiczne, takie jak napięcie powierzchniowe i/lub lepkość. Parametry jednowartościowe opisujące rozkłady wielkości kropeł (rys. 8.5) przedstawiono w tabeli 8.2

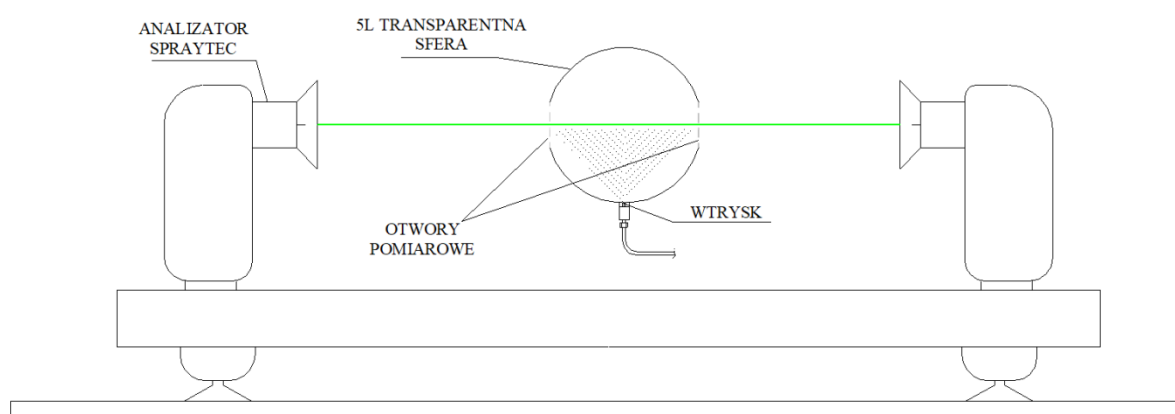
Tabela 8.2. Parametry rozkładu wielkości kropeł cieczy

Parametr Ciecz	Dv_{10} μm	Dv_{50} μm	Dv_{90} μm	$D_{[3][2]}$ średnica Sautera, μm
Nafta	14,2	26,9	46,5	22,5
Izopropanol	13,6	25,1	39,1	22,0
Woda	19,4	51,9	103,2	34,7

Źródło: [Toman i Adamus, 2023]

Pomiar rozkładu wielkości kropeł badanych cieczy potwierdził, że ich średnice mieściły się w przedziale 10–50 μm , zgodnie z przyjętymi założeniami. Uzyskane wyniki świadczą o stabilności procesu atomizacji i precyzyjnej pracy układu pompowo-wtryskowego.

Pomiary przeprowadzone w przestrzeni badawczej komory umożliwiają określenie warunków w niej panujących. Ze względu na ograniczenia techniczne wynikające z konstrukcji komory badawczej, bezpośrednie pomiary rozdrobnienia w jej wnętrzu były niemożliwe. Zamiast tego zastosowano transparentną kulę akrylową o podobnej objętości (wspomniana w rozdziale 8.2), co pozwoliło na przeprowadzenie dokładnych badań. W celu uniknięcia zakłóceń sygnału laserowego, na przeciwnych ścianach kuli wykonano otwory pomiarowe o średnicy około 4 cm (rys. 8.6). Rozwiązanie to umożliwiło uzyskanie wyników zbliżonych do warunków panujących w rzeczywistej komorze badawczej, jednocześnie eliminując wpływ odbić sygnału od ścianek.



Rys. 8.6. Schemat poglądowego stanowiska pomiarowego wielkości cząstek aerozolu (oprac. własne)

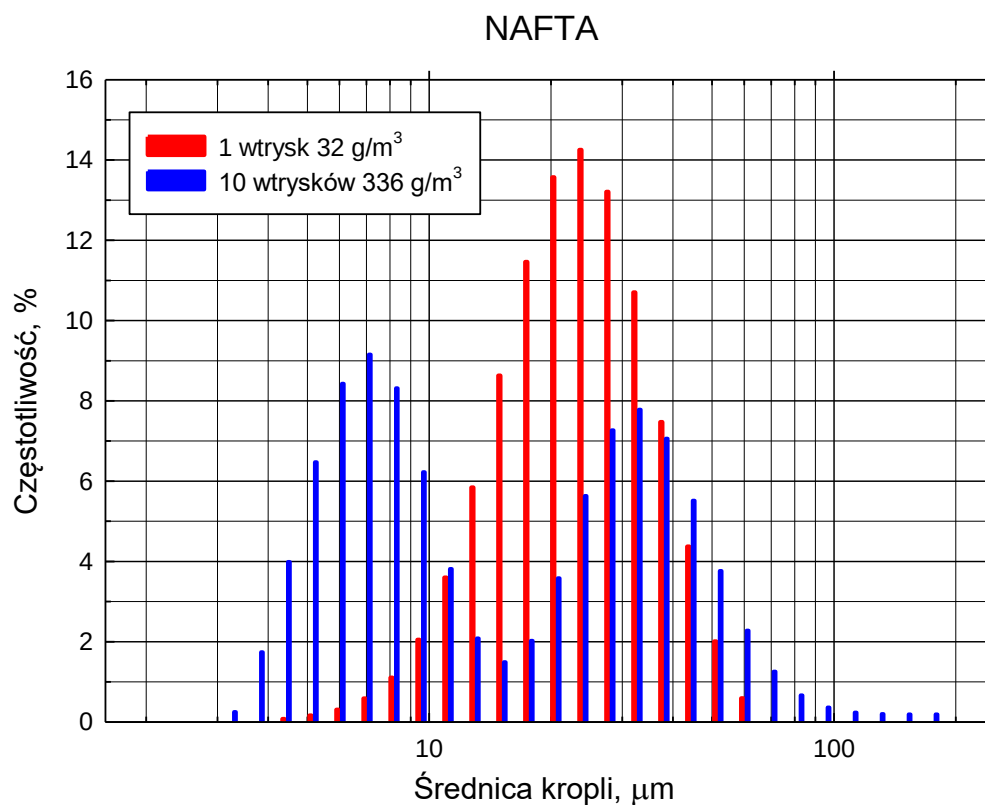
Pomiar wielkości cząstek aerozolu dla badanych cieczy przeprowadzono w geometrycznym środku transparentnej kuli akrylowej, na wysokości odpowiadającej lokalizacji źródła zapłonu. Takie ustawienie zapewniło pomiar w najbardziej reprezentatywnym obszarze dla dalszych analiz procesu zapłonu. Rzeczywisty obraz

stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 8.7, który pokazuje szczegółową konfigurację układu, w tym umiejscowienie otworów pomiarowych i analizatora laserowego Malvern Spraytec. Dzięki starannie dobranym warunkom pomiarowym uniknięto potencjalnych zakłóceń, takich jak odbicie sygnału laserowego od ścianek kuli. Pomiar przeprowadzono dla wszystkich badanych cieczy, co pozwoliło na kompleksową analizę ich właściwości aerozolowych w warunkach symulujących procesy zachodzące w rzeczywistej komorze badawczej.

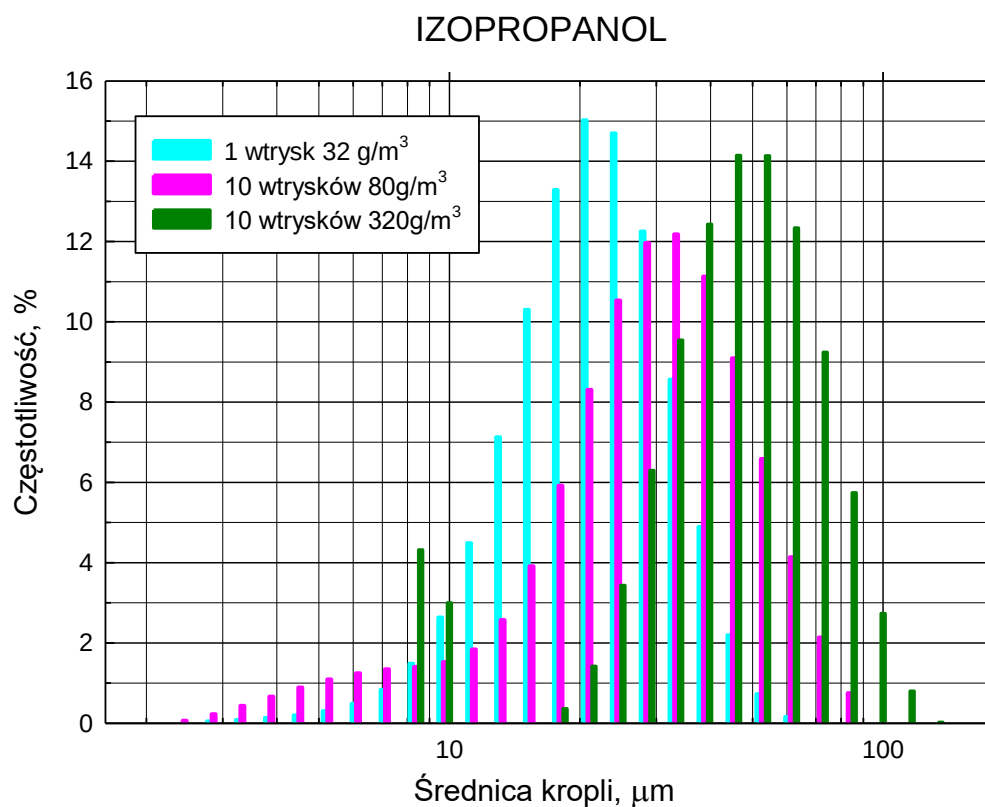


Rys. 8.7. Stanowisko pomiarowe wielkości cząstek aerozolu (fot. A. Toman)

Badania przeprowadzono dla różnych stężeń badanych cieczy oraz trzech ustawień liczby wtrysków: 1, 10 i 20. Wybór tych ustawień umożliwił analizę wpływu rosnącej liczby impulsów na jakość wytworzonego aerozolu, rozkład wielkości jego kropel oraz stopień równomierności dyspersji. Różne stężenia pozwoliły dodatkowo na ocenę zależności między parametrami wtrysku a efektywnością procesu wytwarzania aerozolu. Na wykresach (rys. 8.8–8.9) przedstawiono wstępne wyniki badań, ilustrujące zależności między liczbą wtrysków, stężeniem cieczy a rozkładem wielkości kropel. Dane te stanowią podstawę do szczegółowej analizy wyników, która zostanie przeprowadzona w dalszej części rozdziału.



Rys. 8.8. Pomiar średniej średnicy Sautera nafty dla 1 i 10 wtrysków w transparentnej kuli, ciśnienie cieczy 150 barg [Toman i Adamus, 2023]



Rys. 8.9. Pomiar średniej średnicy Sautera izopropanolu w sekwencji 1 i 10 wtrysków w transparentnej kuli, ciśnienie cieczy 150 barg [Toman i Adamus, 2023]

Jak pokazują rysunki 8.8 i 8.9 dla mniejszej koncentracji otrzymuje się rozkład jednomodalny. W przypadku wyższych stężeń drugi pik dla obu cieczy pojawia się przy około 9 μm . Może to być wynikiem koalescencji niektórych kropeł mniejszej średnicy podczas fazy wytwarzania lub sedymentacji. Z uwagi na niewielką liczbę przeprowadzonych testów, nie można jednoznacznie stwierdzić, że zjawisko to występuje zawsze. W przypadku izopropanolu (rys. 8.9) można zauważyć, że wzrost stężenia skutkuje zwiększeniem rozmiaru cząsteczek aerozolu, co może wskazywać na ich aglomerację. Zjawisko to odnotowali również inni badacze [El-Zahlanieh i in., 2020, Yuan i in., 2019]. Problem ten omówiono w kolejnej analizie. Parametry jednowartościowe opisujące rozkłady wielkości kropeł nafty i izopropanolu (rys. 8.8–8.9) dla różnych stężeń i ilości wtrysków przedstawiono w tabeli 8.3.

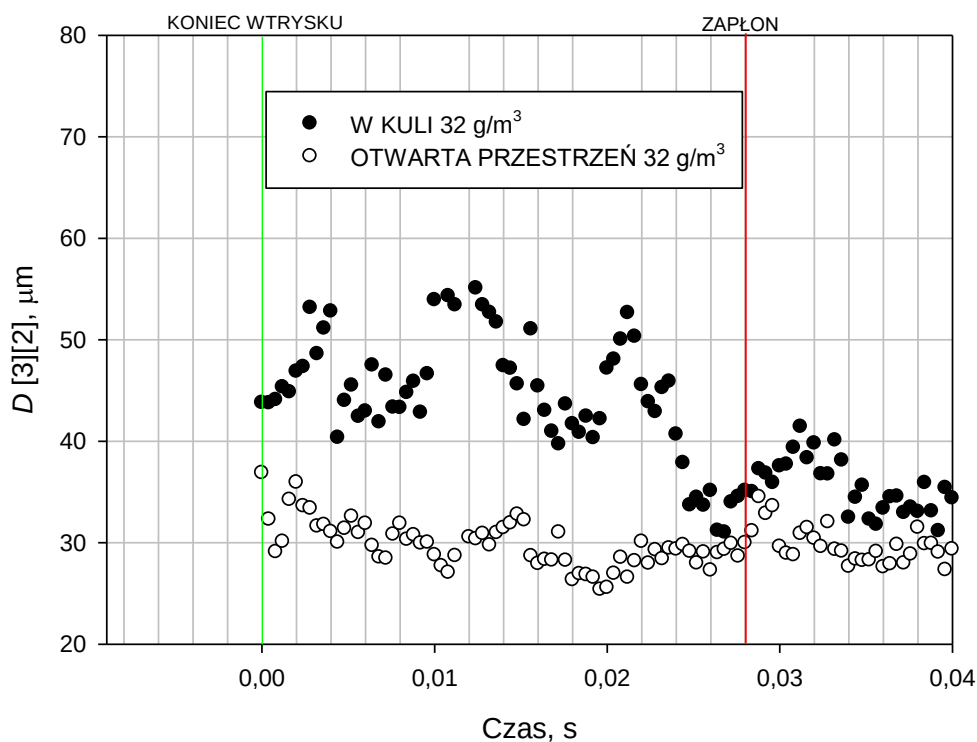
Tabela 8.3. Parametry rozkładu wielkości kropeł cieczy

Parametr Ciecz	Ilość wtrysków	Stężenie g/m^3	Dv_{10} μm	Dv_{50} μm	Dv_{90} μm	$D_{[3][2]}$ średnica Sautera, μm
Nafta	1	32	13,8	24,6	41,2	18,2
Nafta	10	336	5,4	23,4	36,5	13,8
Izopropanol	1	32	8,6	17,9	32,9	23,9
Izopropanol	10	80	11,4	28,3	85,8	22,5
Izopropanol	10	320	20,0	40,9	92,0	43,5

Źródło: (oprac. własne)

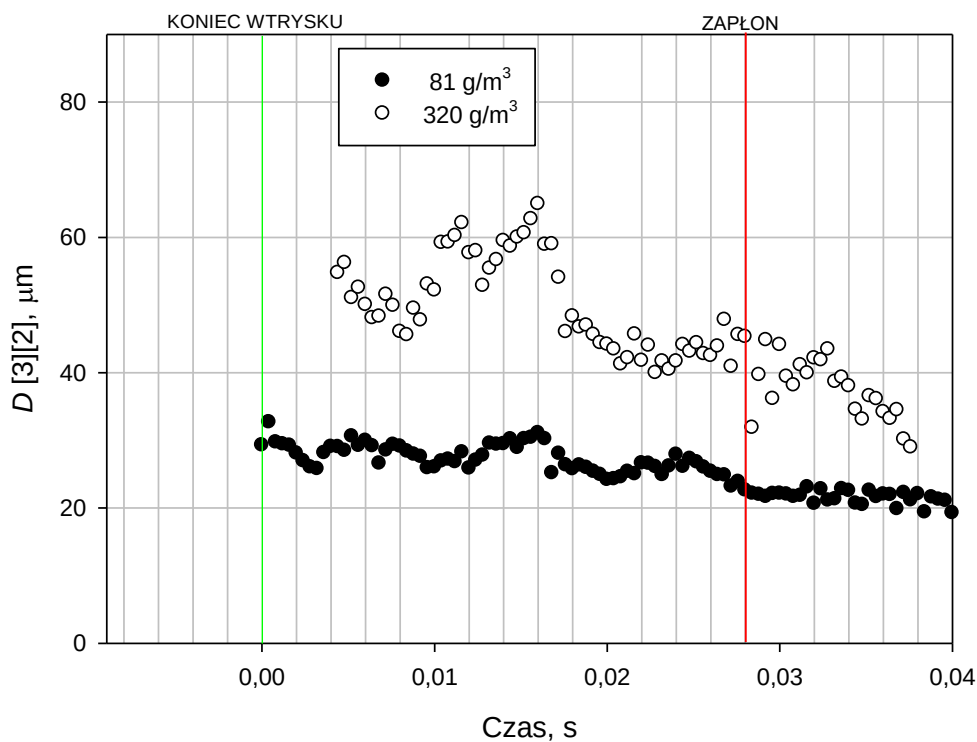
Jednowymiarowy wskaźnik (SMD) może być obarczony istotnym błędem wynikającym z dynamicznych zmian zachodzących w zamkniętej przestrzeni podczas wytwarzania aerozolu. Biorąc to pod uwagę, zdecydowano się na przedstawienie histogramu rozkładu (SMD) w funkcji czasu. Badania przeprowadzono dla różnych stężeń badanych cieczy. Na podstawie uzyskanych pomiarów dla izopropanolu i nafty określono rozkład wielkości cząstek aerozolu (SMD) w zależności od czasu (rys. 8.10–8.13). Kluczowy wydaje się zakres pomiarowy od zakończenia rozpylania aerozolu do momentu zapłonu. Mając na uwadze badania innych eksperymentatorów [Yuan i in., 2019] dla najniższego stężenia przeprowadzono dodatkowo, w celach porównawczych, pomiar rozdrobnienia aerozolu izopropanolu zarówno w otwartej przestrzeni, jak i w kuli (rys. 8.10).

IZOPROPANOL

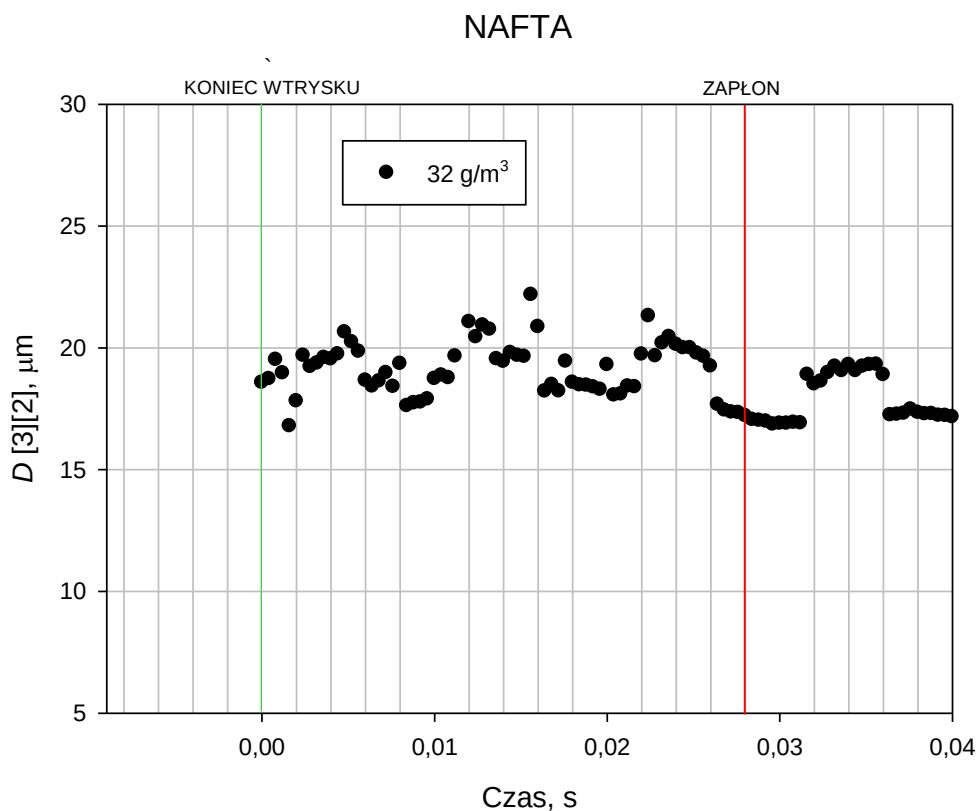


Rys. 8.10. Rozkład wielkości cząstek aerozolu izopropanolu w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2023]

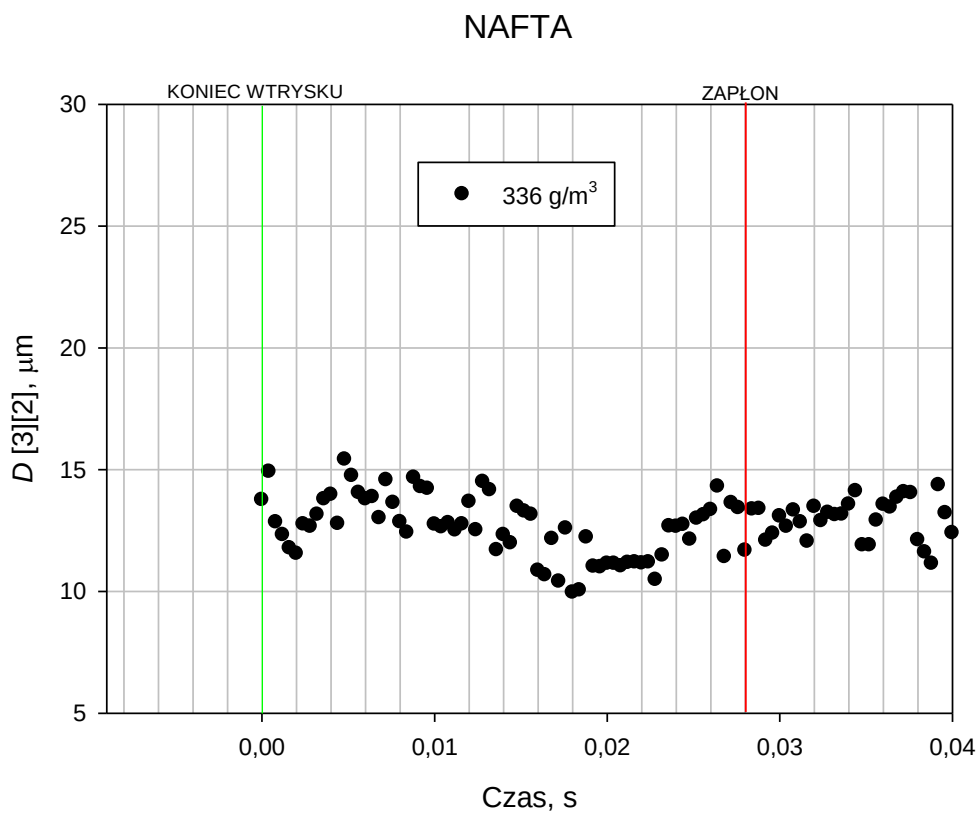
IZOPROPANOL



Rys. 8.11. Rozkład wielkości cząstek aerozolu izopropanolu w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2023]



Rys. 8.12. Rozkład wielkości cząstek aerozolu nafty w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2023]

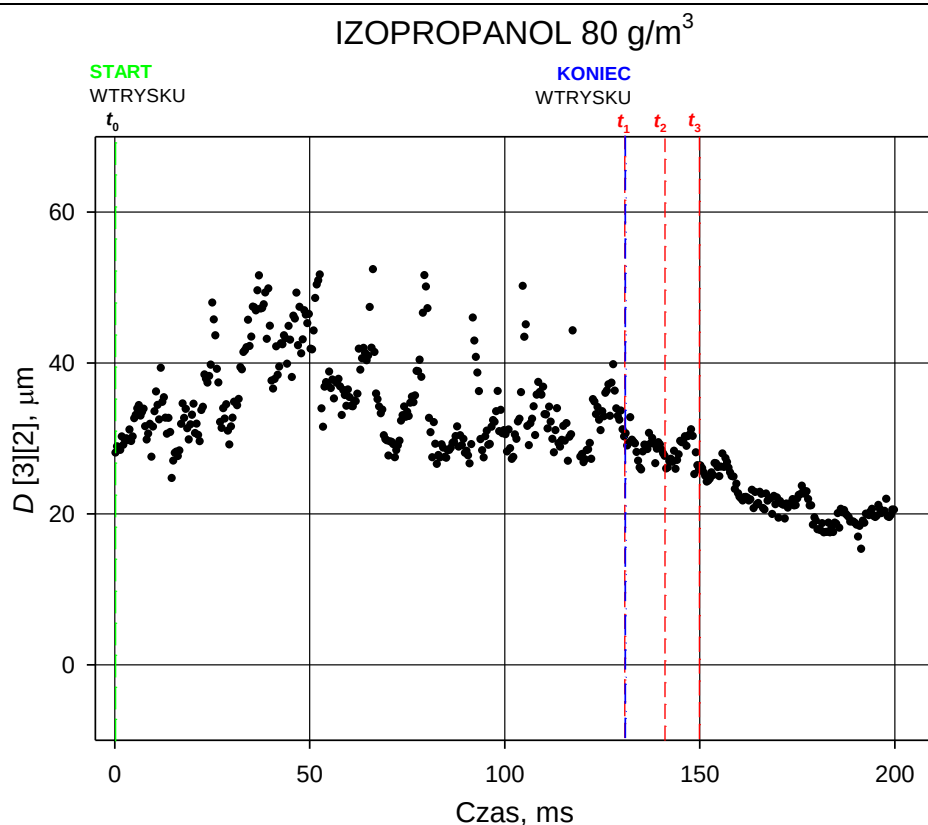


Rys. 8.13. Rozkład wielkości cząstek aerozolu nafty w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2023]

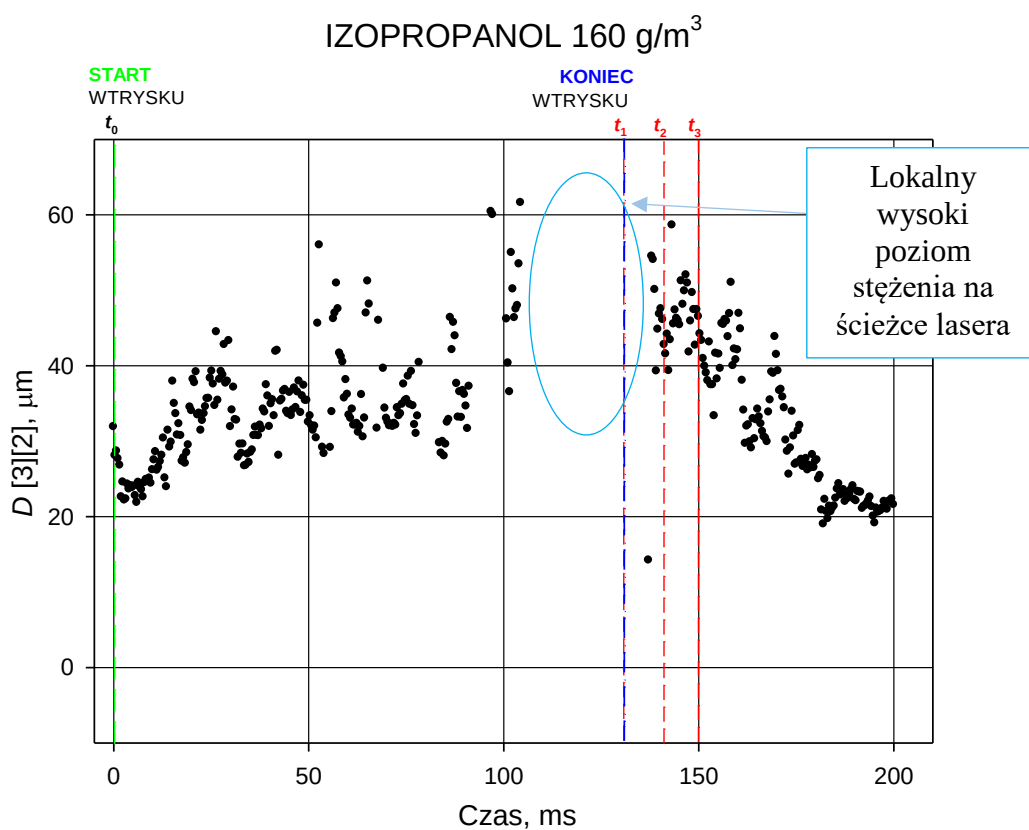
Na wykresach (rys. 8.10–8.13) zieloną linią zaznaczono moment zakończenia atomizacji, a czerwoną – moment zapłonu. Koniec sekwencyjnego wytwarzania aerozolu (10 wtrysków) następuje po około 130 ms, który na wykresie oznaczono jako czas 0. Czas opóźnienia zapłonu, przyjęty w tych badaniach, wynosi 28 ms po ostatnim wtrysku, co w połączeniu z procesem atomizacji daje około 160 ms [Toman i Adamus, 2023]. Otrzymane wyniki średniej średnicy Sautera ($D_{[3][2]}$) dla nafty i izopropanolu, w przypadku dwóch skrajnych koncentracji, rozpylonych w podobnej objętości do komory badawczej, można uznać za zadowalające. Oba wyniki mieszczą się w oczekiwanym przedziale, z niewielką oscylacją punktów pomiarowych dla najwyższej koncentracji izopropanolu.

Charakterystyka wytworzonego aerozolu izopropanolu w rozpatrywanym przedziale czasowym różni się od charakterystyki aerozolu nafty. Różnice te mogą wynikać z różnych właściwości fizykochemicznych obu cieczy. Jak przedstawili to Orzechowski i Prywer (2008), dla cieczy o większej gęstości można uzyskać mniejsze krople, co potwierdza uzyskany rezultat. W dodatkowych badaniach dla izopropanolu o stężeniu 32 g/m^3 (rys. 8.10) przeprowadzonych zarówno w otwartej przestrzeni, jak i w kuli, zauważono znaczne różnice. Z uwagi na bardzo niskie badane stężenie oczekiwano, że różnice te będą najmniej widoczne. Dlatego porównywanie wyników uzyskanych w otwartej przestrzeni z wynikami z zamkniętej sfery może być błędnym podejściem.

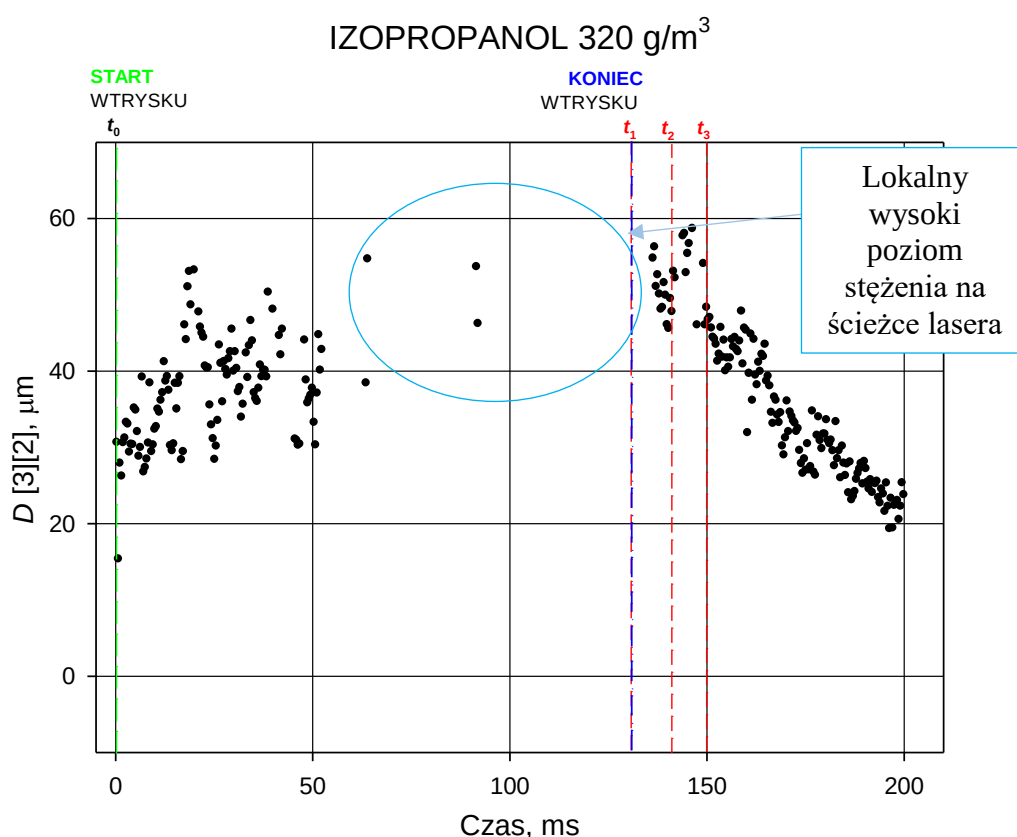
W kolejnych badaniach opisanych w pracy [Toman i Adamus, 2024] zdecydowano się zrezygnować z podawania jednowartościowego parametru (SMD) podczas oznaczania rozdrobnienia cząstek aerozolu. Zamiast tego przedstawiono zmiany rozkładu wielkości cząstek aerozolu w przedziale czasowym od początku procesu atomizacji do 200 ms. Zakres ten obejmował między innymi cały proces dyspersji aerozolu, od początku do końca oraz okres późniejszy. Dzięki temu możliwe stało się obserwowanie zmian zachodzących zarówno w trakcie, jak i po procesie atomizacji. Na wykresach zostały zaznaczone również czasy opóźnienia zapłonu. Badania te przeprowadzono dla różnych stężeń rozpatrywanych cieczy, przy czym jako pierwszy rozpatrzono izopropanol (rys. 8.14–8.16).



Rys. 8.14. Rozkład wielkości cząstek aerozolu izopropanolu w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2024]

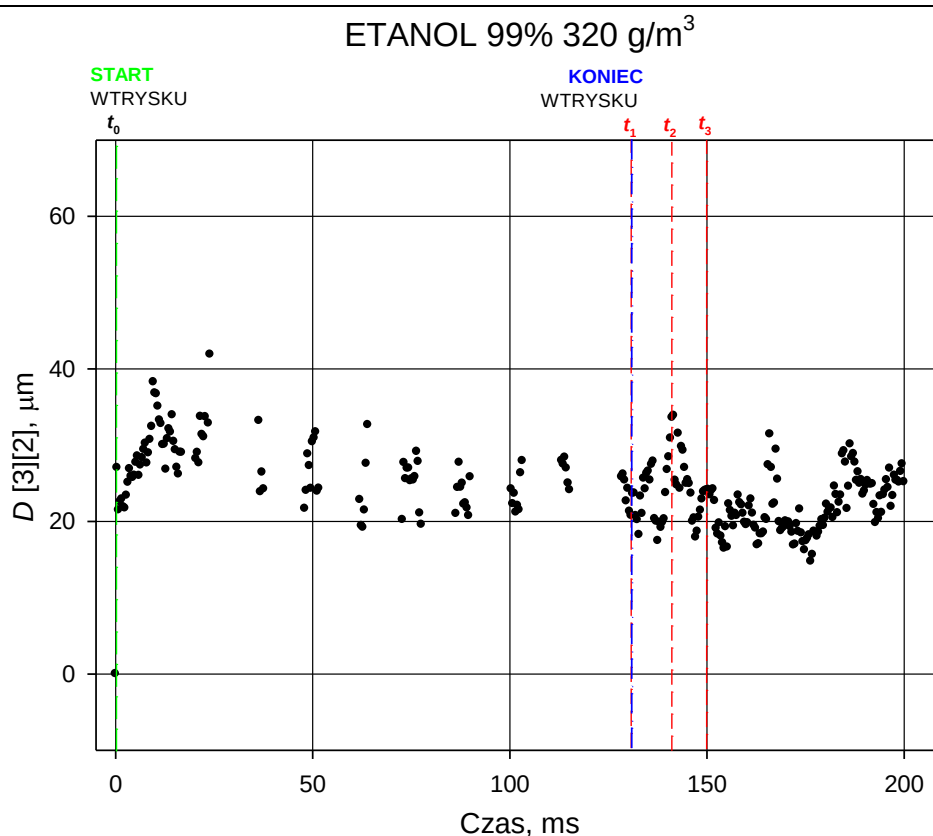


Rys. 8.15. Rozkład wielkości cząstek aerozolu izopropanolu w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2024]



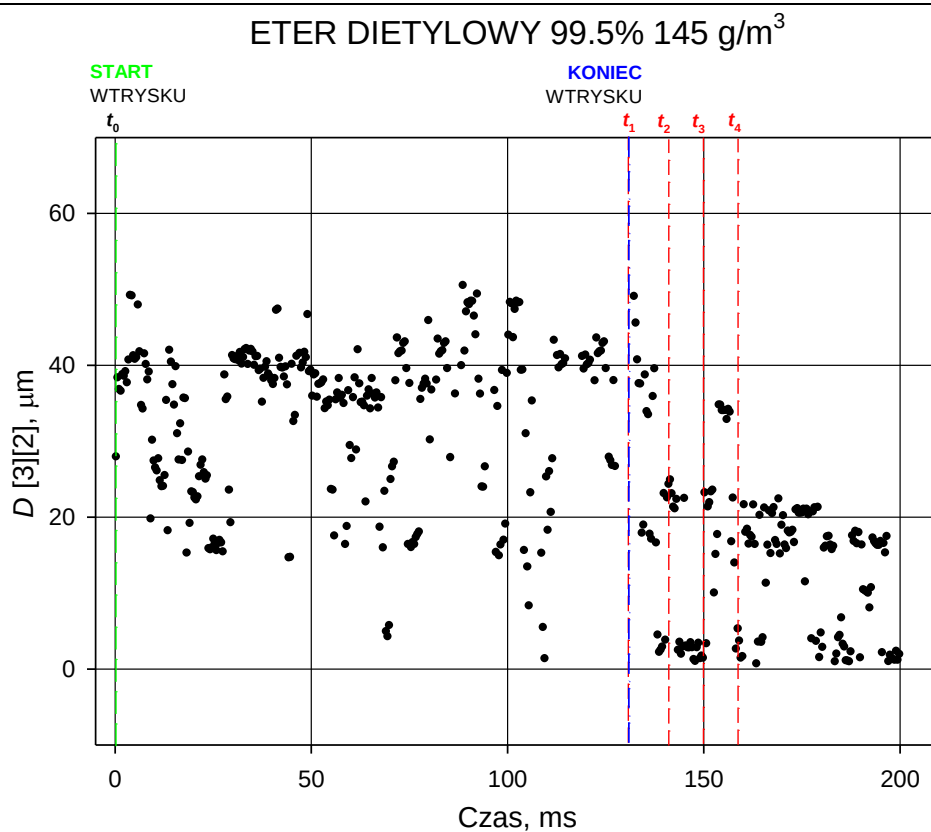
Rys. 8.16. Rozkład wielkości cząstek aerozolu izopropanolu w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2024]

Na rysunkach 8.14–8.16 jest widoczna ewolucja średniej średnicy Sautera izopropanolu w czasie dla stężeń: 80 g/m³, 160 g/m³, 320 g/m³, w procesie atomizacji i po jego zakończeniu. Na wykresie zaznaczono początek procesu atomizacji zieloną linią, a koniec – niebieską. Jak można zauważyć, wahania rozdrobnienia mieszczą się w przedziale 20–50 μm. Zmiany te mogą wynikać z sekwencyjnego podawania aerozolu oraz właściwości fizykochemicznych cieczy. W każdym pojedynczym wtrysku widoczny jest chwilowy wzrost wielkości kropeł, co może być efektem aglomeracji cząstek aerozolu w miejscu pomiaru podczas kolejnego wtrysku. Na wykresie dla stężenia 160 g/m³, w przedziale czasowym 105–135 ms, można zauważyć zanik sygnału na detektorach. Podobny efekt występuje dla stężenia 320 g/m³, lecz jest zauważalny już po 50 ms. Detektory analizatora Spraytec tymczasowo tracą sygnał. Wysokie miejscowe stężenie rozproszonego aerozolu utrudnia przepływ wiązki lasera do detektorów. W obu przypadkach, po zakończeniu procesu atomizacji, następuje stabilizacja, a średnica cząstek stopniowo maleje. Coraz mniejsze cząstki mogą wskazywać na parowanie rozproszonych kropli izopropanolu.

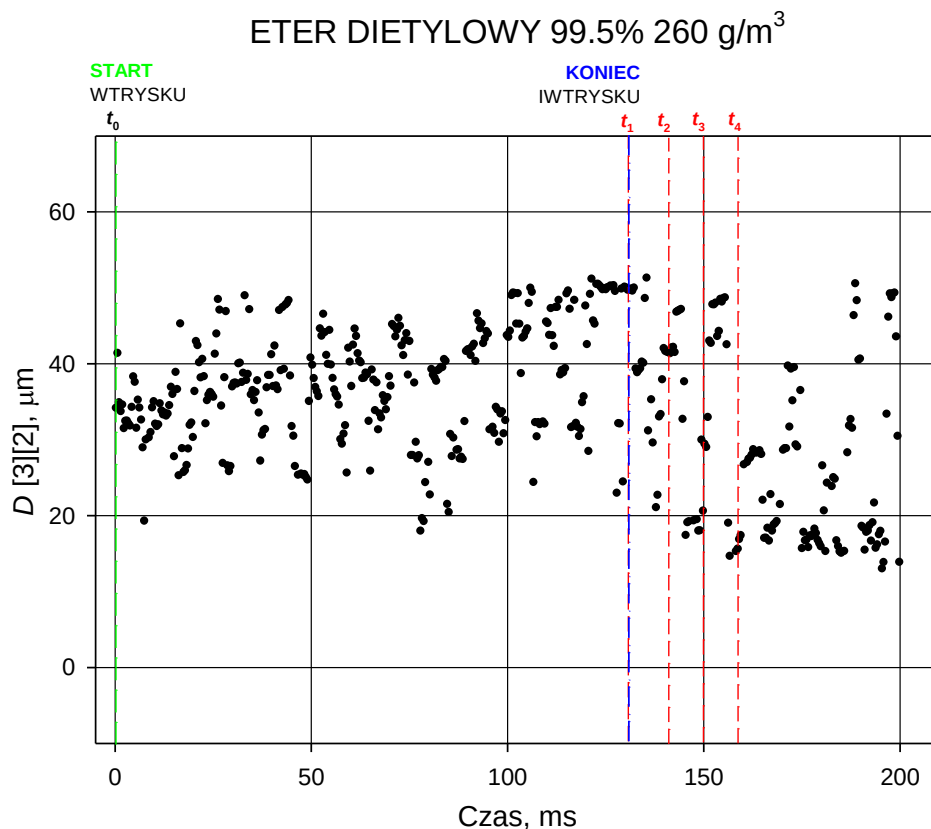


Rys. 8.17. Rozkład wielkości cząstek aerozolu etanolu w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2024]

Dla etanolu (rys. 8.17) przebieg fragmentacji dla najwyższego testowanego stężenia, takiego samego jak dla izopropanolu, wygląda zupełnie inaczej. Wielkość kropeł aerozolu wydaje się utrzymywać na podobnym poziomie przez cały proces atomizacji. Zauważalne są jednak luki w pomiarze, pojawiające się w miejscach maksymalnego natężenia podczas wtrysku aerozolu. Podobnie jak w przypadku izopropanolu są to chwilowe trudności w przejściu wiązki lasera przez gęstą chmurę aerozolu. Należy jednak podkreślić na stabilny rozkład cząstek aerozolu na poziomie 20–30 μm przez cały czas trwania pomiaru.



Rys. 8.18. Rozkład wielkości cząstek aerozolu eteru dietylowego 99,5% w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D[3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2024]



Rys. 8.19. Rozkład wielkości cząstek aerozolu eteru dietylowego 99,5% w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D[3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2024]

Charakterystyka średniej średnicy Sautera (D [3] [2]) dla eteru dietylowego znacznie różni się od charakterystyki dla izopropanolu i etanolu. Obserwuje się wyraźne rozproszenie punktów pomiarowych, szczególnie dla stężenia 145 g/m^3 (rys. 8.18). W strefie atomizacji jest widoczny podobny profil pomiaru wielkości cząstek w całym obszarze, a po jej zakończeniu następuje natychmiastowa zmiana. W przedziale czasowym od t_1 do t_2 różnice są mniejsze w porównaniu ze strefą atomizacji, w przeciwieństwie do przedziału od t_2 do t_4 , gdzie większość kropeł aerozolu ma wielkość poniżej $20 \mu\text{m}$, przy niższym stężeniu. Istotne są w tym przypadku różnice właściwości eteru dietylowego w porównaniu z izopropanolem i etanolem. Prawie dziesięciokrotnie wyższa prężność par eteru dietylowego, wynosząca $589,6 \text{ hPa}$ oraz znacznie niższa temperatura wrzenia ($35,58^\circ\text{C}$), przyczyniają się do szybszego parowania rozproszonych kropełek aerozolu tej cieczy. Szybsze odparowanie eteru dietylowego podczas pomiaru wielkości cząstek może wynikać także z obecności otworów pomiarowych w ściankach kuli. Uzyskany wynik, przeprowadzonych w tych warunkach pomiarów, może różnić się od wyniku uzyskanego w warunkach rzeczywistych, tj. w całkowicie zamkniętej przestrzeni. Znacznie mniejsze różnice można zaobserwować w przypadku wyższych stężeń, tj. od 260 g/m^3 (rys. 8.19). Można zauważyć mniejszy rozrzut punktów pomiarowych i mniejsze zmiany w strefie zapłonu t_1 – t_4 . Wielkość kropeł zgodnie z przyjętym kryterium jest właściwa i mieści się w zakresie 10 – $50 \mu\text{m}$.

Jak można zaobserwować dla rozpatrywanych cieczy, zastosowanie tego samego urządzenia dyspergującego aerozol może prowadzić do różnych efektów atomizacji. Podkreślają to Yuan i in. (2021), którzy zwracają uwagę, że zmienność rozpadu i aglomeracji kropeł, zwilżania powierzchni i parowania, stwarza wyzwania dla prowadzenia standardowych eksperymentów z aerozolem.

W badaniach innych eksperymentatorów podawana jest zazwyczaj pojedyncza średnia średnica Sautera do opisanie całego DSD , może się ona jednak znacznie różnić w zależności od turbulencji i czasu, z powodu zjawiska koalescencji lub rozpadu cząsteczek.

8.5. Test sekwencji czasowej źródła zapłonu

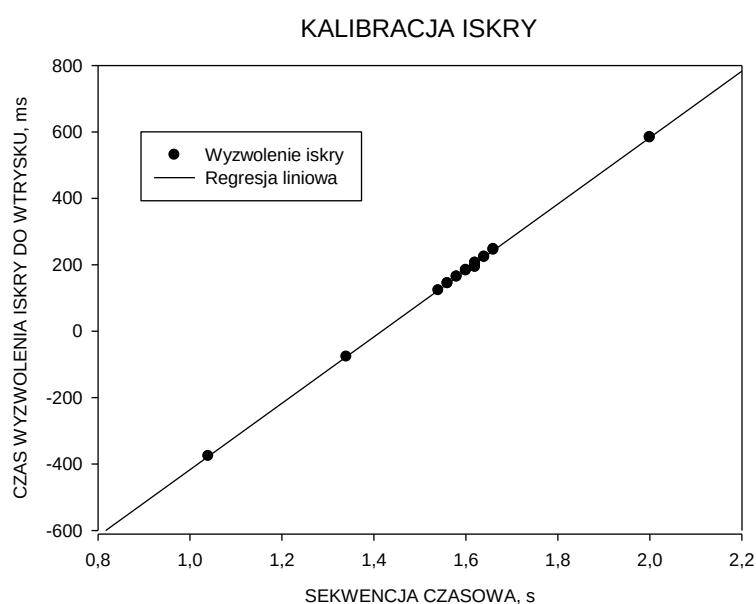
Pierwsze testy z iskrowym źródłem zapłonu przeprowadzono poza kulą badawczą, co ułatwiło późniejszą obserwację generowanej iskry i procesu wtrysku wytwarzającego aerozol w transparentnej kuli (rys. 8.20). Cały proces rejestrowano szybką kamerą Sony z częstotliwością nagrywania 1000 klatek na sekundę.



Rys. 8.20. Synchronizacja źródła zapłonu z procesem atomizacji (fot. A. Toman)

Przeprowadzone testy pozwoliły na ocenę możliwości sterowania czasem opóźnienia zapłonu, sprawdzenie powtarzalności generowania iskry oraz wybranie najodpowiedniejszego czasu zapłonu. Wydłużanie tego czasu może prowadzić do: opadania lub osadzania się aerozolu na ściankach, aglomerowania się kropeł oraz zwiększenia wpływu efektu parowania rozproszonych cząsteczek cieczy.

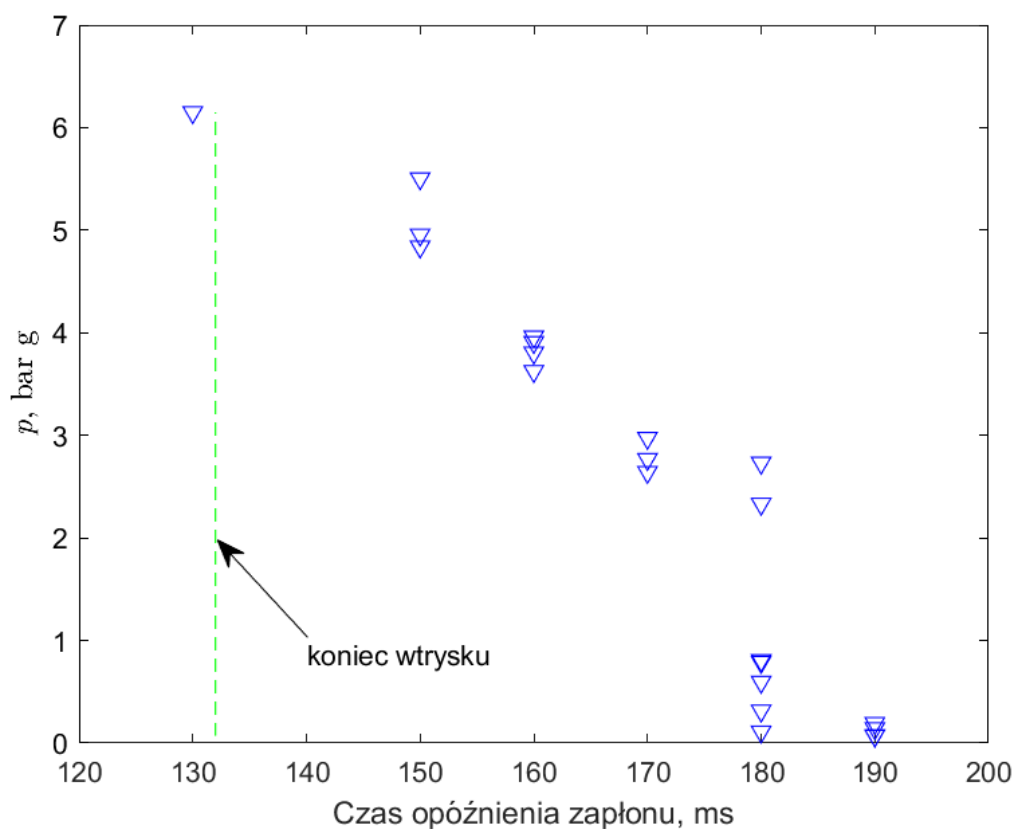
Precyzyjne ustawienie czasu zapłonu jest kluczowe dla powtarzalności uzyskiwanych wyników. W tym celu przeprowadzono dodatkowy test poprawności działania przekaźnika czasowego iskry ETM-442 w układzie sterowania z synchronizacją czasową procesu atomizacji, sterowanego przez urządzenie CR1 (rys. 8.21).



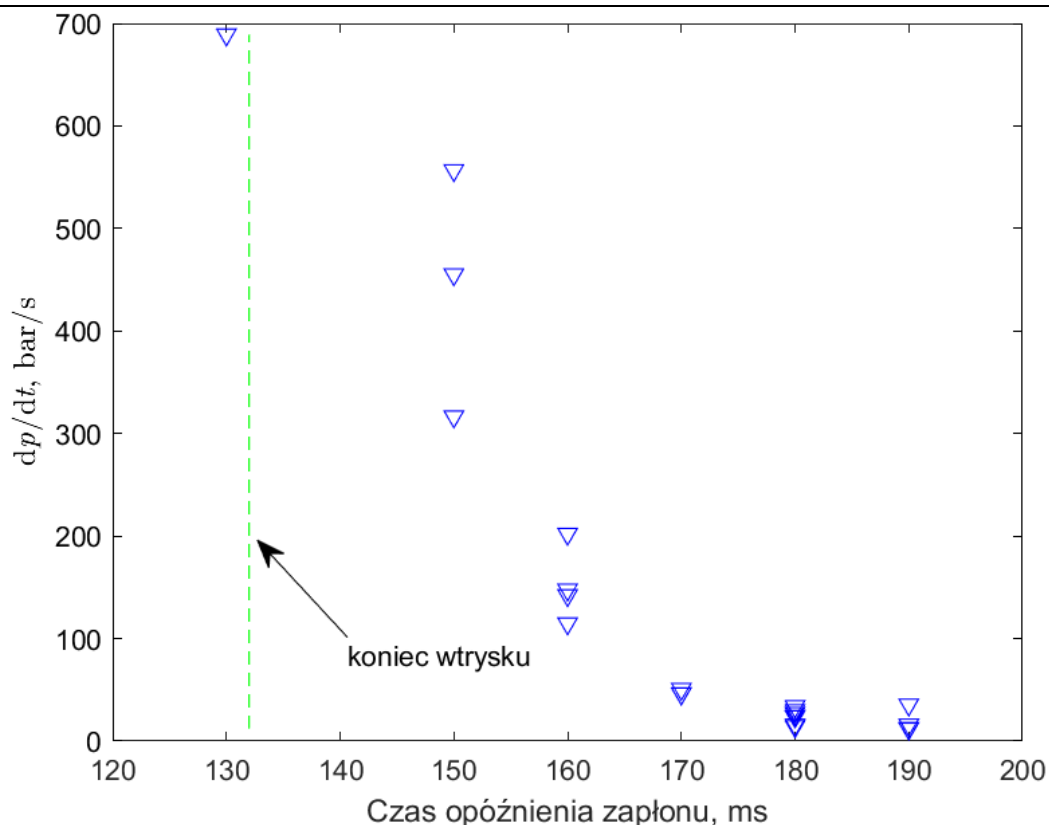
Rys. 8.21. Sprawdzenie synchronizacji czasowej przekaźnika ETM-442 z procesem atomizacji (oprac. własne)

Analiza regresji statystycznej przedstawiona na rysunku 8.21 wykazała zgodność ustawienia przełącznika ETM-442 z przewidywanym opóźnieniem zapłonu i synchronizacją czasową wtrysku.

Wizualna ocena nagrań wideo pozwoliła również na ustalenie czasu formowania się jednorodnej mieszaniny aerozolu z powietrzem. Zaobserwowano, że chmura aerozolu nafty równomiernie wypełniała całą objętość po około 20 ms od zakończeniu wtrysku. Ustalenie przybliżonego czasu zostało potwierdzone w warunkach rzeczywistych przedstawionych w pracy [Toman i Adamus, 2023] (rys. 8.22–8.23).



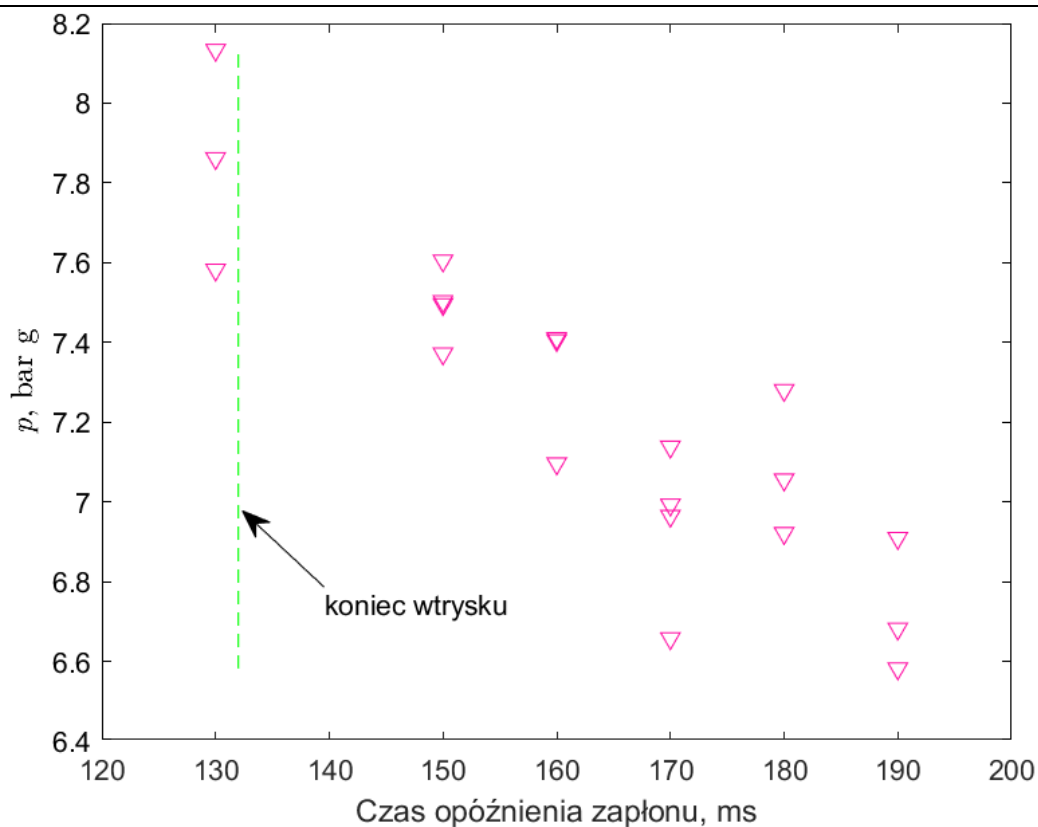
Rys. 8.22. Ciśnienie wybuchu p nafty dla stężenia 336 g/m^3 w funkcji opóźnienia zapłonu w temperaturze $\sim 20^\circ\text{C}$ [Toman i Adamus, 2023]



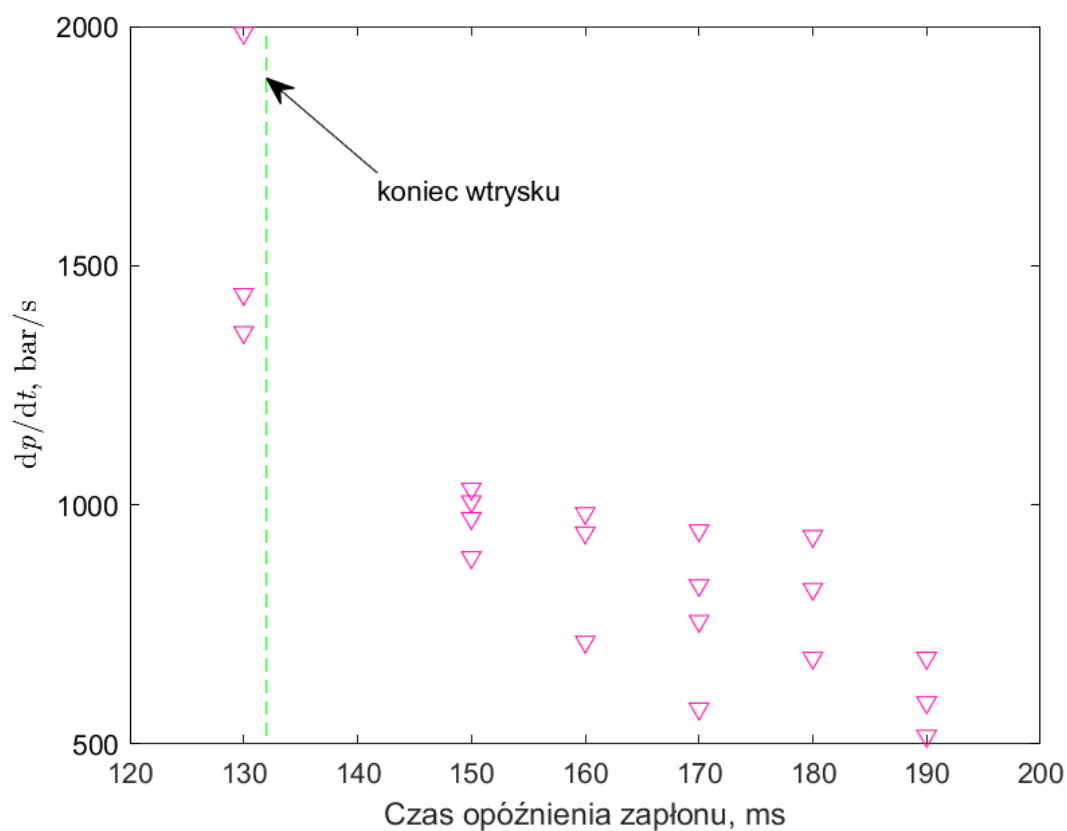
Rys. 8.23. Maksymalna szybkość wzrostu ciśnienia wybuchu (dp/dt) nafty dla stężenia 336 g/m^3 w funkcji opóźnienia zapłonu w temperaturze $\sim 20^\circ\text{C}$ [Toman i Adamus, 2023]

Parametry wybuchu nafty mierzono dla różnych czasów opóźnienia zapłonu, przy najwyższym testowanym stężeniu 336 g/m^3 (rys. 8.22–8.23). Testy przeprowadzone w przezroczystej kuli o pojemności 5 dm^3 wykazały, że czas opóźnienia zapłonu, liczony od zakończenia wtrysku dla nafty, nie powinien być krótszy niż 20 ms, a wydłużanie tego czasu może skutkować brakiem zapłonu.

Te same testy, przeprowadzone w identycznych warunkach i ustawieniach, wykonano dla izopropanolu. Tylko testowane stężenie było inne (314 g/m^3) ze względu na inną gęstość cieczy. Wyniki tych testów przedstawiono na rysunku 8.24–8.25.



Rys. 8.24. Ciśnienie wybuchu p izopropanolu dla stężenia 314 g/m^3 w funkcji opóźnienia zapłonu w temperaturze $\sim 20^\circ\text{C}$ [Toman i Adamus, 2023]

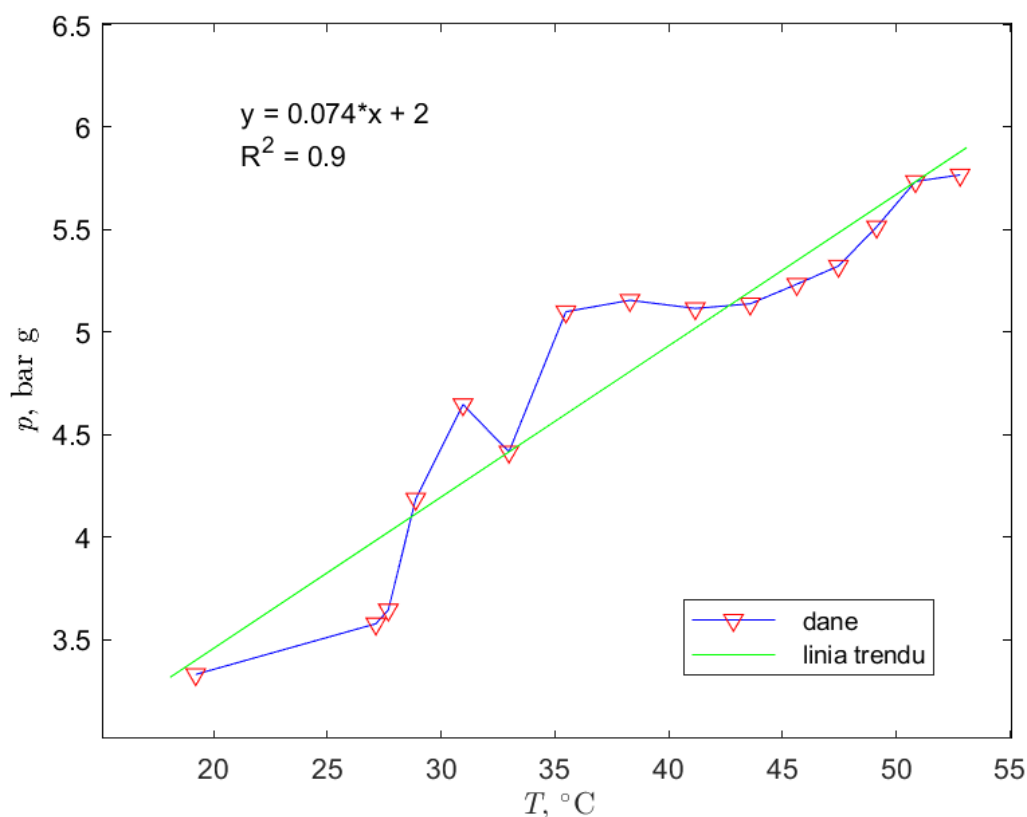


Rys. 8.25. Maksymalna szybkość wzrostu ciśnienia wybuchu (dp/dt) izopropanolu dla stężenia 314 g/m^3 w funkcji opóźnienia zapłonu w temperaturze $\sim 20^\circ\text{C}$ [Toman i Adamus, 2023]

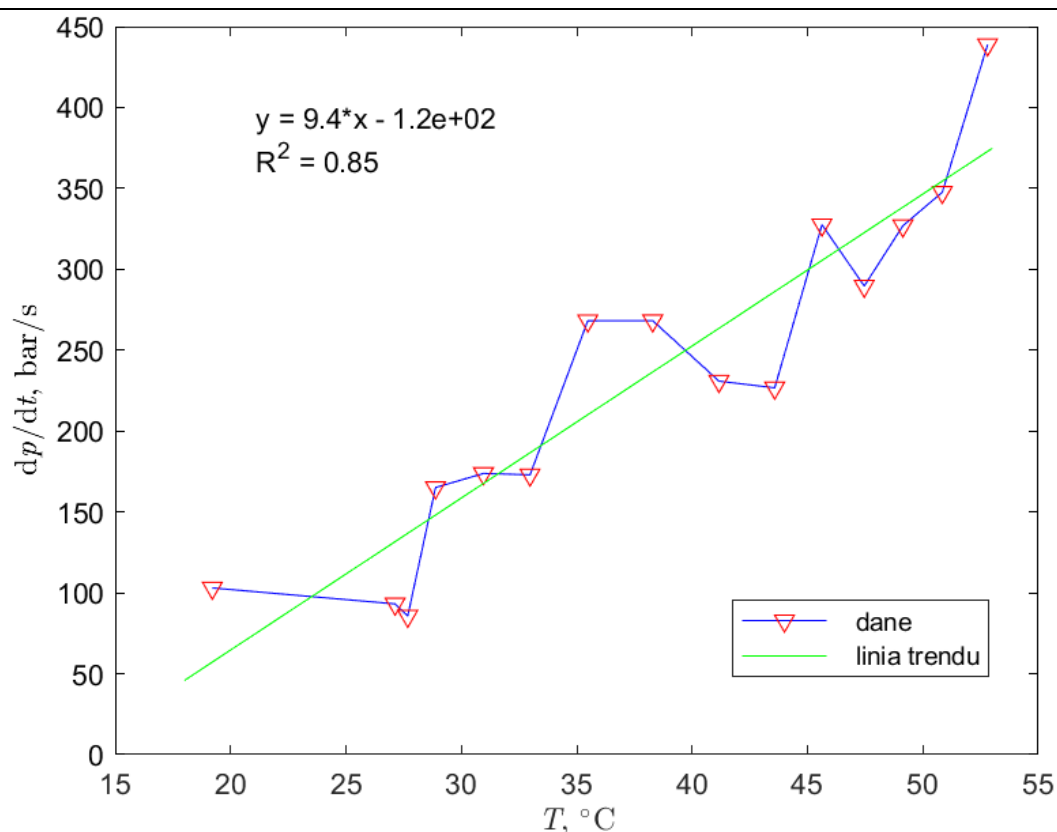
Każdy czas opóźnienia inicjacji zapłonu powtarzano trzy lub czterokrotnie. Dla izopropanolu najmniejszy rozrzut punktów pomiarowych uzyskano dla czasu 150 ms. W czasie 160 ms rozrzut punktów również był niewielki, choć w jednym przypadku wynik nieznacznie odbiegał od dwóch pozostałych.

8.6. Testy sprawdzające

Przeprowadzono kilka serii testów z aerozolami. Głównym celem było zmierzenie maksymalnego ciśnienia wybuchu p_{max} oraz maksymalnej szybkości wzrostu ciśnienia $(dp/dt)_{max}$ w funkcji stężenia aerozolu. We wszystkich testach zarejestrowano rozwój wybuchu przez pomiar ciśnienia. Na podstawie tych wyników obliczono szybkość wzrostu ciśnienia. Wstępne serie badań przeprowadzono z aerozolem nafty. Testy te miały na celu sprawdzenie działania aparatury. Duży rozrzut wystąpił nieoczekiwanie w wartościach maksymalnego ciśnienia wybuchu. Po zbadaniu przyczyn ustalono, że różnice te były spowodowane zmianami temperatury ścian naczynia. Nawet niewielka różnica temperatury miała wpływ na uzyskiwane wyniki. Mając to na uwadze, wykonano serię badań dla nafty, potwierdzając zależność temperaturową dla oznaczanych parametrów (rys. 8.26–8.27).



Rys. 8.26. Zależność ciśnienia wybuchu p aerozolu nafty dla stężenia 336 g/m^3 od temperatury [Toman i Adamus, 2023]



Rys. 8.27. Zależność maksymalnej szybkości wzrostu ciśnienia wybuchu (dp/dt) aerozolu nafty dla stężenia 336 g/m^3 od temperatury [Toman i Adamus, 2023]

Do wizualnego zidentyfikowania ogólnego kierunku zależności między parametrami wybuchowości a temperaturą w badanym przedziale, do wykresów (rys. 8.26–8.27) dodano linię trendu. Dodatkowo przedstawiono współczynnik determinacji R^2 , który informuje o stopniu dopasowania linii trendu do danych. Wyznaczony współczynnik jest bliski jedności, co świadczy o dobrym dopasowaniu linii trendu. Dodatnie nachylenie współczynnika kierunkowego wskazuje, że wzrost temperatury prowadzi do wyraźnego wzrostu parametrów wybuchowości.

Badania zależności temperaturowej przeprowadzono dla jednego, maksymalnego badanego stężenia aerozolu nafty wynoszącego 336 g/m^3 . W trakcie badań stale kontrolowano temperaturę komory badawczej. Wraz ze wzrostem temperatury naczynia rosły zarówno ciśnienie maksymalne, jak i maksymalna szybkość wzrostu ciśnienia. Ciśnienie p_{ex} wzrasta z wartości nieco powyżej 3 barg do prawie 6 barg przy zmianie temperatury z 20°C do 54°C . Wzrost maksymalnej szybkości wzrostu ciśnienia był jeszcze bardziej wyraźny. W tym zakresie temperatur $(dp/dt)_{ex}$ wzrastało 4,5-krotnie.

Obserwacje te potwierdziły wyniki Shepherd i in. (1997) oraz El-Zahlanich i in. (2022a). Pokazały one, jak istotna jest kontrola i utrzymywanie temperatury na stałym,

ustalonym poziomie. We wszystkich dalszych testach temperatura ścianki naczynia była utrzymywana na poziomie około 21°C.

9. Metoda badawcza

Opracowana metodologia badań eksperymentalnych stanowi integralny system postępowania naukowego, zapewniający powtarzalność i wiarygodność analiz wybuchowości aerozoli cieczy. Struktura rozdziału odzwierciedla cały proces badawczy – od przygotowania cieczy i jej podania do lejka, poprzez opis funkcji poszczególnych elementów aparatury i procedury postępowania w warunkach niestandardowych, aż po kwantyfikację kluczowych parametrów zapalności i wybuchowości.

Podrozdział 9.1 koncentruje się na znormalizowanej procedurze badawczej, obejmującej zarówno przygotowanie stanowiska pomiarowego, jak i szczegółową sekwencję operacyjną aparatury. Podrozdział 9.2 opisuje hierarchię pomiarów parametrów wybuchowości (ciśnienia wybuchu, szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu, dolnej granicy wybuchowości) oraz zapalności (minimalnej energii zapłonu), wraz z metodą wyznaczania ich maksymalnych wartości. Podrozdział 9.3 zawiera schemat blokowy (rys. 9.8) przedstawiający chronologię postępowania w pełnej procedurze badawczej, co ułatwia wizualizację kolejnych etapów analizy.

9.1. Procedura badawcza

W celu zapewnienia powtarzalności wyników badań opracowano szczegółową procedurę badawczą (podrozdział 9.1.1), stanowiącą znormalizowany algorytm postępowania podczas realizacji testów. Dokumentacja proceduralna obejmuje zarówno zasady przygotowania i eksploatacji aparatury, jak również sekwencję operacyjną poszczególnych etapów eksperymentu. Przyjęty schemat czynności został zoptymalizowany pod kątem specyfiki stanowiska badawczego, z uwzględnieniem wszystkich elementów układu wymagających interwencji operatora, weryfikacji parametrów lub regulacji. Opracowana procedura pozostaje w ścisłej korelacji ze schematem funkcjonalnym stanowiska przedstawionym na rysunku 9.2. W celu zwiększenia precyzji opisu oraz zapewnienia pełnej odtwarzalności warunków eksperymentalnych, szczegółową charakterystykę komponentów aparatury wraz z przebiegiem procesów medium i sygnałów sterujących powiązано z systemem numeracji widocznym zarówno na schemacie funkcjonalnym, jak i w opisie proceduralnym. Każda faza testów została zdefiniowana poprzez zestaw parametrów operacyjnych, co minimalizuje ryzyko błędów związanych z niestabilnością warunków pracy układu.

Procedura badań dla różnych czasów opóźnienia zapłonu (podrozdział 9.1.2) zmierza do określenia wpływu turbulencji na wybuchowość aerozolu cieczy oraz identyfikacji optymalnych warunków inicjacji wybuchu. Rozszerzony zakres badań umożliwia kompleksową analizę zachowania rozpylonego aerozolu w kluczowych parametrach środowiskowych charakterystycznych dla danej substancji. Zaobserwowano, że zakresy optymalnych warunków wykazują istotną zmienność między poszczególnymi badanymi cieczami.

W podrozdziale 9.1.3 przedstawiono zmodyfikowany algorytm postępowania stosowany przy braku osiągnięcia maksymalnych wartości parametrów wybuchowości w podstawowym zakresie stężeń. W takich przypadkach wymagane jest zastosowanie rozszerzonego protokołu badawczego, uwzględniającego zwiększenie liczby wtrysków poza standardową sekwencję dziesięciu cykli, co determinuje konieczność rekonfiguracji układu sterowania.

9.1.1. Opis przepływu mediów i sygnałów na podstawie schematu

Ciecz przeznaczona do badań jest podawana do lejka z filtrem (1). W układzie ciecz jest zasysana z pomocą pompy wysokiego ciśnienia (4), gdzie ulega sprężeniu i jest kierowana do bufora wysokociśnieniowego (7), który zapewnia stabilizację ciśnienia. Procesem tym steruje przetwornik ciśnienia (5), który za pośrednictwem regulatora ciśnienia RE-72 (rys. 9.1) utrzymuje przyjęte wartości parametrów pracy pompy. Po sprężeniu, ciecz jest magazynowana w buforze pod ustalonym ciśnieniem monitorowanym przez przetwornik ciśnienia (9). W tym stanie ciecz oczekuje na sygnał z systemu sterowania (13), który otwiera elektrozawór (10) oraz z układu sterowania wtryskiem (12), który steruje wtryskiwaczem (11). Układ sterowania wtryskiem (12) odpowiada również za odpowiednie stężenia aerozolu zgodnie z wcześniejszym ustawieniem. Sygnał otwarcia wtryskiwacza (11) uruchamia czasowy regulator źródła zapłonu ETM-442 (rys. 9.1). Po upływie ustalonego czasu opóźnienia, uruchamiany jest generator (14), który podaje impuls napięciowy na elektrody zapłonowe (15). Zapalenie aerozolu powoduje przyrost ciśnienia w przestrzeni wewnętrznej komory badawczej. Zmiany ciśnienia wewnątrz komory są mierzone za pomocą piezorezystancyjnych czujników ciśnienia (17). Sygnał z czujników, przez wzmacniacze (18), jest przekazywany do systemu akwizycji danych, a ten wysyła dane do komputera. Na monitorze komputera, za pomocą odpowiedniego oprogramowania, wyświetlane są informacje o maksymalnym przyroście ciśnienia oraz szybkości narastania ciśnienia, dla ustalonego wcześniej stężenia rozpatrywanego aerozolu. Zakończenie pojedynczego testu

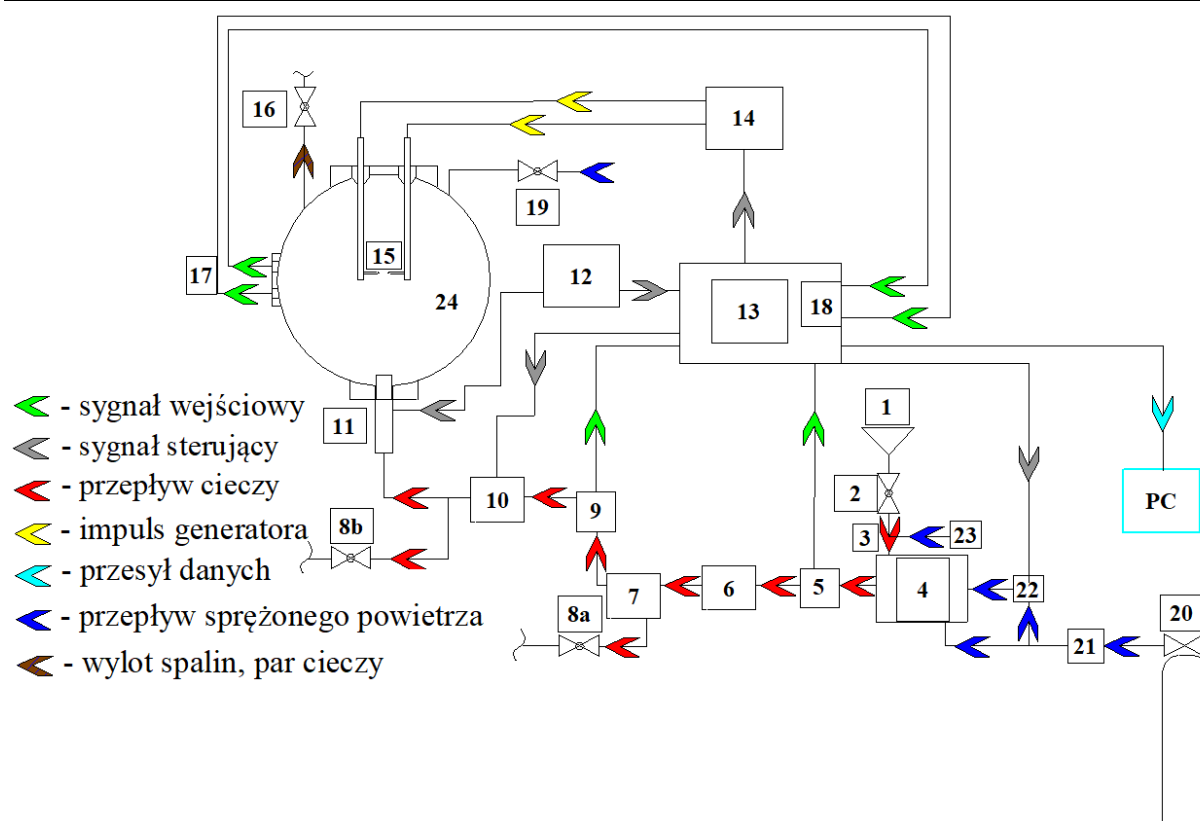
polega na przewietrzeniu komory badawczej przez otwarcie zaworu wylotowego (16) i wlotowego ze sprężonym powietrzem (19). Informacje otrzymywane z czujników temperatury, umieszczonych w komorze badawczej oraz w układzie chłodzenia, decydują o możliwości przeprowadzenia kolejnego testu dla tego samego stężenia lub dla innego, po uprzednim wystawieniu układu wtrysku (12). W zależności od rodzaju oznaczanego parametru, badania przeprowadza się dla różnych zakresów stężeń.

Sprężone powietrze (20) przez reduktor ciśnienia (21) i zawór sterujący, napędza pompę wysokociśnieniową (4). Powietrze to może być również wykorzystane do usunięcia cieczy z układu celem zamiany na inną ciecz. Proces ten wymaga zamknięcia zaworu (2) i przyłączenia sprężonego powietrza do portu (23).

Na panelu przednim (rys. 9.1) systemu sterowania (13) widoczny jest układ regulacji i kontroli, w którym umieszczono dwa przełączniki czasowe ETM-442 oraz regulator ciśnienia pompą (4) RE-72.



Rys. 9.1. Fragment przedniego panelu systemu sterowania (fot. A. Toman)

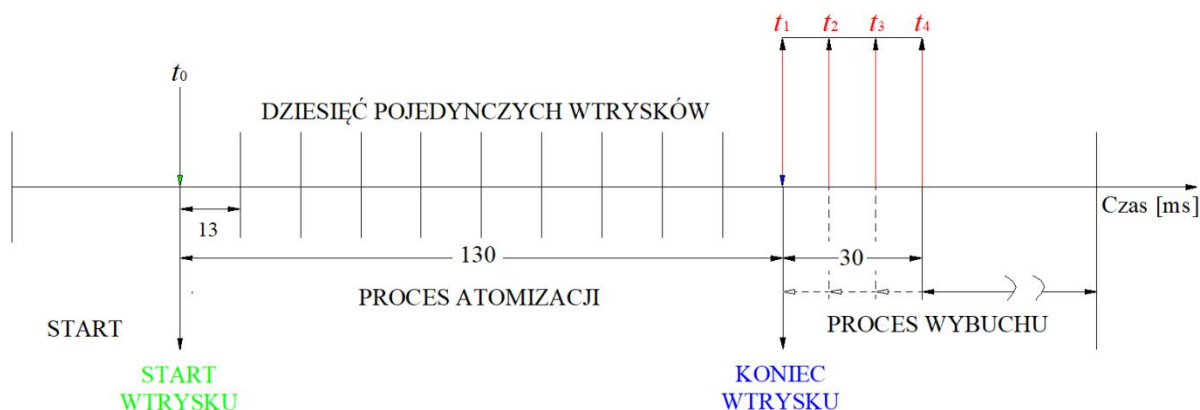


- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1) dozowanie cieczy | 13) system sterowania i akwizycji |
| 2) wlotowy zawór pompy | 14) generator iskier |
| 3) gardziel podawcza | 15) elektrody zapłonowe |
| 4) pompa wysokiego ciśnienia | 16) zawór wylotowy spalin z komory badawczej |
| 5) czujnik ciśnienia | 17) czujniki ciśnienia wybuchu |
| 6) zawór iglicowy | 18) wzmacniacze czujników ciśnienia |
| 7) hydrokinetyczny akumulator energii | 19) zawór sprężonego powietrza do przewietrzania komory |
| 8) zawory procesowe | 20) butla ze sprężonym powietrzem |
| 9) czujnik ciśnienia | 21) reduktor ciśnienia |
| 10) elektrozawór | 22) elektrozawór sprężonego powietrza, powietrze sterujące pompą |
| 11) wtrysk elektromagnetyczny | 23) przyłącze sprężonego powietrza w gardzieli zalewania |
| 12) układ sterowania wtryskiem | 24) 5-litrowa komora badawcza |

Rys. 9.2. Schemat funkcjonalny stanowiska badawczego z przepływem mediów i sygnałów
 [Toman i Adamus, 2023]

9.1.2. Procedura badawcza dla różnych czasów opóźnienia zapłonu

Na podstawie otrzymanych wyników badań, w procedurze badawczej uwzględniono różne czasy opóźnienia zapłonu po procesie atomizacji. Każda ciecz posiada swoje właściwości fizykochemiczne, takie jak: lepkość, gęstość, napięcie powierzchniowe czy szybkość parowania. Te właściwości wpływają na tworzenie aerozolu i jego podatność na zapłon. Dlatego, aby dokładnie określić charakterystykę wybuchowości i zapalności aerozoli, konieczne jest uwzględnienie różnych czasów opóźnienia zapłonu. W praktyce oznacza to konieczność przeprowadzenia serii testów, które pozwolą na określenie optymalnych warunków zapłonu. Zmienny czas opóźnienia zapłonu powinien zostać uwzględniony już na etapie ustalania badań. Ma to na celu uzyskanie dokładniejszych i bardziej reprezentatywnych wyników dla każdego rodzaju cieczy. Uzyskane w ten sposób wyniki badań dostarczają dokładniejszych informacji o zachowaniu się aerozolu w różnych warunkach. Na wykresie (rys. 9.3) przedstawiono sekwencje poszczególnych czasów w trakcie przeprowadzania badań.



Rys. 9.3. Wykres czasowy procesu atomizacji i opóźnienia zapłonu [Toman i Adamus, 2024]

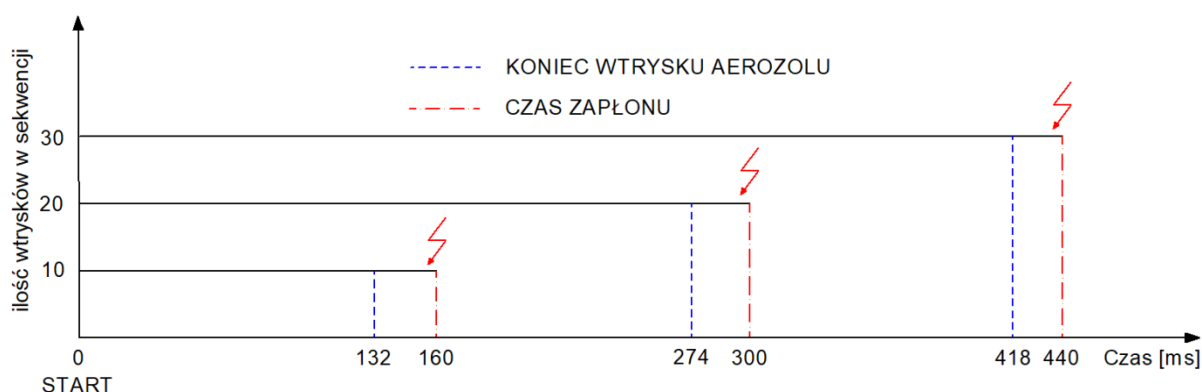
Po procedurze startu urządzenia przeprowadzany jest sekwencyjny wtrysk składający się z dziesięciu pojedynczych rozpyleń aerozolu. Czas trwania całej sekwencji wynosi około 130 ms. W przypadku nafty, przy ciśnieniu 150 barg, uzyskano maksymalne stężenie aerozolu wynoszące 336 g/m³. Aby zminimalizować wpływ turbulencji na proces zapłonu, kluczowe jest zastosowanie odpowiedniego czasu opóźnienia zapłonu. Ten czas definiuje odstęp między zakończeniem procesu tworzenia aerozolu (koniec wtrysku) a inicjacją zapłonu.

Dla pyłów czasy opóźnienia zapłonu są znormalizowane, a dla aerozoli cieczy przeprowadzono również testy bezpośrednio po zakończeniu wtrysku, czyli w warunkach maksymalnej turbulencji. Omówiona metoda wytwarzania aerozolu umożliwia znaczne ograniczenie turbulencji w porównaniu z metodami wykorzystującymi sprężone powietrze,

stosowanymi przez innych badaczy, które wiążą się z wyższym poziomem turbulencji, co może dodatkowo wpływać na ruch kropli w aerozolu oraz przyspieszać proces parowania.

9.1.3. Procedura badawcza w celu zwiększenia zakresu stężeń

Sekwencja dziesięciu wtrysków (rys. 9.3) pozwala na prowadzenie badań w ograniczonym zakresie stężeń aerozolu. W przypadku cieczy, dla której aerozol nie osiągnął jeszcze przedziału parametrów wybuchowości, takie ustawienie może okazać się niewystarczające. W celu rozszerzenia zakresu stężeń w badaniach aerozolu można zastosować większą liczbę wtrysków w sekwencji. Takie rozwiązanie wiąże się jednak z wydłużeniem czasu wytwarzania aerozolu oraz ze wzrostem ilości par. Wydłużenie czasu może dodatkowo wpłynąć na rozkład wytworzonych cząsteczek cieczy. Metoda ta została wykorzystana w pracy Toman i Adamusa (2023) podczas badań z izopropanolem, w której dzięki zwiększeniu liczby wtrysków, było możliwe uzyskanie szerszego zakresu stężeń badawczych (rys. 9.4).



Rys. 9.4. Wykres czasowy dla 10, 20 i 30 wtrysków z opóźnieniem zapłonu w danej sekwencji [Toman i Adamus, 2023]

Dla sekwencji dziesięciu wtrysków maksymalne stężenie izopropanolu wynosiło 315 g/m^3 . W celu rozszerzenia zakresu badań zwiększono liczbę wtrysków, co pozwoliło na osiągnięcie wyższych stężeń aerozolu. Najpierw zwiększono liczbę wtrysków do dwudziestu, co wydłużyło czas wtrysku do 274 ms, a następnie do trzydziestu, przy czasie 418 ms. W wyniku tych modyfikacji uzyskano maksymalne stężenie aerozolu na poziomie $1\,000 \text{ g/m}^3$.

Z każdą zmianą liczby wtrysków odpowiednio dostosowywano czas opóźnienia zapłonu, aby zapewnić powtarzalność wyników i zachować optymalne warunki zapłonu. Przedstawioną metodologię można również zastosować do innych cieczy, dostosowując liczbę wtrysków i czasy opóźnienia zapłonu do ich właściwości fizykochemicznych.

9.2. Oznaczanie parametrów wybuchowości i zapalności

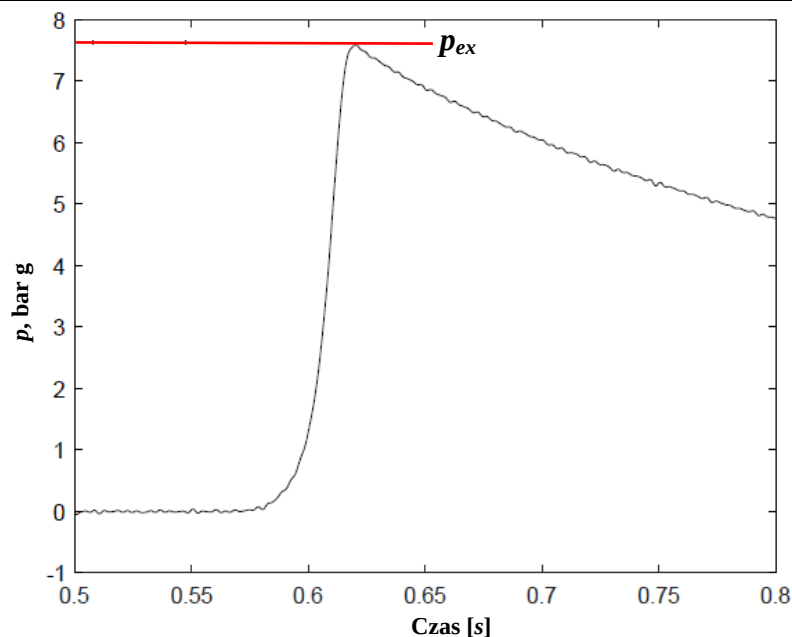
W badaniach nad właściwościami wybuchowymi aerozoli cieczy palnych, identyfikującym jest użycie terminu **parametry zapalności i wybuchowości**, dla podkreślenia różnicy między nimi a właściwościami fizycznymi. Parametry zapalności i wybuchowości nie są wyłącznie funkcją właściwości badanej substancji, lecz w dużym stopniu zależą także od zastosowanej metody oznaczania, jak wskazał Dyduch (2017). Zasady te odnoszą się również do badań aerozoli cieczy palnych. Podobnie jak w przypadku gazów czy pyłów, metody oznaczania parametrów aerozoli powinny być precyzyjnie określone. Tylko, przestrzegając ustalonych procedur można oczekiwać uzyskania tych samych wyników. Zarówno dla wspomnianych gazów i pyłów, jak i dla aerozoli, eksperymetatorzy dążą do oznaczenia tych samych parametrów. Różnica polega na tym, że badania nad aerozolami są przeprowadzane według różnych metod. Łączy je jednak wspólny cel, oznaczanie parametrów takich jak:

- maksymalne ciśnienie wybuchu p_{max} ,
- maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{max}$,
- dolna granica wybuchowości (DGW),
- minimalna energia zapłonu (MIE).

9.2.1. Oznaczanie parametrów wybuchowości

Maksymalne ciśnienie wybuchu zarówno dla aerozoli, jak i dla innych mediów, których oznaczanie parametrów jest znormalizowane powinno odpowiadać maksymalnej wartości nadciśnienia powstającego w zamkniętym zbiorniku, po zainicjowaniu wewnątrz atmosfery wybuchowej.

Najwyższe zarejestrowane nadciśnienie wybuchu p_{ex} oraz szybkość wzrostu ciśnienia $(dp/dt)_{ex}$ opisują gwałtowność reakcji wybuchu mieszaniny aerozol-powietrze, po jej zapłonie w zamkniętym naczyniu. Przykładowy przebieg przyrostu ciśnienia w czasie, z wyraźnym zaznaczeniem najwyższego ciśnienia p_{ex} , dla testu przeprowadzonego przy ustalonym stężeniu aerozolu, został przedstawiony na rysunku 9.5.



Rys. 9.5. Przebieg przyrostu ciśnienia z zaznaczonym maksymalnym ciśnieniem wybuchu (p_{ex}) dla aerozolu izopropanolu (oprac. własne)

Dane pomiarowe z przebiegu ciśnienia są zbierane w formacie tekstowym umożliwiającym łatwe wprowadzenie ich do arkuszy kalkulacyjnych i programów specjalistycznych. Z zależności ciśnienia w funkcji czasu jest wyznaczona maksymalna szybkość narastania ciśnienia $(dp/dt)_{ex}$. Dla przebiegu przyrostu ciśnienia oblicza się pochodną na podstawie różnic skończonych, które w ogólnym ujęciu można przedstawić wzorem (9.1):

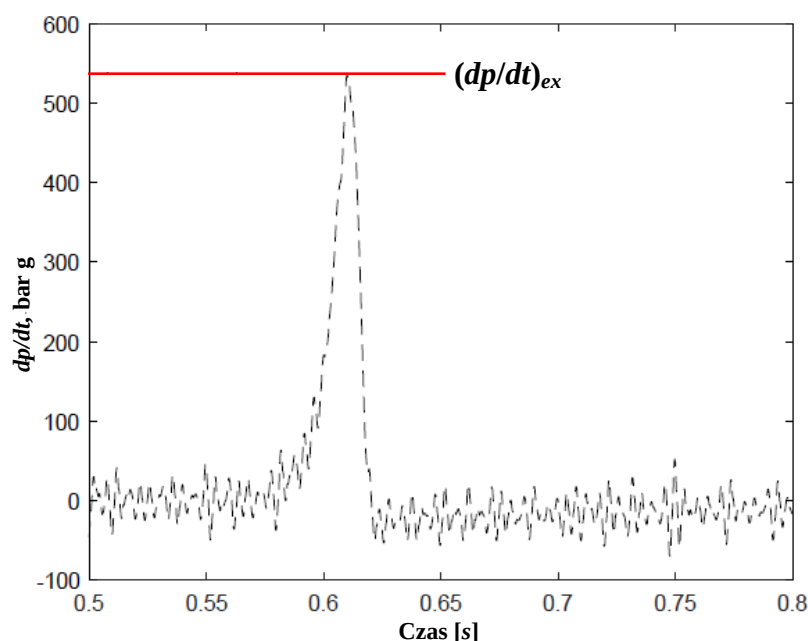
$$\left(\frac{dp}{dt}\right) \approx \frac{P_{i+1} - P_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (9.1)$$

gdzie:

P_i i P_{i+1} – kolejne wartości ciśnienia,

t_i i t_{i+1} – czasy odpowiadające wartościom ciśnienia.

Najwyższa wartość w ciągu czasowym reprezentuje maksymalną szybkość przyrostu ciśnienia $(dp/dt)_{ex}$, którą przedstawiono na rysunku 9.6.



Rys. 9.6. Przebieg wyznaczonej wartości szybkości narastania ciśnienia (dp/dt) w funkcji czasu z przebiegu ciśnienia (P) dla aerozolu izopropanolu (oprac. własne)

Zależność tę można również wyznaczyć z wykorzystaniem metody analitycznej dla funkcji dopasowanej do danych $P(t)$, z aproksymacji krzywej: (9.2)

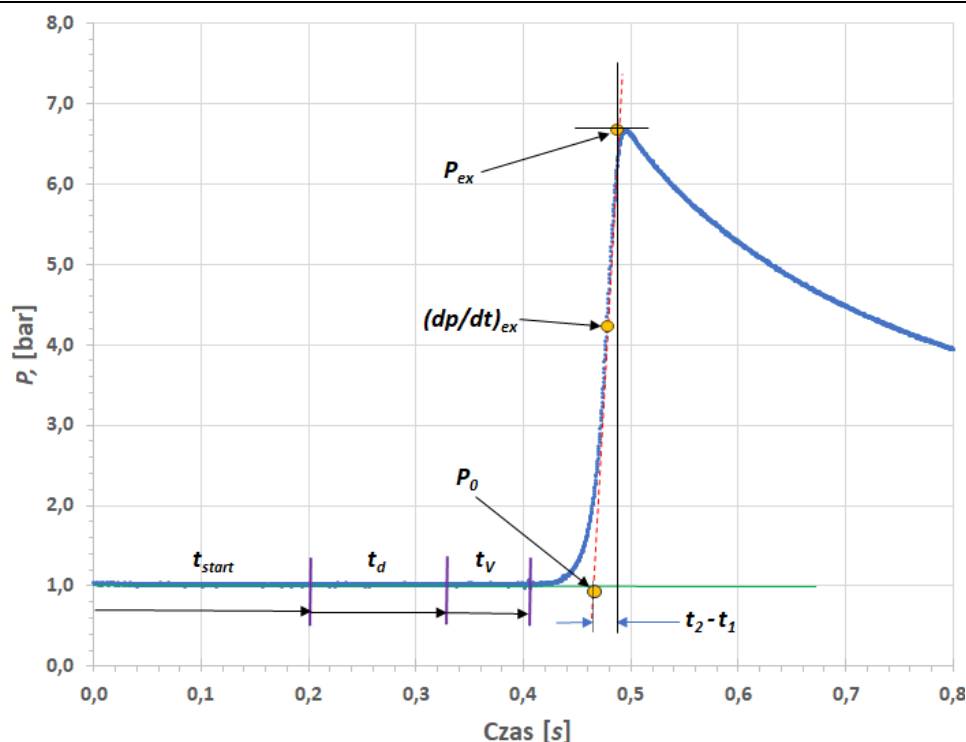
$$P(t) = f(t) \quad (9.2)$$

obliczając pochodną funkcji (9.3):

$$\frac{dP}{dt} = \frac{df(t)}{dt} \quad (9.3)$$

W celu zobrazowania wyznaczania $(dp/dt)_{ex}$ (rys. 9.7), do krzywej dopasowano prostą, gdzie nachylenie ciśnienia jest najwyższe, od ciśnienia początkowego (P_0) do najwyższego (p_{ex}). Punkt przegięcia przyjęto jako $(dp/dt)_{ex}$. Taką metodę wyznaczania maksymalnego przyrostu ciśnienia zastosowali Wang i in. (2021) (9.4):

$$(dp/dt)_{ex} = \frac{P_{ex} - P_0}{t_2 - t_1} \quad (9.4)$$



Rys. 9.7. Wykres przyrostu ciśnienia (p) i graficzna metoda wyznaczania $(dp/dt)_{ex}$ z zaznaczonymi najważniejszymi elementami opisującymi histogram (oprac. własne)

Na wykresie (rys. 9.7) wyróżniono najważniejsze punkty histogramu przebiegu ciśnienia, to jest:

- czas procedury startowej urządzenia (t_{start}),
- czas wytwarzania aerozolu (t_d),
- czas opóźnienia zapłonu (t_v).

Jak wspomniano w podrozdziale 9.1.3 badania można przeprowadzić dla różnych sekwencji wtrysku. Każda z zastosowanych sekwencji (10, 20, 30) charakteryzuje się indywidualnym czasem dyspersji (t_d). Jest to istotne dla odpowiedniego ustawienia czasu opóźnienia zapłonu (t_v), co oprócz siły wybuchu, ma wpływ na czas potrzebny do zapalenia się aerozolu po uruchomieniu źródła zapłonu. Kiedy na mieszanke paliw oddziałują określone warunki termodynamiczne (ciśnienie i temperatura), utlenianie i wytwarzanie ciepła wymaga pewnego czasu. Dzięki sterowanemu opóźnieniu zapłonu możemy wpływać na stopień turbulencji, w szczególności na maksymalną szybkość wzrostu ciśnienia, tj. $(dp/dt)_{ex}$. Wzrost turbulencji powoduje zazwyczaj zwiększenie siły wybuchu i odwrotnie. W przypadku pyłów czas ten został znormalizowany na poziomie 60 ms dla komory 20-litrowej. Dla aerozoli, ze względu na brak znormalizowanej metody, czasu takiego nie wyznaczono.

W odróżnieniu od innych metod, w których zastosowano wtrysk paliwa do wytwarzania aerozolu, zastosowana metoda, jak można zauważyć z przebiegu ciśnienia (rys. 9.7) nie powoduje przyrostu ciśnienia podczas dyspersji. Możliwy maksymalny wzrost ciśnienia, przy najwyższym badanym stężeniu $1\,000\text{ g/m}^3$, wynosi około 0,1% ciśnienia początkowego. Ma to między innymi wpływ na bardzo niską turbulencję, nawet w trakcie wytwarzania aerozolu.

Do oznaczenia zarówno p_{max} , jak i $(dp/dt)_{max}$ dla pyłów, gazów, par i aerozoli należy wziąć również pod uwagę, że parametry te są na ogół zależne od temperatury początkowej. Dla aerozolu nafty taki wpływ omówiono w rozdziale 8.6.

Istotne dla oznaczania parametrów jest także ciśnienie początkowe. Wskaźniki wybuchowości p_{max} i $(dp/dt)_{max}$ są wprost proporcjonalne do ciśnienia początkowego w kuli podczas zapłonu. Podstawowe parametry powinny być oznaczone przy ciśnieniu atmosferycznym i w temperaturze około 20°C .

Tak jak w przypadku pyłów, zgodnie z instrukcją KSEP, w której pyły dzieli się na zależne od energii zapłonu i obojętne, również w przypadku aerozoli może to mieć istotne znaczenie. Dla pyłów i gazów energia źródła zapłonu jest ściśle określona w normach. Natomiast w dotychczasowych badaniach nad wybuchowością aerozoli stosowano różne źródła zapłonu o różnych wartościach wydzielanej energii.

Zarówno maksymalne ciśnienie wybuchu p_{max} , jak i maksymalna szybkość narastania ciśnienia $(dp/dt)_{max}$ są kluczowymi parametrami charakterystyki wybuchu. Umożliwiają one ocenę niebezpieczeństwa wynikającego z możliwości wybuchu aerozoli w różnych warunkach. W analizie należy jednak uwzględnić prawo objętościowe, omówione szczegółowo w rozdziale 6.

Istotnym parametrem wybuchowości, jest również dolna granica wybuchowości (DGW).

Dolna granica wybuchowości

Mieszanina utleniacza i paliwa zapala się tylko w określonym zakresie stężeń. Jeśli stężenie palnej mieszanki spadnie poniżej pewnego punktu, staje się ona zbyt uboga, aby zaistniało spalanie. Ten punkt nazywany jest dolną granicą wybuchowości [Addai, 2015]. Za dolną granicę wybuchowości mieszanin hybrydowych uważa się najniższe stężenie paliwa w różnych stanach skupienia z powietrzem, poniżej którego samopodtrzymujące się rozprzestrzenianie płomienia nie jest możliwe.

Granice wybuchowości w przypadku pyłów nie mają takiego samego znaczenia jak w przypadku gazów i par. Obłoki pyłów są zazwyczaj niejednorodne [PN-EN 1127-1 2019] i tego samego powinniśmy się spodziewać po aerozolah.

Podobnie jak w przypadku oznaczania innych wskaźników wybuchowości, również oznaczenie *DGW* zależy od wielu zmiennych, które mogą zaważyć na wyniku badań. Określanie granic wybuchowości zarówno gazów, par cieczy jak i pyłów odbywa się według ustalonych norm [PN-EN 1839:2017-02, PN-EN 14034-3]. Wynik oznaczenia *DGW* dla pyłów zależy między innymi od wielkości cząstek badanego materiału, zawartości wilgoci, substancji lotnych i temperatury. Wzrost wielkości cząstek prowadzi do zmniejszenia powierzchni właściwej, co zmniejsza efektywne ogrzewanie, zmniejszając obszar do przereagowania. Znaczący wpływ ma również temperatura badania. Wyższa temperatura wpływa na niższą zawartość tlenu w trakcie badania. Obniżenie zawartości utleniacza może skutkować wyższym *DGW*. Duży wpływ może mieć także zastosowane źródło zapłonu. W przypadku pyłów, zgodnie ze wspomnianą powyżej normą, używane jest chemiczne źródło zapłonu o energii 2×1 kJ. Dla *DGW* gazów i par cieczy norma sugeruje zastosowanie iskry indukcyjnej o energii 10 W lub drutu topikowego o energii od 10 J do 20 J. Wszystkie wspomniane warunki badań mają również znaczący wpływ na wynik *DGW* aerozoli. Dolną granicę wybuchowości dla gazów i par cieczy opisuje się jako stężenie procentowe (%), natomiast dla pyłów i aerozoli używana jest jednostka g/m^3 .

Zgodnie z instrukcją KSEP, oznaczania *DGW* dla pyłów rozpoczyna się od możliwie najmniejszego stężenia. Następnie jest ono systematycznie zwiększane i zwielokrotniane do momentu uzyskania zapłonu. Test należy powtórzyć, zmniejszając stężenie o 10 g/m^3 . Uzyskanie pozytywnego wyniku skutkuje kolejnym zmniejszeniem stężenia o 10 g/m^3 , do momentu osiągnięcia stężenia, dla którego nie uzyska się zapłonu. Test ten powtarza się trzykrotnie. Jeżeli we wszystkich trzech testach nie osiągnie się kryterium zapłonu, uznaje się to stężenie jako *DGW*. W przypadku kiedy uzyska się zapłon w chociaż jednym powtórzeniu, obniża się stężenie tak, jak wcześniej o 10 g/m^3 , do uzyskania pożądanego efektu, czyli braku zapłonu w trzech testach. Podobny sposób badania zastosowano do określania *DGW* dla aerozoli. Należy mieć jednak na uwadze, jak przedstawia Gant (2013), że na wartości *DGW* aerozoli można wpływać przy użyciu różnych aparatów doświadczalnych, różnych źródeł zapłonu oraz wytwarzaną wielkością kropel. Jako kryterium zapłonu aerozoli, podobnie jak w pracach innych eksperymentatorów [EL-Zahlani i in., 2020], w niniejszej pracy przyjęto, że wynik pozytywny występuje, gdy przyrost ciśnienia przekracza wartość 0,5 bara.

9.2.2. Oznaczenie parametru zapalności

Różne źródła zapłonu są wykorzystywane do określania parametrów zapalności pyłów, gazów czy par cieczy. Jednym z takich źródeł może być wyładowanie iskrowe. Elektryczność statyczna, będąca powszechnym zjawiskiem zarówno w przemyśle, jak i w życiu codziennym, często powstaje niezauważona. Jednak w kontakcie z substancjami łatwopalnymi może stanowić skuteczne źródło zapłonu, co czyni ją istotnym czynnikiem ryzyka. W przypadku pyłów i gazów test zapłonu od iskrowego źródła zapłonu przeprowadza się przy użyciu specjalistycznego sprzętu w celu określenia minimalnej energii zapłonu (*MIE*) [PN-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016].

Minimalna energia zapłonu

Badania eksperymentalne, mające na celu oznaczanie *MIE* dla pyłu lub gazu, znacznie się różnią. W przypadku gazów zapłon mieszanki następuje w stanie spoczynku [Uchman i Werle, 2018]. W przypadku pyłu występuje wiele zmiennych czynników, a odpowiednia synchronizacja powstawania obłoku pyłu i zapłonu ma ogromne znaczenie. Synchronizacja między wytwarzaniem przejściowego obłoku pyłu i iskrą, jest niezbędna przy badaniu *MIE* obłoków pyłu [Randeberg in., 2007]. Minimalna energia zapłonu jest zatem mierzona przy różnych koncentracjach pyłu, w celu znalezienia optymalnego stężenia i najniższego możliwego poziomu turbulencji. Jest ona zmniejszana przez wydłużenie czasu opóźnienia zapłonu, zgodnie z normą [PN-EN 13821:2004, PN-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016]. Niestety, nie ma standardowego sprzętu i procedury oznaczania *MIE* dla aerozoli cieczy palnych, jak ma to miejsce w przypadku pyłów i gazów. Ze względu na działanie sił grawitacyjnych na cząstki aerozolu cieczy zawieszone w powietrzu, aerozole w tym przypadku wydają się być bliżej pyłów niż gazów.

Zagrożenie pożarem lub wybuchem pojawia się, gdy energia wyładowania elektrostatycznego osiąga wartość porównywalną z minimalną energią zapłonu obecnego medium. Wartość ta charakteryzuje zapalność materiału. Jest to najmniejsza wartość energii wyładowania elektrostatycznego, zdolna do zapalenia danej substancji łatwopalnej lub zainicjowania wybuchu mieszaniny utworzonej przez tę substancję z powietrzem lub tlenem.

W używanym aparacie testowym, jako źródło zapłonu stosuje się układ zapłonowy z indukcyjnością lub bez indukcyjności, tzw. pojemnościowy. Stosowane źródło zapłonu opisano w rozdziale 7.3.

Eksperymenty przeprowadzono w temperaturach od 21 do 22°C.

Zastosowano sekwencyjny wtrysk dziesięciu pojedynczych rozpyleń zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 9.1.2. W tym badaniu, zgodnie z procedurą określoną w normach [PN-EN-13821:2004, PN-EN-80079-20-2:2016] dla pyłów przeprowadzono testy dla różnych opóźnień zapłonu przy różnych stężeniach. Zgodnie z zaleceniami norm testy przeprowadzono również w warunkach możliwie najniższej turbulencji, którą w zastosowanej aparaturze osiągnięto przez odpowiednie opóźnienie zapłonu. Poziom turbulencji powinien być zmniejszany do wartości określonej jako możliwa dla aparatury. Biorąc pod uwagę, że badane jest inne medium niż pył, testy zapłonu przeprowadzono również po zakończeniu wtrysku (bezpośrednio) zgodnie z procedurą (rys. 9.3).

9.3. Postępowanie w metodzie badawczej

Założenia przyjętej w pracy doktorskiej metody badawczej umożliwiają oznaczanie parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych. Opracowany uogólniony schemat metody (rys. 9.8) stanowi wieloetapowy algorytm decyzyjny, integrujący procedury przygotowawcze, operacyjne i walidacyjne. Proces został podzielony na trzy główne etapy: **przygotowanie do badań, wykonanie badań oraz opracowanie wyników.**

Proces rozpoczyna się od zebrania danych wejściowych, obejmujących właściwości fizykochemiczne cieczy, takie jak lepkość, gęstość czy napięcie powierzchniowe, które wpływają na zachowanie aerozolu.

Przygotowanie do badań

Pierwszym głównym etapem jest przygotowanie do badań, które obejmuje:

- Napełnienie układu cieczą, odpowietrzenie oraz sprawdzenie szczelności instalacji;
- Przeprowadzenie testu wydajnościowego wtrysku, mającego na celu ocenę stabilności i powtarzalności generowania stężenia w ustalonym zakresie. Pozytywny wynik testu umożliwia kontynuację badań; brak zgodności wydajnościowej wymaga ponownego odpowietrzenia układu, sprawdzenia stabilności ciśnienia przed wtryskiem oraz zapewnienia jednakowego ciśnienia dla wszystkich testów;
- Pomiar rozdrobnienia aerozolu, który pozwala określić charakterystykę dyspersji dla badanego aerozolu cieczy. Wynik powinien mieścić się w zakresie średniej średnicy Sautera 10–50 μm ; wynik negatywny wymaga korekty ciśnienia przed

wtryskiem lub wymiany wtrysku. Każde działanie korygujące wymaga ponownego przeprowadzenia testu wydajnościowego wtrysku;

- Zakres badań ustalany jest na podstawie potrzeb eksperymentalnych, co determinuje wybór odpowiedniej procedury badawczej dla oznaczenia wybranego parametru.

Wykonanie badań

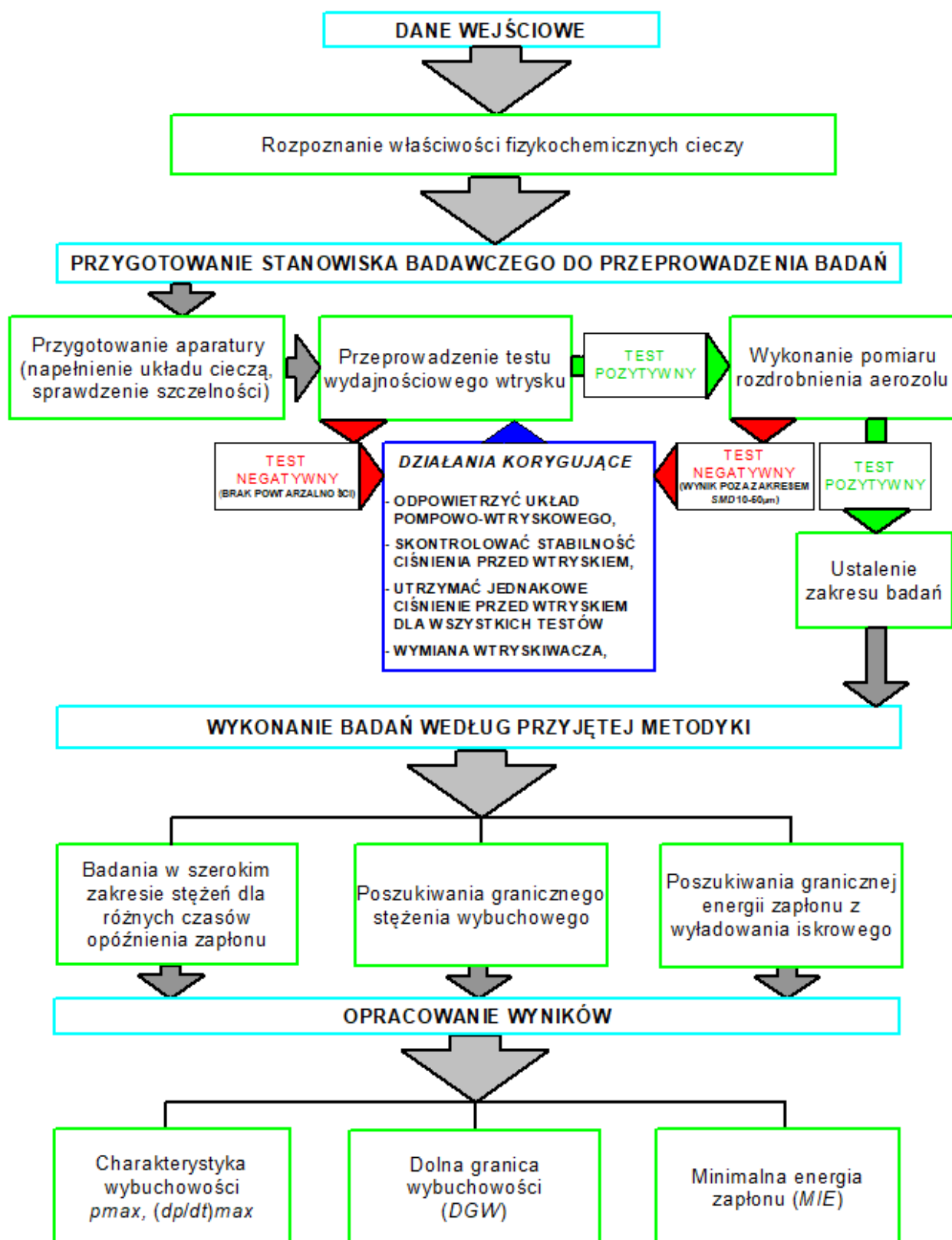
Kolejny etap to wykonanie badań według przyjętej metodyki:

- Dla oznaczenia parametrów wybuchowości p_{max} i $(dp/dt)_{max}$ konieczne jest przeprowadzenie testów w szerokim zakresie stężeń ze źródłem zapłonu o stałej ustalonej energii;
- Oznaczenie dolnej granicy wybuchowości (DGW) realizuje się dla najniższych stężeń, przy których aerozol staje się niewybuchowy;
- Minimalną energię zapłonu (MIE) realizuje się w szerokim zakresie stężeń ze źródłem zapłonu o zmiennej energii.

Opracowanie wyników.

Na podstawie uzyskanych danych opracowywane są wyniki badań. Dane są przetwarzane za pomocą specjalistycznego oprogramowania, a wyniki przedstawiane są w formie wykresów, umożliwiających ich wizualizację i interpretację. Dla każdego oznaczonego parametru przeprowadzono odrębny przebieg analizy, umożliwiający wizualizację wyników oraz ich interpretację. Ostatecznie oznaczono parametry charakteryzujące wybuchowość i zapalność aerozolu:

- Maksymalne ciśnienie wybuchu (p_{max}) oraz maksymalną szybkość narastania ciśnienia $(dp/dt)_{max}$;
- Dolną granicę wybuchowości (DGW);
- Minimalną energię zapłonu (MIE).



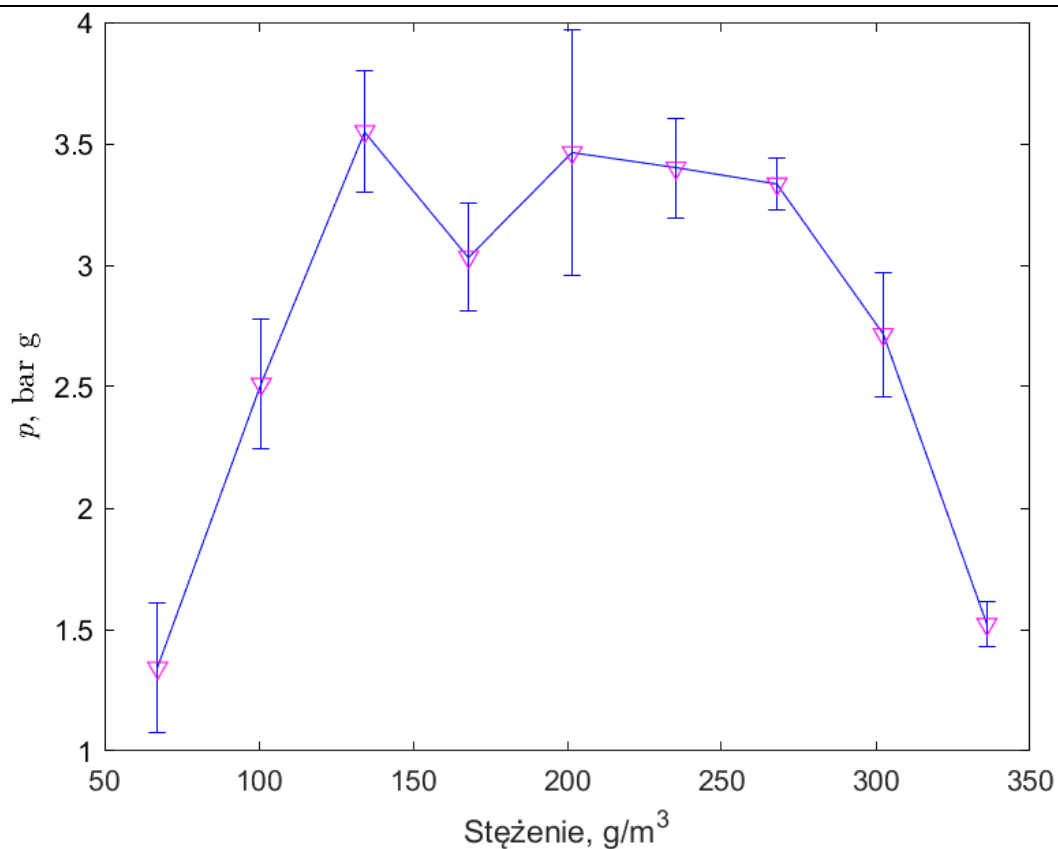
Rys 9.8. Schemat postępowania w opracowanej metodzie badawczej pracy doktorskiej

10. Wyniki badań

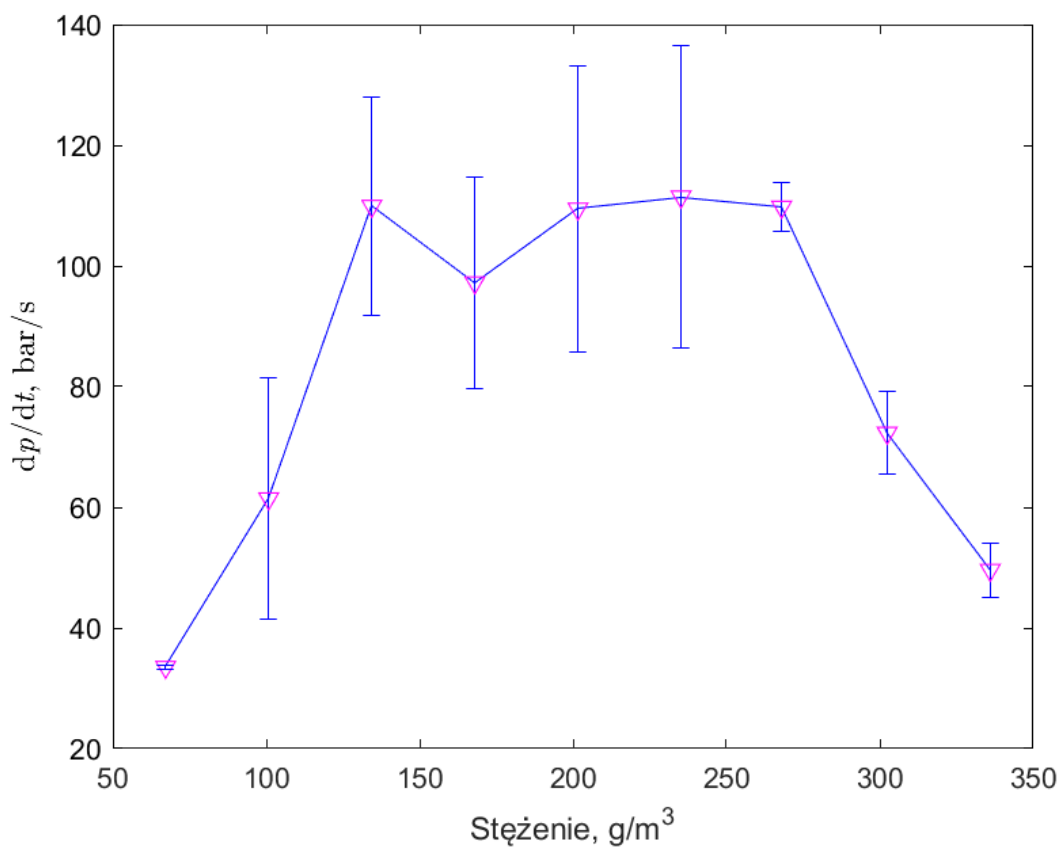
10.1. Oznaczanie parametrów wybuchowości p_{max} i $(dp/dt)_{max}$ dla aerozoli

W skonstruowanym urządzeniu przeprowadzono serię testów mających na celu oznaczenie charakterystyki wybuchowości wybranych aerozoli cieczy palnych. Podstawowym założeniem pomiarowym było wyznaczenie wartości maksymalnego ciśnienia wybuchu p_{max} oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia $(dp/dt)_{max}$ w funkcji stężenia aerozolu. We wszystkich przeprowadzonych testach zarejestrowano rozwój wybuchu poprzez pomiar ciśnienia wybuchu. Uzyskane wyniki posłużyły do obliczenia wskaźników szybkości przyrostu ciśnienia z zastosowaniem procedury przedstawionej w rozdziale 9.2.

Badania rozpoczęto od aerozolu nafty świetlnej firmy Dragon. Przeprowadzono je w warunkach ustalonych na podstawie wstępnych wyników testów w temperaturze 21–22°C. Wybrano ustawienie sekwencji 10 wtrysków, dla którego było możliwe zbadanie zakresu stężeń od 45 g/m³ do 336 g/m³. Proces atomizacji dla wszystkich badanych stężeń był ten sam i wynosił ~130 ms. Początkowo wykonano tylko jedną serię testów. Maksymalne ciśnienie wybuchu p_{max} w tej serii uzyskano przy stężeniu 200 g/m³ i wyniosło ono 4,1 barg. Maksymalną szybkość wzrostu ciśnienia $(dp/dt)_{max}$ osiągnięto natomiast w zakresie stężeń od 200 do 250 g/m³, uzyskując wynik 140 bar/s. Aby sprawdzić powtarzalność uzyskanych wyników przeprowadzono dodatkowe dwie serie. Do tych testów zakupiono jednak nową porcję nafty. Uzyskane wyniki dla wszystkich trzech serii z zaznaczonymi słupkami błędów przedstawiono na rysunkach 10.1–10.2. Zarówno p_{max} , jak i $(dp/dt)_{max}$ osiągają swoje maksymalne wartości w tym samym zakresie, co w pierwszej serii testów, choć ich wartości były nieco niższe.



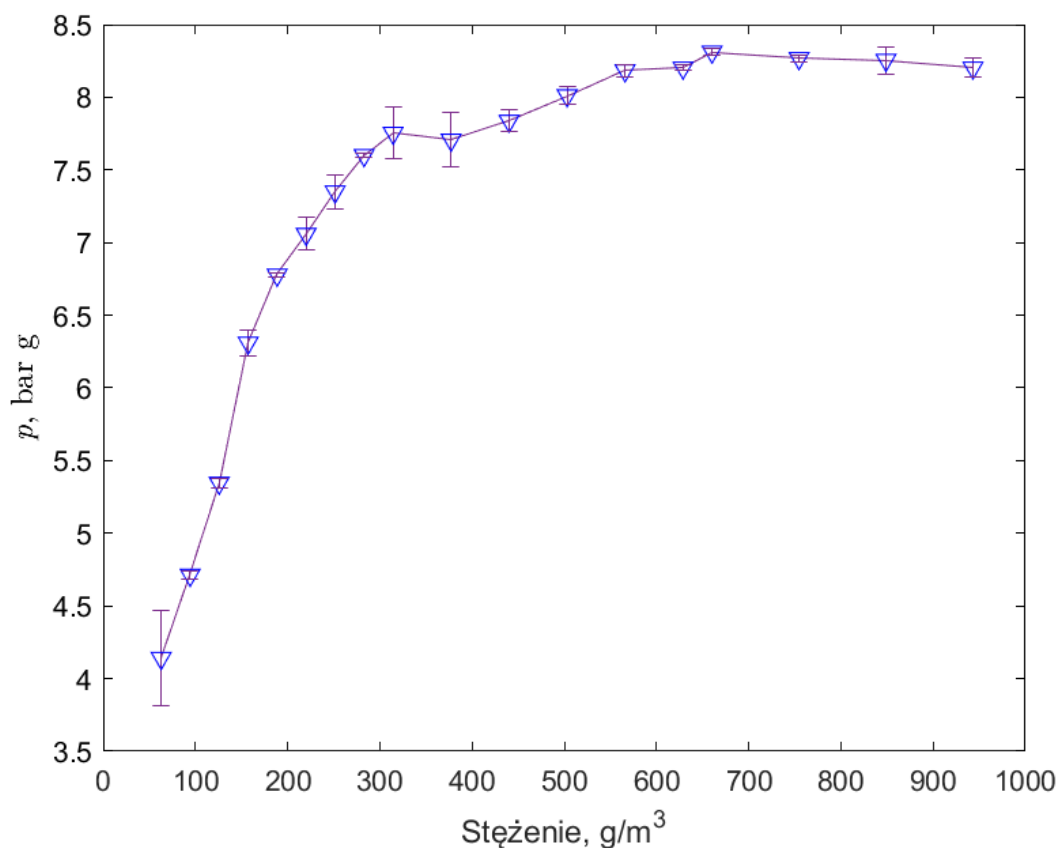
Rys. 10.1. Oznaczenie parametru wybuchowości p_{max} aerozolu nafty w zakresie stężeń 45 – 336 g/m^3
[Toman i Adamus, 2023]



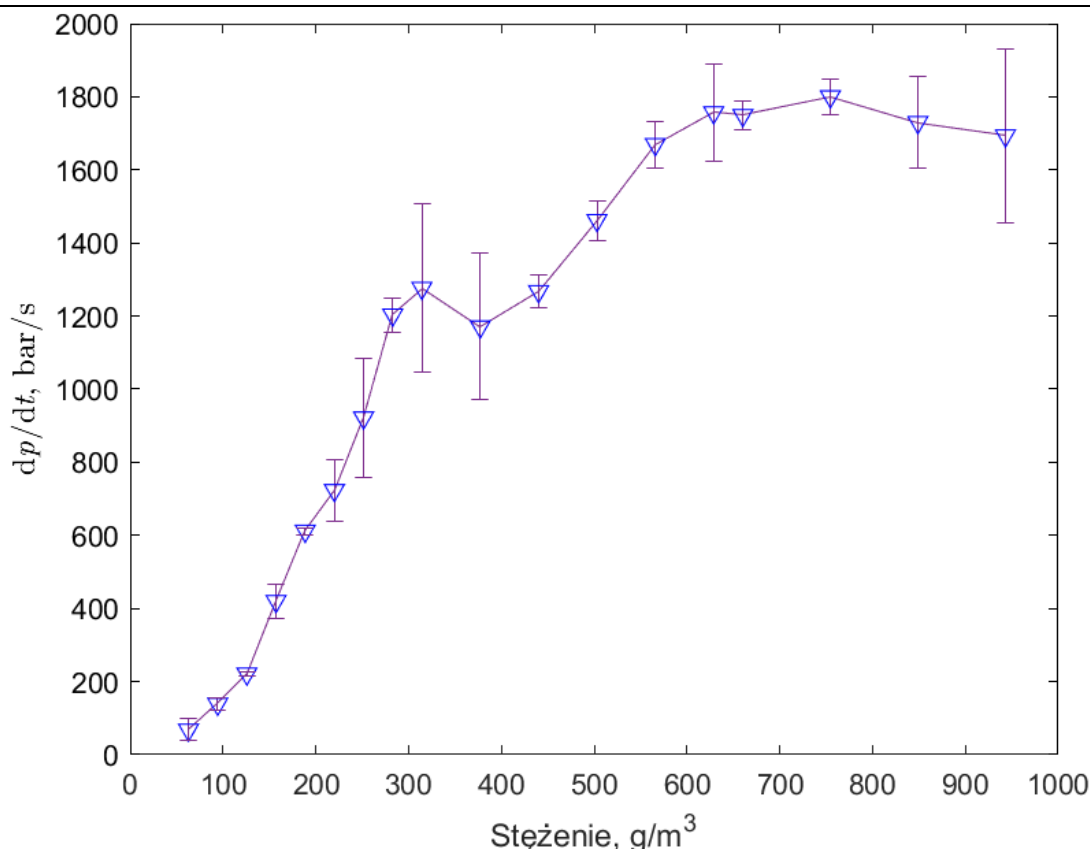
Rys. 10.2. Oznaczenie parametru wybuchowości $(dp/dt)_{max}$ aerozolu nafty w zakresie stężeń 45 – 336 g/m^3
[Toman i Adamus, 2023]

Na te różnice może mieć wpływ to, że do badań użyto nowo zakupioną naftę świetlną. Powyżej stężenia 250 g/m^3 wartości zarówno ciśnienia, jak i szybkości wzrostu ciśnienia, znacznie obniżyły się.

Badania właściwości wybuchowych aerozoli izopropanolu początkowo przeprowadzono w tych samych warunkach jak dla nafty, również w jednej serii [Toman i Adamus, 2022]. Zakres stężeń był podobny i wynosił $63\text{--}314 \text{ g/m}^3$. Przy najwyższym stężeniu nie osiągnięto jednak maksymalnej wartości p_{max} i $(dp/dt)_{max}$. Prowadzenie badań przy wyższych stężeniach wymagało modyfikacji sekwencji wtrysku. Dla uzyskania wyższego stężenia, sekwencję impulsów wydłużono najpierw do 20 wtrysków w czasie 274 ms, a następnie do 30 wtrysków w czasie 418 ms. Modyfikację ustawień przedstawiono na rysunku 9.4. Zmiany te umożliwiły osiągnięcie maksymalnego badanego stężenia 943 g/m^3 . Tak jak dla nafty, również dla izopropanolu wykonano dodatkową drugą i trzecią serię testów. Dodatkowe serie testów wykonano na tej samej próbce izopropanolu. Wyniki, obejmujące drugą i trzecią serię oraz słupki błędów, pokazano na rysunkach 10.3–10.4.



Rys. 10.3. Oznaczenie parametru wybuchowości p_{max} aerozolu izopropanolu w zakresie stężeń $63\text{--}943 \text{ g/m}^3$ [Toman i Adamus, 2023]

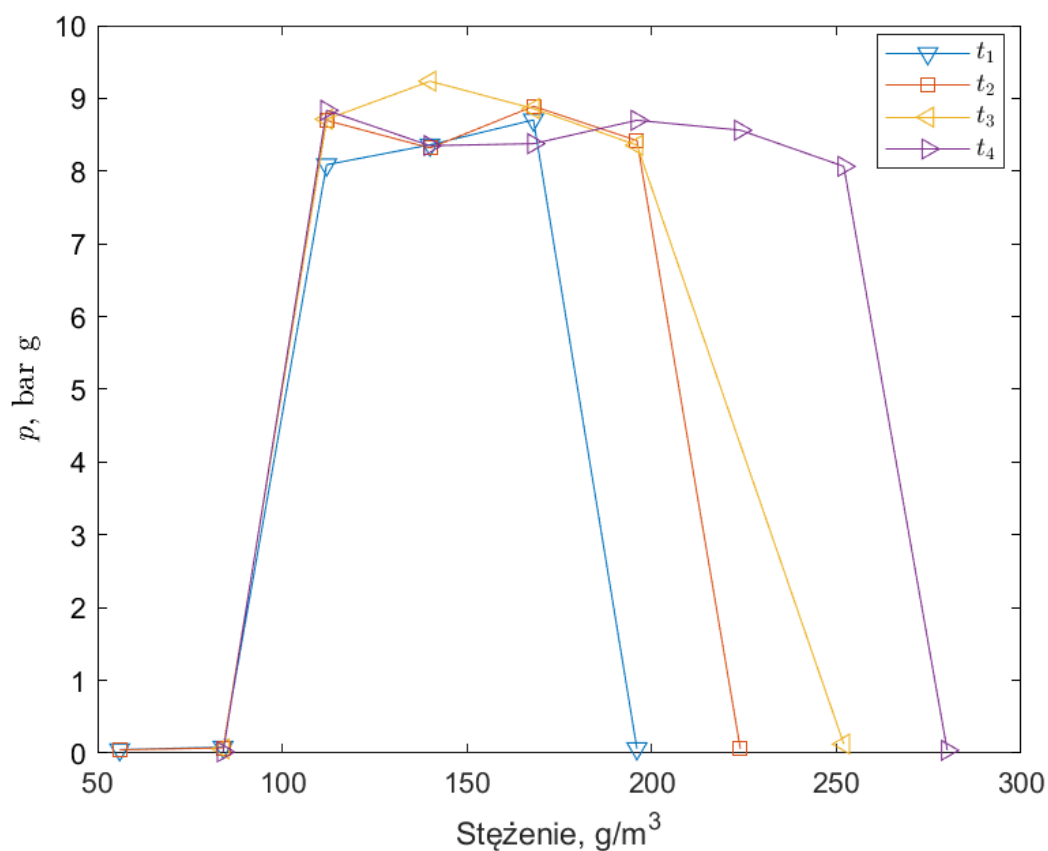


Rys. 10.4. Oznaczenie parametru wybuchowości $(dp/dt)_{max}$ aerozolu izopropanolu w zakresie stężeń 63 – 943 g/m^3 [Toman i Adamus, 2023]

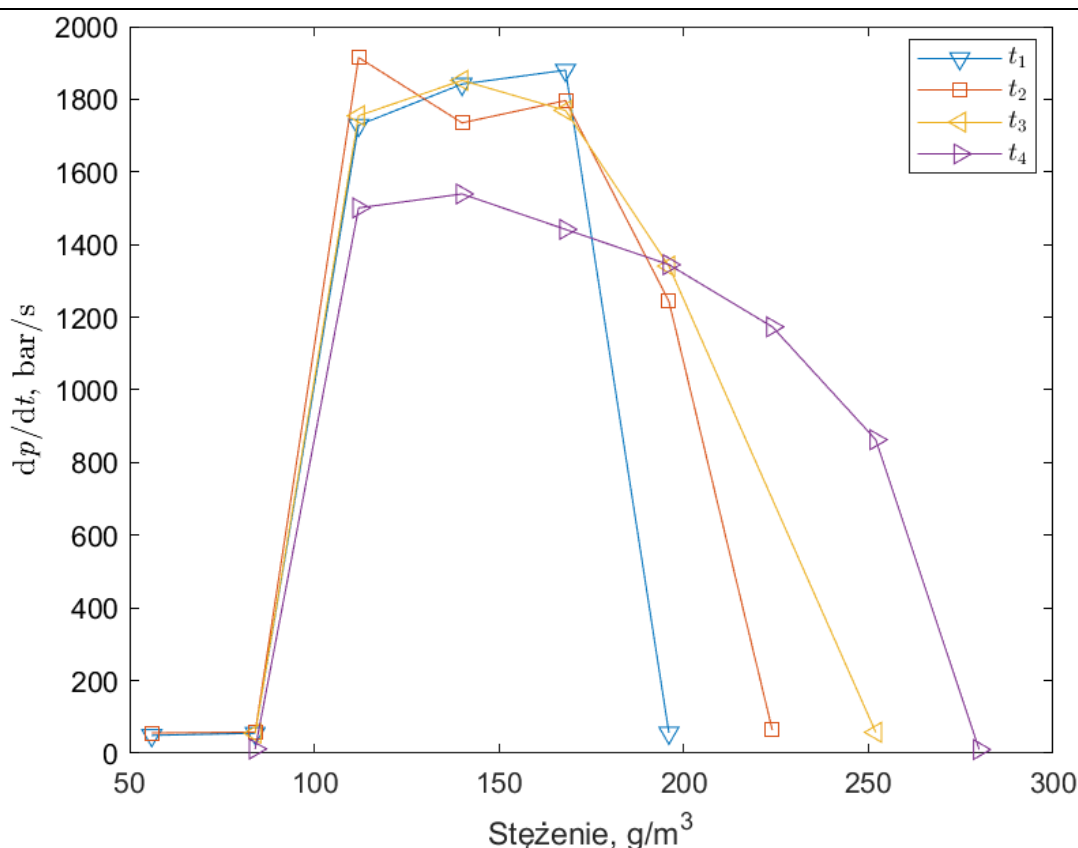
Uzyskane wyniki wskazują, że wartości ciśnienia nie maleją znacznie, nawet przy najwyższych badanych stężeniach. Najwyższe zarejestrowane ciśnienie p_{max} uzyskano przy stężeniu 660 g/m^3 , natomiast maksymalną szybkość przyrostu ciśnienia $(dp/dt)_{max}$ przy stężeniu 760 g/m^3 . Można jednak uznać, że maksymalne wartości ciśnienia i szybkości przyrostu ciśnienia uzyskano praktycznie w całym zakresie stężeń od około 600 g/m^3 do maksymalnego badanego stężenia 943 g/m^3 .

Kolejne badania zaprezentowane w pracy Tomana i Adamusa (2024) przeprowadzono dla aerozolu eteru dietylowego. Ze względu na specyficzne właściwości fizykochemiczne tej cieczy, podjęto decyzję o modyfikacji procedury badawczej. Charakterystyczną cechą, odróżniającą badaną ciecz od nafty, była kilkudziesięciokrotnie większa prężność par w warunkach normalnych. Ta termodynamiczna cecha w istotny sposób determinowała kinetykę parowania rozpylonego aerozolu, co znajduje odzwierciedlenie w charakterystykach rejestrowanych przez analizator Spraytec (rozdz. 8.4 – rys. 8.18–8.19). Skrócenie czasu opóźnienia zapłonu pozwala wprowadzić zmniejszyć ilość odparowanej cieczy, jednak prowadzi do mniej stabilnych warunków w obłoku aerozolu, gdzie ruch cząsteczek zdyspergowanej cieczy pozostaje turbulentny. Dlatego badania przeprowadzono dla

zróżnicowanych czasów opóźnienia zapłonu, stosując zmodyfikowaną procedurę pomiarową (rys. 9.3). W badaniach zastosowano najniższe z używanych pojemnościowe źródło zapłonu o energii 1 mJ. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 10.5–10.6.



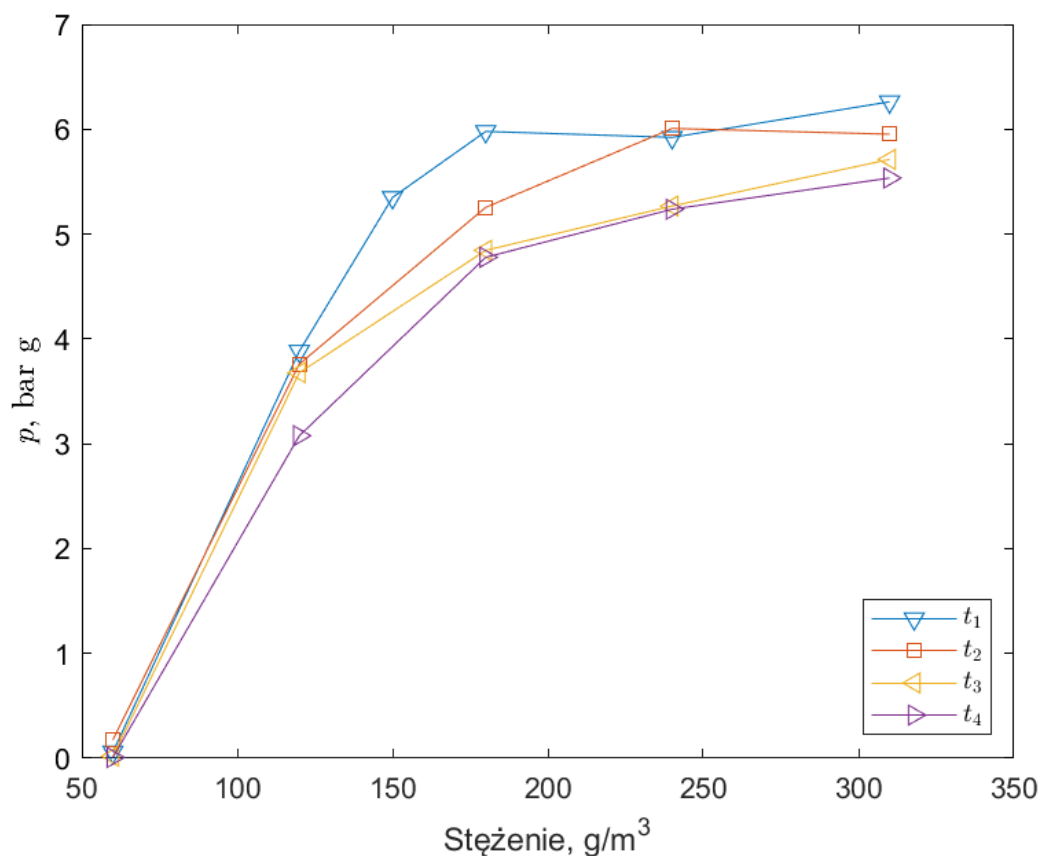
Rys. 10.5. Oznaczenie parametru wybuchowości $p_{\max}$ aerozolu eteru dietylowego dla różnych czasów opóźnienia zapłonu [Toman i Adamus, 2024]



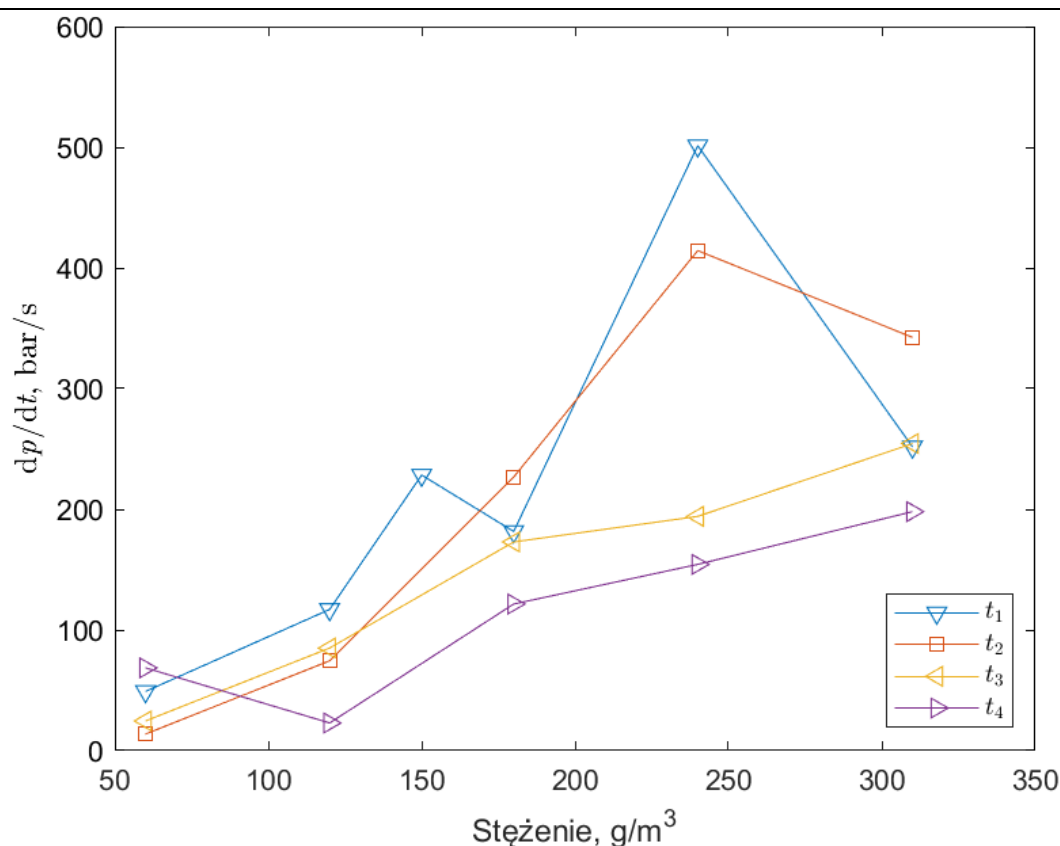
Rys. 10.6. Oznaczenie parametru wybuchowości $(dp/dt)_{max}$ aerozolu eteru dietylowego dla różnych czasów opóźnienia zapłonu [Toman i Adamus, 2024]

W analizowanym przypadku (rys. 10.5) dla aerozolu eteru dietylowego maksymalne ciśnienie wybuchu p_{max} uzyskano przy stężeniu 140 g/m^3 w czasie zapłonu t_3 , wynoszącym 20 ms, po zakończeniu procesu atomizacji. Jak podali autorzy pracy [Bai i Wang, 2015], ciśnienie szczytowe wybuchu mieszaniny gazowej eteru z powietrzem powinno teoretycznie osiągnąć maksymalną wartość przy stężeniu masowym 112 g/m^3 . Dla wszystkich czterech czasów opóźnienia zapłonu pierwszy wzrost ciśnienia odnotowano przy stężeniu 112 g/m^3 . W tym punkcie najniższe ciśnienie odnotowano dla czasu t_1 , kiedy można się spodziewać najwyższej turbulencji. Dla czasów t_2 , t_3 i t_4 wartości ciśnienia przy stężeniu 112 g/m^3 były na podobnym poziomie. Dla kolejnych stężeń również obserwowano zbliżone wyniki, z wyjątkiem wcześniej wspomnianego p_{max} . Najwyższe stężenie, przy którym odnotowano wzrost ciśnienia, stwierdzono dla czasu t_4 . Maksymalną szybkość wzrostu ciśnienia $(dp/dt)_{max}$ (rys. 10.6) uzyskano przy stężeniu 112 g/m^3 i czasie t_2 . Wartości $(dp/dt)_{max}$ dla czasów t_1 , t_2 i t_3 były bardzo zbliżone, osiągając około 1800 bar/s. Znacznie niższe wartości $(dp/dt)_{max}$ zaobserwowano natomiast dla najdłuższego czasu t_4 , kiedy szybkość stopniowo malała wraz ze wzrostem stężenia powyżej 150 g/m^3 .

W analogiczny sposób przeprowadzono badania dla aerozolu etanolu, stosując tę samą zmodyfikowaną procedurę badawczą, jednak z innym źródłem zapłonu. Jako inicjał zastosowano generator iskier indukcyjnych o stałej energii 7 J, użyty również w badaniach nafty i izopropanolu. Charakterystyka wybuchowości dla różnych czasów opóźnienia zapłonu przedstawiono na rysunkach 10.7–10.8.



Rys. 10.7. Oznaczenie parametru wybuchowości $p_{\max}$ aerozolu etanolu dla różnych czasów opóźnienia zapłonu (oprac. własne)

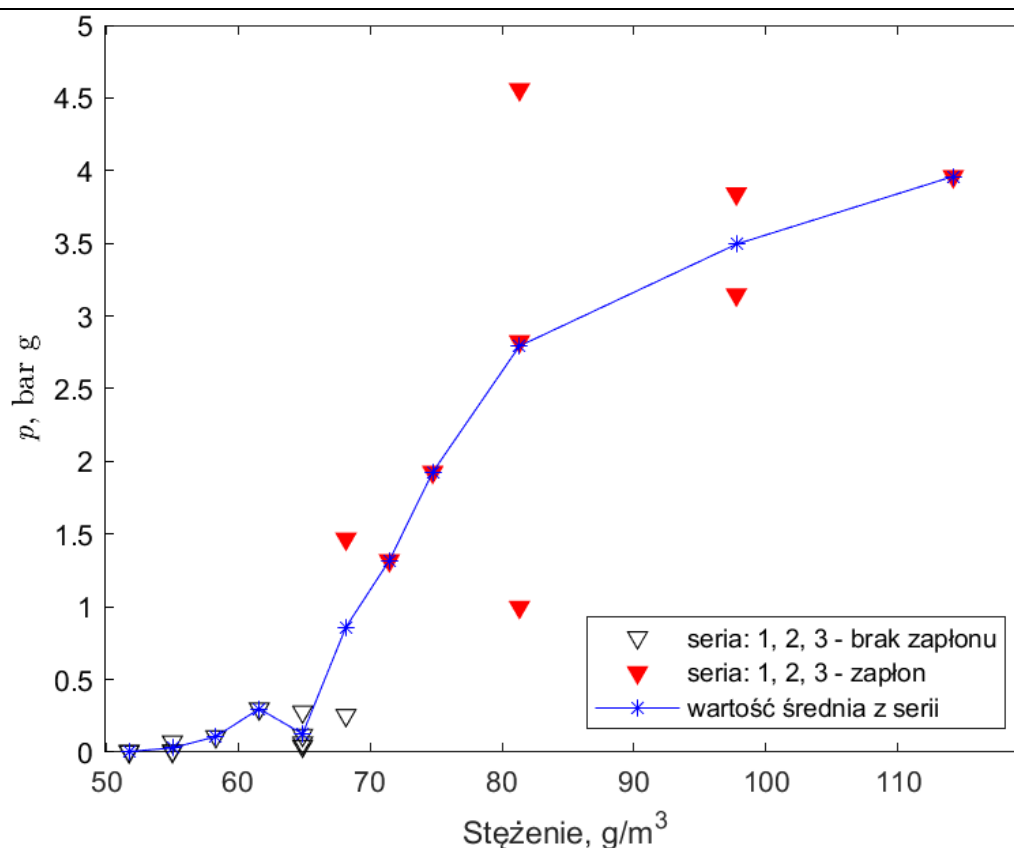


Rys. 10.8. Oznaczenie parametru wybuchowości $(dp/dt)_{max}$ aerozolu etanolu dla różnych czasów opóźnienia zapłonu (oprac. własne)

Najwyższe wartości parametrów wybuchowości zarejestrowano dla czasu t_1 . Maksymalne ciśnienie wybuchu p_{max} wyniosło 6,3 barg i zostało uzyskane przy najwyższym badanym stężeniu 312 g/m^3 . Z kolei największa szybkości przyrostu ciśnienia $(dp/dt)_{max}$ wynosząca 500 bar/s została osiągnięta przy stężeniu 240 g/m^3 . W przypadku kolejnych czasów t_2, t_3, t_4 , oba parametry były zauważalnie niższe, szczególnie dla czasów t_3, t_4 .

10.2. Oznaczenie dolnej granicy wybuchowości *DGW* aerozoli

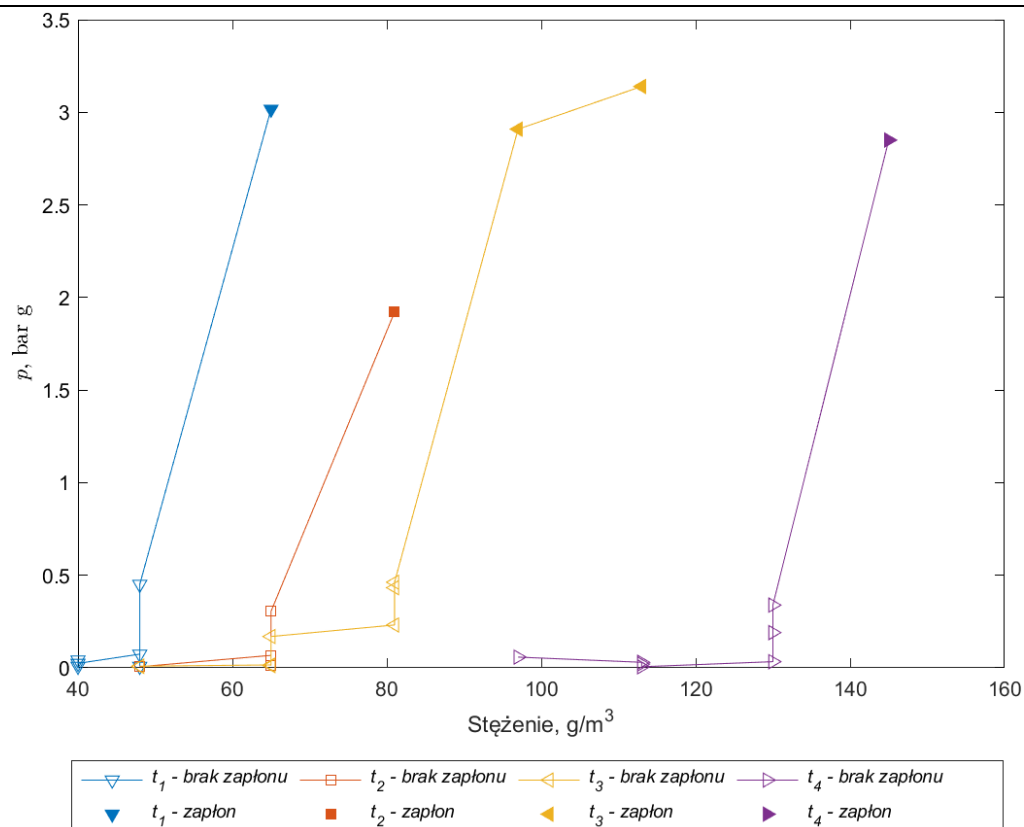
Podobnie jak w przypadku oznaczania charakterystyk wybuchowości dla nafty i izopropanolu, również oznaczenie *DGW* wykonano dla jednego ustalonego czasu opóźnienia zapłonu. Przyjęto, że stabilny obłok aerozolu otrzyma się po czasie 20 ms po procesie atomizacji, co umożliwia uzyskanie najniższej turbulencji. Test ten wykonano dla aerozolu izopropanolu (rys. 10.9).



Rys. 10.9. Dolna granica wybuchowości (DGW) dla aerozolu izopropanolu (oprac. własne)

Zgodnie z przyjętym kryterium zapłonu, czyli wartości przyrostu ciśnienia wyższej niż 0,5 bara, wynik oznaczenia *DGW* dla aerozolu izopropylowego wynosi 68 g/m³.

Uwzględniając właściwości różnych cieczy, ponadto zachowanie się aerozoli jak i brak znormalizowanego podejścia do tego typu badań, zastosowano zmodyfikowaną procedurę badawczą dla oznaczenia *DGW*, analogiczną jak dla oznaczania charakterystyki wybuchowości eteru i etanolu. Przyjęto, że badania muszą być wykonane dla różnych czasów opóźnienia zapłonu, począwszy od czasu 0 po procesie atomizacji, kiedy jest spodziewana najwyższa turbulencja. Badania takie wykonano dla aerozolu etanolu, co przedstawia rysunek 10.10.

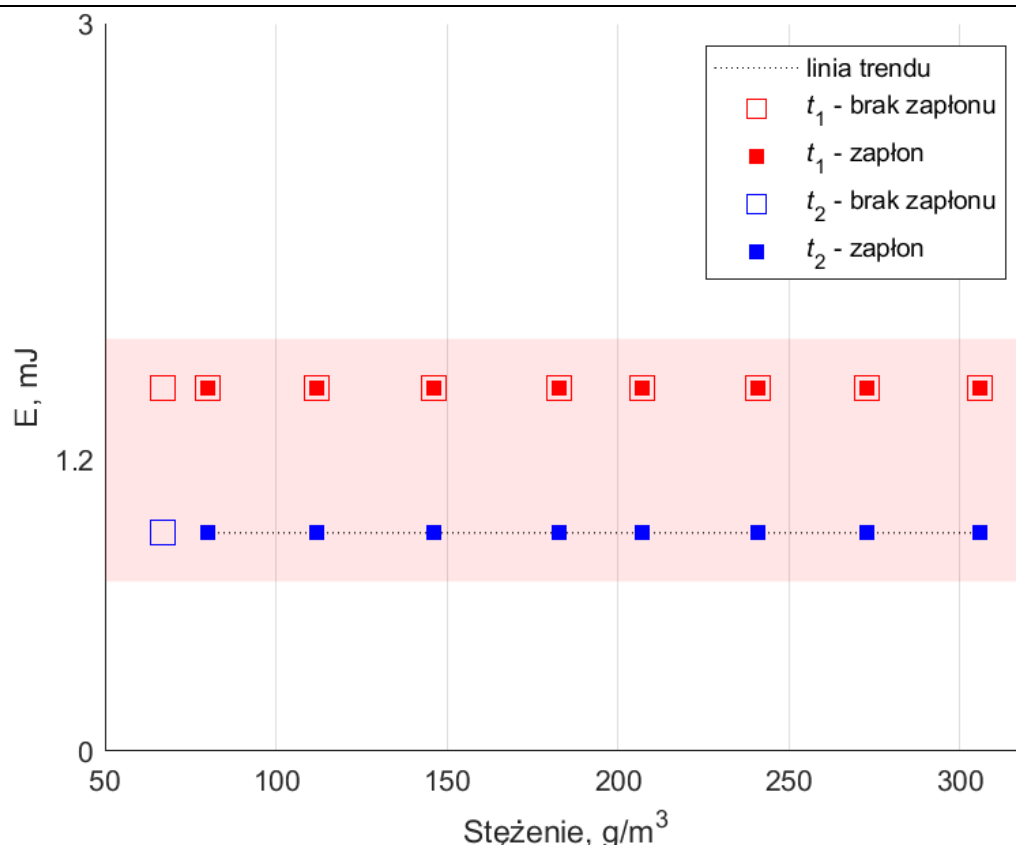


Rys. 10.10. Oznaczenie dolnej granicy wybuchowości (DGW) dla aerozolu etanolu (oprac. własne)

Jak można zauważyć, czas opóźnienia zapłonu ma znaczący wpływ na parametr dolnej granicy wybuchowości. Dla każdego zastosowanego czasu opóźnienia zapłonu otrzymano inną dolną granicę wybuchowości. Im dłuższy czas opóźnienia zapłonu tym wyższy wynik DGW . Z otrzymywanych wartości wynika, że najniższą DGW wynoszącą 60 g/m^3 , zarejestrowano dla czasu t_1 , natomiast najwyższą dla czasu t_4 , dla którego zapłon odnotowano dopiero przy stężeniu 145 g/m^3 .

10.3. Oznaczenie minimalnej energii zapłonu MIE aerozoli

Minimalną energię zapłonu określono dla aerozoli izopropanolu, 99% etanolu i 99,5% eteru dietylowego. W testach początkowo dla izopropanolu zastosowano indukcyjne źródło zapłonu o regulowanej energii od 1,2 mJ do 7 J. Badania przeprowadzono dla dwóch czasów opóźnienia zapłonu: t_1 na końcu ostatniego wtrysku i t_2 po 10 ms od zakończenia procesu atomizacji. Testy przeprowadzono dla różnych stężeń. Jeśli dla badanego stężenia wystąpił brak zapłonu, wynik ten potwierdzano trzykrotnie. Wynik badania dla izopropanolu z indukcyjnym źródłem zapłonu przedstawiono na rysunku 10.11.

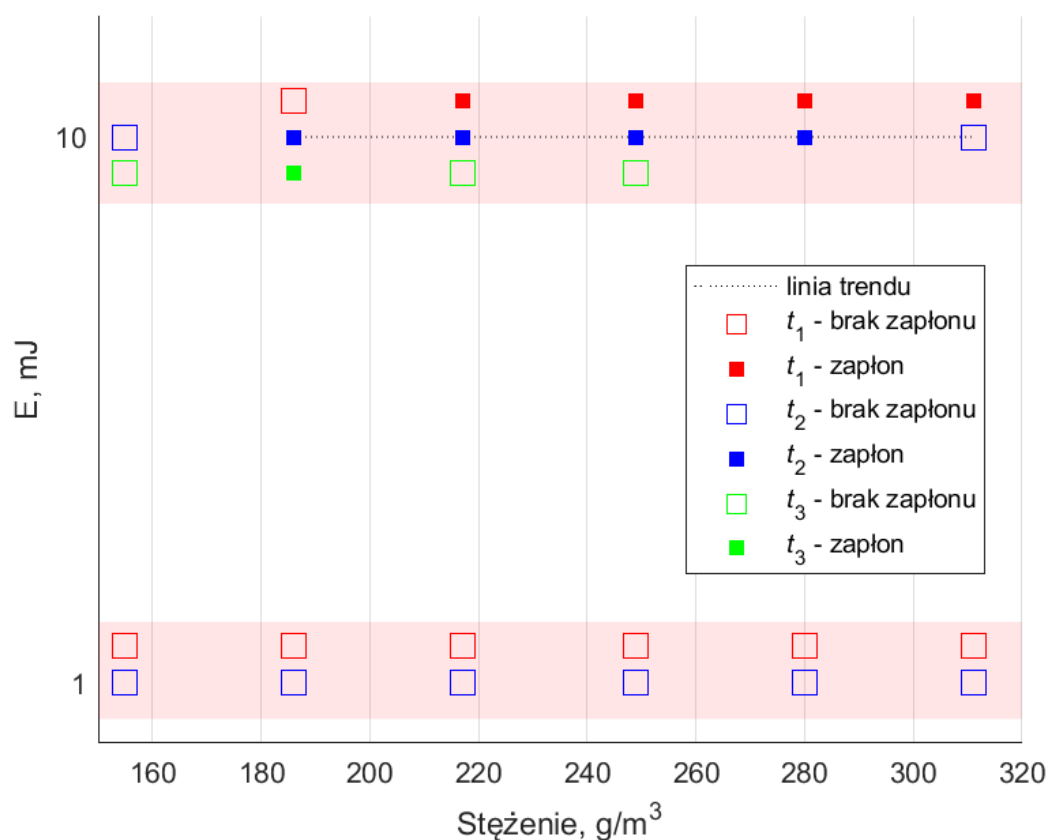


Rys. 10.11. Wynik oznaczenia *MIE* dla izopropanolu z indukcyjnym źródłem zapłonu
[Toman i Adamus, 2024]

Przy najniższym możliwym ustawieniu energii iskry na generatorze (1,2 mJ) zapłon izopropanolu został osiągnięty dla obu czasów opóźnienia. Prawie w całym zakresie badanych stężeń odnotowano wzrost ciśnienia wyższy niż przyjęte kryterium. Tylko dla stężenia 70 g/m³ wynik był ujemny w obu przypadkach. Podobny test przeprowadzono również dla etanolu, ale dla węższego zakresu stężeń. Zapłon został osiągnięty w każdym przypadku.

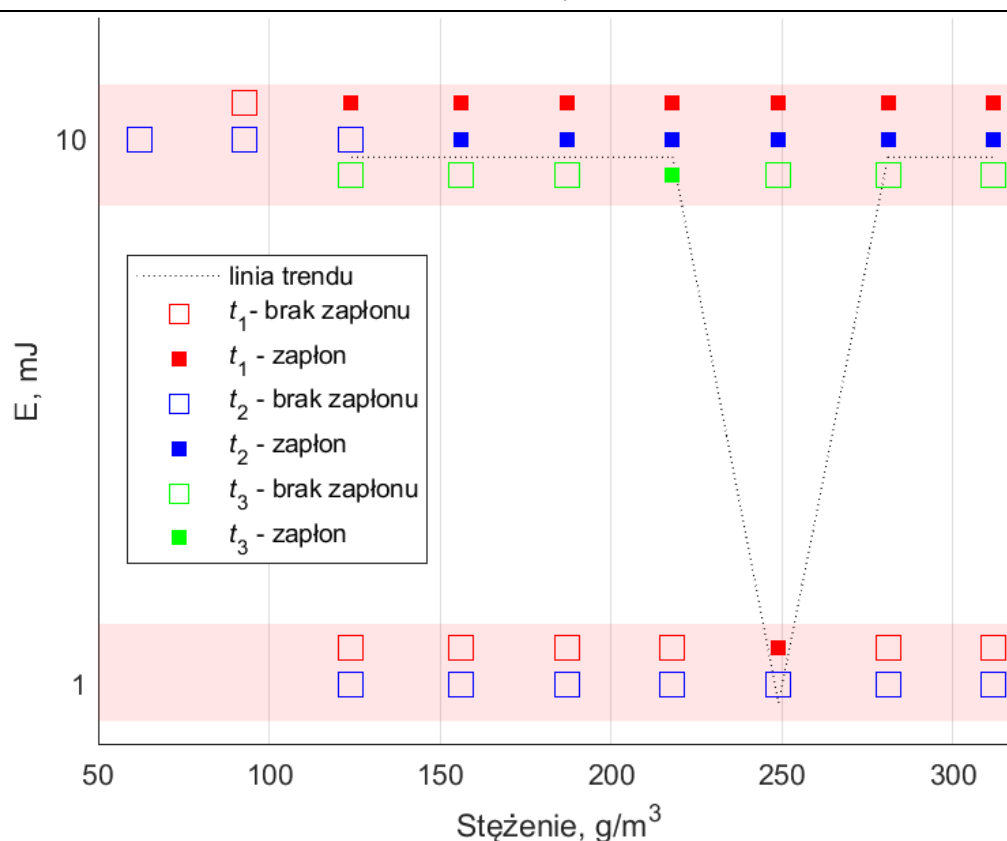
Ze względu na brak możliwości obniżenia energii iskry w zastosowanym generatorze i jego indukcyjny charakter, w dalszych badaniach zastosowano pojemnościowe źródło zapłonu, szerzej opisane w podrozdziale (7.3.2.). Tego typu źródło zapłonu zostało wykorzystane także przez Bane’a i in. (2011) do oceny zagrożeń zapalności/wybuchowości dla paliw. Do oznaczenia *MIE*, pojemnościowe wyładowania iskrowe zastosowali również Babrauskas (2003) i Magison (1990). Jak opisano w pracy Liu i in. (2020), wydajność rozładowania jest ściśle związana z obwodem generującym iskłę, w szczególności ze stosunkiem rezystancji iskry do rezystancji obwodu. Biorąc pod uwagę tę zależność i doświadczenia innych eksperymentatorów, pojemność pasożytnicza układu w nowo zastosowanym źródle zapłonu została zminimalizowana do minimum. Badania z tym źródłem

zapłonu przeprowadzono dla trzech rozpatrywanych cieczy. Jako pierwszy zbadano aerosol izopropanolu (rys. 10.12).



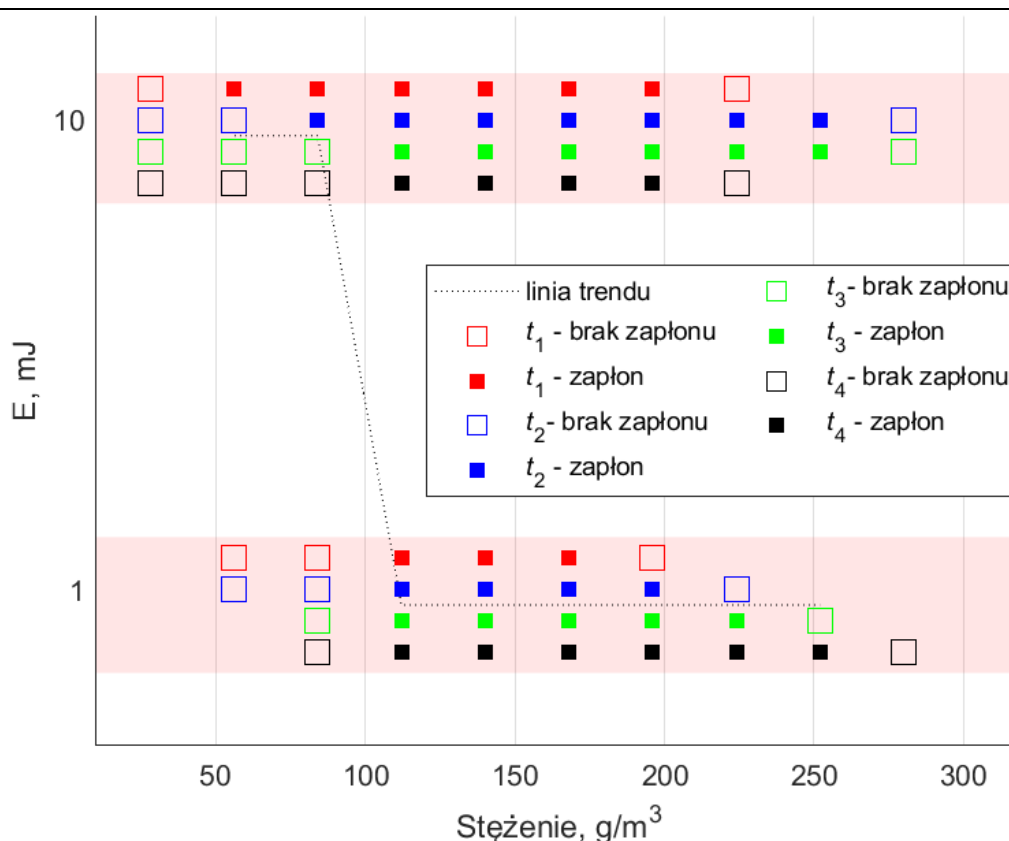
Rys. 10.12. Wynik oznaczenia *MIE* dla izopropanolu z zastosowanym źródłem zapłonu bez indukcyjności [Toman i Adamus, 2024]

Po zmianie źródła zapłonu zauważono istotne różnice w porównaniu z wcześniej uzyskanymi wynikami. Iskra indukcyjna w zastosowanej aparaturze zapalała aerosol izopropanolu (rys. 10.11) skuteczniej niż pojemnościowe źródło zapłonu. Zapłon rejestrowano dla energii źródła zapłonu 10 mJ w stężeniu od 185 g/m^3 dla czasów t_2 i t_3 . Dla czasu t_3 (20 ms po ostatnim wstrzyknięciu) zapłon uzyskano tylko dla stężenia równego 185 g/m^3 . Dla t_2 zapłon rejestrowano aż do stężenia 280 g/m^3 . Dla t_1 zapłon obserwowano od stężenia 218 g/m^3 do maksymalnego badanego stężenia 316 g/m^3 . Dla energii 1 mJ zapłon nie wystąpił przy żadnym z badanych stężeń.



Rys. 10.13. Wynik oznaczenia *MIE* dla etanolu z zastosowanym źródłem zapłonu bez indukcyjności [Toman i Adamus, 2024]

Przeprowadzone testy minimalnej energii zapłonu (*MIE*) dla aerozolu etanolu (rys. 10.13) wykazały, jak w przypadku izopropanolu, różnice po zastosowaniu innego źródła zapłonu. Potwierdził to Eckhoff (2019), wykazując, że istnieją znaczące różnice *MIE* w zależności od tego, czy źródło zapłonu jest z indukcyjnością czy bez niej. Inny charakter źródła wyzwala iskrę może dać inne wyniki *MIE*, nawet jeśli uwalniana energia jest prawie taka sama [Wang i in., 2022]. W przypadku iskrę pojemnościowej o energii 1 mJ zapłon uzyskano tylko w jednym przypadku – przy stężeniu 250 g/m³ w czasie *t*₁. Dla 10 mJ w tym samym czasie wyzwolenia iskrę, najniższe stężenie, przy którym zaobserwowano zapłon, wynosiło 125 g/m³. W czasie *t*₂ stężenie to wynosiło 150 g/m³. Każdy kolejny wzrost stężenia dla *t*₁ i *t*₂ prowadził do zapłonu, aż do maksymalnego testowanego stężenia 310 g/m³. Tylko przy jednym stężeniu 220 g/m³ doszło do zapłonu aerozolu w czasie *t*₃. Zarówno w przypadku etanolu, jak i izopropanolu korzystne warunki zapłonu zaobserwowano w przedziałach *t*₁ i *t*₂.



Rys. 10.14. Wynik oznaczenia *MIE* dla eteru dietylowego z zastosowanym źródłem zapłonu bez indukcyjności [Toman i Adamus, 2024]

Testy minimalnej energii zapłonu dla eteru dietylowego (rys. 10.14) przeprowadzono wyłącznie przy użyciu pojemnościowego źródła zapłonu. Dla wszystkich testowanych czasów zapłonu t_1, t_2, t_3, t_4 zapłon obserwowano od stężenia 112 g/m³, przy najniższej zastosowanej energii 1 mJ. W przeciwieństwie do aerozolu etanolu i izopropanolu, eter dietylowy wykazywał skuteczny zapłon przy energii 1 mJ dla wszystkich czasów opóźnienia zapłonu. Im więcej czasu upłynęło od procesu atomizacji, tym szerszy był zakres stężeń, przy których dochodziło do zapłonu. Najwyższe badane stężenie (253 g/m³), dla którego zarejestrowano zapłon, wystąpiło przy najdłuższym testowanym czasie t_4 .

11. Analiza uzyskanych wyników

Doświadczenie zdobyte podczas konstruowania aparatury badawczej, przeprowadzonych testów oraz realizacji badań pozwoliło na określenie optymalnych warunków badania aerozoli cieczy palnych. Wyznaczony główny cel pracy, czyli opracowanie metody badawczej umożliwiającej oznaczania parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli, został osiągnięty. Opracowana metoda badawcza pozwala na ilościowe określanie wskaźników wybuchowości i zapalności, szacowanie potencjalnego zagrożenia wybuchem oraz dobór odpowiednich urządzeń i systemów ochronnych. Uzyskane wyniki badań nie tylko wzbogacają bazę informacyjną o parametry zapalności i wybuchowości aerozoli, ale również dostarczają ilościowych informacji do przeprowadzenia oceny zagrożenia wybuchem aerozoli związanych z daną cieczą palną, zgodnie z wymaganiami zawartymi w dyrektywie ATEX.

Podobnie jak w przypadku mieszanin powietrzno-gazowych oraz powietrzno-pyłowych, także dla aerozoli istnieje pewna zależność między temperaturą otoczenia w których wykonuje się badania, a uzyskiwanymi wartościami oznaczanych parametrów, co potwierdziły badania (rys. 8.26–8.27). W świetle powyższego, badania przeprowadzono w ustalonych warunkach temperaturowych.

Badane ciecze spełniły założony cel, czyli wytworzony z nich aerozol uzyskał pożądany rozkład rozdrobnienia zgodny z definicją zawartą w normie [PN-EN IEC 60079-10]. Badanie innych cieczy na opracowanej aparaturze wymaga wykonania analizy rozdrobnienia wytworzonego aerozolu dla każdej nowej cieczy. Jest to analogiczne do procedury stosowanej w przypadku oznaczania parametrów zapalności i wybuchowości pyłów. Dla aerozoli wykonanie analizy rozdrobnienia umożliwia dodatkowo ocenę charakteru rozpylania cieczy oraz jej zachowania podczas procesu atomizacji.

11.1. Parametry wybuchowości p_{max} i $(dp/dt)_{max}$

Zgodnie z pierwotnie opracowaną i przyjętą procedurą badawczą oznaczono charakterystyki wybuchowości dla aerozolu nafty i izopropanolu. Badania te przeprowadzono dla możliwie najniższej turbulencji, kierując się zasadami przyjętymi w procedurze badawczej oznaczania parametrów wybuchowości pyłów. Warunki z możliwie najniższą turbulencją określono na podstawie filmów zarejestrowanych szybko kamerą, wykonanych analiz rozdrobnienia na urządzeniu Spraytec oraz na podstawie wykonanych testów (rys. 8.22–8.25).

W pierwszej kolejności wykonano oznaczenia charakterystyki wybuchowości, według przyjętej procedury i metody badawczej dla aerozolu nafty (rys. 10.1–10.2). Najwyższa wartość maksymalnego ciśnienia p_{max} wyniosła 4,1 barg, a maksymalna szybkość wzrostu ciśnienia z trzech serii $(dp/dt)_{max} = 140$ bar/s. Następnie oznaczono charakterystykę wybuchowości dla izopropanolu. Znacznie różniące się właściwości fizykochemiczne tej cieczy w porównaniu z naftą dały większą możliwość przetestowania aparatury, w szczególności systemu wytwarzania aerozolu. Mimo tych różnic między cieczami, aparatura spełniła swoje zadanie. Przeprowadzone badania z użyciem analizatora Spraytec dostarczyły dodatkowych informacji o zachowaniu się wytworzonego aerozolu w porównaniu do wyników uzyskanych wcześniej dla nafty. Na przedstawionych przebiegach (rys. 8.10–8.13) są widoczne wspomniane wyżej różnice. Najwyższe maksymalne ciśnienie wybuchu p_{max} , uzyskane w trzech seriach oznaczonej charakterystyki wybuchowości osiągnęło wartość 8,35 barg, natomiast maksymalna szybkość przyrostu ciśnienia $(dp/dt)_{max} = 1820$ bar/s.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników zwrócono uwagę na różne zachowanie się rozproszonych cieczy. Biorąc pod uwagę ich właściwości fizykochemiczne, podjęto decyzję o zmodyfikowaniu metody badawczej. Przyjęcie ustalonego czasu opóźnienia zapłonu dla aerozoli, tak jak w metodzie badawczej dla pyłów, nie daje pełnego obrazu przebiegu wybuchu po zapłonie. W związku z tym dla oznaczania charakterystyki wybuchowości aerozolu eteru dietylowego zastosowano już zmodyfikowaną metodę badawczą (rys. 9.3).

W przypadku eteru dietylowego najlepsze warunki badania stwierdzono dla czasu t_2 i t_3 . W tym przedziale osiągnięto najwyższe wartości maksymalnego ciśnienia p_{max} i szybkości wzrostu ciśnienia $(dp/dt)_{max}$. Dla czasu t_1 , mimo wyższej turbulencji, uzyskane wyniki nie różniły się znacznie od wyników dla czasów opóźnienia zapłonu t_2 i t_3 , ani nie były najwyższe. Na szczególną uwagę zasługuje czas t_4 , z najniższą turbulencją oraz dłuższym czasem na odparowanie rozproszonych kropelek aerozolu cieczy. Wyniki uzyskane dla tego opóźnienia zapłonu wskazują na najniższą dynamikę wybuchu w całym zakresie stężeń. Może to świadczyć o tym, że większa zawartość substancji lotnej (pary) w aerozolu eteru dietylowego mogła działać na niekorzyść dynamiki wybuchu.

Dla etanolu zastosowano tę samą procedurę badawczą co dla eteru, jednak z wykorzystaniem źródła zapłonu tego samego co dla nafty i izopropanolu. Jak można zauważyć, zachowanie aerozolu etanolu znacząco różniło się od wcześniej badanego eteru. Najwyższe wartości oznaczanych parametrów wybuchowości p_{max} i $(dp/dt)_{max}$ uzyskano w czasie t_1 . Im dłuższy czas od zakończenia procesu atomizacji, tym otrzymywano niższe

wartości tych parametrów. Wydaje się, że dla etanolu należałoby podjąć badania wyższych stężeń, czego w przeprowadzonych badaniach nie brano pod uwagę.

Oznaczanie charakterystyk wybuchowości dla różnych czasów opóźnienia zapłonu w przypadku aerozolu eteru dietylowego (rys. 10.5–10.6) i etanolu (rys. 10.7–10.8) okazało się trafnym wyborem. Uzyskane w ten sposób wyniki badań dały dokładny obraz zachowania się aerozolu w różnych warunkach i umożliwiły wskazanie potencjalnych trendów w przebiegu wybuchu.

Nie można, tak jak w przypadku pyłów czy gazów ustalić jednakowych warunków dla wszystkich testów przeprowadzanych w ramach oznaczania charakterystyki wybuchowości badanego aerozolu. Warunki te mogą się zmieniać w zależności od badanej cieczy i jej właściwości. Uzyskane wyniki badań wskazują, że obecnie oznaczanie parametrów zapalności i wybuchowości dla aerozoli należy przeprowadzać w określonym zakresie czasów opóźnienia zapłonu, turbulencji oraz z zastosowaniem różnego rodzaju źródeł zapłonu. Biorąc to wszystko pod uwagę rozważane jest dodatkowe podejście związane z rozprzestrzenianiem się płomienia. W rozprawie doktorskiej nie brano powyższego pod uwagę, jednak jest to kolejny krok w kierunku lepszego poznawania zachowania się aerozoli cieczy palnych inicjowanych w ograniczonej przestrzeni.

11.2. Dolna granica wybuchowości *DGW*

W ramach pracy doktorskiej dolne granice wybuchowości oznaczono dla izopropanolu i etanolu. Dla pierwszej cieczy, do oznaczenia *DGW*, zastosowano wcześniej opracowaną procedurę badawczą. Uzyskany wynik *DGW* dla aerozolu izopropanolu wyniósł 68 g/m³. W porównaniu z wynikiem uzyskanym przez Addai E. K. (2016), wynoszącym 100 g/m³, był on nieco niższy, mimo zastosowanego przez niego mocniejszego iskrowego źródła zapłonu o energii około 10 J. Różnice w uzyskanych wynikach mogą być spowodowane zastosowaniem odmiennej metody i prowadzeniem testów w innej komorze badawczej.

Dolną granicę wybuchowości dla etanolu wyznaczono zgodnie ze zmodyfikowaną procedurą badawczą używaną wcześniej do oznaczania charakterystyk wybuchowości dla eteru i etanolu. Najniższa uzyskana wartość *DGW* dla etanolu wyniosła 60 g/m³ przy czasie opóźnienia zapłonu t_1 .

Przyjęcie metody oznaczania *DGW* zastosowanej w przypadku etanolu wydaje się lepszym rozwiązaniem niż w przypadku izopropanolu. W ocenie ryzyka i jego szacowaniu należy brać pod uwagę jednak najgorsze warunki (podwyższona temperatura, ciśnienie

i źródło zapłonu), jakie mogą zaistnieć w rozpatrywanej instalacji. Przeprowadzenie badań z zastosowaniem zaproponowanej metody umożliwi wskazanie obszarów, gdzie mogą wystąpić najbardziej sprzyjające warunki do zapłonu aerozolu.

11.3. Minimalna energia zapłonu *MIE*

W przypadku mieszanin gazowych minimalna energia zapłonu zależy od składu i stanu termodynamicznego mieszanin [Oancea i in., 2003], a także zastosowanego źródła zapłonu [Uchman i Werle, 2018]. W przypadku pyłów i aerozoli cieczy palnych istotnym czynnikiem wpływającym na zapalność jest wielkość cząstek. W przypadku pyłów można określić wielkość cząstek przed przeprowadzeniem oznaczania parametrów zapalności i wybuchowości, która dla większości pyłów pozostaje niezmienna. W przypadku aerozoli, wielkość cząstek ściśle zależy od metody dyspersji, głównie od zastosowanej technologii wytwarzania aerozolu i warunków badania. Eksperymentatorzy badający aerozol tej samej cieczy mogą uzyskać różne wyniki *MIE*, na co wpływ ma różnorodność stosowanych metod i aparatur badawczych. Liczba przeprowadzonych badań nad aerozolami jest nieporównywalnie mniejsza w porównaniu do badań pyłów lub gazów. Powodem tego jest złożoność eksperymentów, które wymagają zaawansowanych konfiguracji aparatury badawczej.

Jak zasygnalizowano wcześniej minimalna energia zapłonu niewątpliwie zależy od rodzaju zastosowanego wyładowania iskrowego. Inicjał przy użyciu iskry elektrycznej tworzy miejscowo niewielki obszar intensywnego parowania kropli, o wysokiej reaktywności i wysokim uwalnianiu ciepła. Obszar ten, powszechnie nazywany jądrem zapłonu, obejmuje kilka parujących kropli. Podczas trwania iskry, temperatura w jądrze zapłonu gwałtownie wzrasta, a następnie spada wskutek parowania i strat ciepła do otoczenia. W miarę nasilania się aktywności chemicznej i inicjowania reakcji uwalniania ciepła temperatura zaczyna ponownie wzrastać. Punkt przegięcia na wykresie zmian temperatury w czasie jest często używany do identyfikacji zapłonu. Obecność oparów paliwa może zmniejszać podatność na zapłon, co oznacza zwiększoną zapalność kropelkową. Zmniejsza także szybkość parowania, wpływając tym samym na zapalność.

Wyniki minimalnej energii zapłonu (*MIE*) uzyskane do tej pory dla aerozoli trudno jest porównywać ze względu na różnorodność stosowanych metod badawczych, aparatur oraz niewielką liczbę wykonanych badań. Wyniki badań w pracy doktorskiej rozszerzają bazę danych *MIE* dla aerozoli, w oparciu o opracowaną nową metodę badawczą oraz specjalnie

skonstruowaną aparaturę. Bazę wzbogacono o wyniki dla aerozoli izopropanolu, etanolu 99% oraz eteru dietylowego 99,5%.

W pierwszej fazie badań dla aerozolu izopropanolu oraz etanolu zastosowano indukcyjne źródło zapłonu. Dla obu aerozoli wynik pozytywny *MIE* odnotowano przy najniższej zastosowanej energii 1,2 mJ, przy stężeniu 60 g/m³ oraz dla dwóch czasów opóźnienia zapłonu. Tego typu źródło zapłonu jest jednak rzadziej spotykane w rzeczywistych warunkach pracy instalacji przemysłowych niż iskra pojemnościowa generowana przez wyładowanie elektrostatyczne. Uwzględniając powyższe, do dalszych testów zastosowano pojemnościowe źródła zapłonu.

W przypadku izopropanolu, przy użyciu nowego źródła zapłonu, przeprowadzono badania oznaczenia minimalnej energii dla tego samego zakresu stężeń. Dla energii 1 mJ – bardzo zbliżonej do energii zastosowanego wcześniej generatora z indukcyjnością – nie uzyskano zapłonu w żadnym stężeniu. Podobne wyniki badań zaobserwowano dla aerozolu etanolu, jednak w tym przypadku odnotowano pojedynczy zapłon przy energii 1 mJ dla jednego z badanych stężeń, co pozostawało w zgodności z wynikiem uzyskanym dla zapłonu z indukcyjnością. Wyniki badań potwierdziły, że charakter iskry ma istotne znaczenie.

Minimalna energia zapłonu dla eteru wyróżniała się na tle izopropanolu i etanolu. Im dłuższy czas opóźnienia zapłonu aerozolu eteru, tym szerszy zakres wartości stężeń ulegał zapłonowi. Wpływ na to miała ilość odparowanej cieczy, która w tym przypadku ułatwiła zapłon mieszaniny. Prężność par izopropanolu i etanolu była znacznie niższa, dlatego w ich przypadku szybciej dochodziło do osiadania i aglomeracji kropelek aerozolu na ściankach naczynia, w przeciwieństwie do eteru, który łatwiej ulegał parowaniu.

11.4. Analiza porównawcza uzyskanych wyników badań

W niniejszym podrozdziale przeprowadzono porównanie wyników badań uzyskanych w ramach pracy doktorskiej z wynikami opublikowanymi przez innych eksperymentatorów zajmujących się zapalnością i wybuchowością aerozoli cieczy palnych. Analizą porównawczą objęto aerozole czterech cieczy, a mianowicie: nafty, izopropanolu, etanolu oraz eteru dietylowego.

W tabelach 11.1, 11.2, 11.3 i 11.4 przedstawiono zestawienie parametrów badanych w ramach niniejszej pracy doktorskiej (kolumna pierwsza) oraz wyników uzyskanych przez innych badaczy (kolejne kolumny), które zidentyfikowano w dostępnej literaturze.

Porównanie wyników badań pozwala na ocenę zgodności uzyskanych wartości z literaturą oraz wskazanie potencjalnych różnic wynikających z zastosowanej metodyki badawczej oraz warunków eksperymentalnych.

Tabela 11.1. Porównanie wyników badań parametrów wybuchowości dla aerozolu **nafty**

Ciecz Badacze Parametr	Nafta	
	Uzyskane wyniki w ramach pracy doktorskiej (komora 5 dm ³)	El-Zahallieh 2020 (komora 20 dm ³)
p_{max} , bar g	4,1 ±0,2	2,1
$(dp/dt)_{max}$, bar/s	140 ±26	249

Źródło: oprac. własne.

Tabela 11.2. Porównanie wyników badań parametrów zapalności i wybuchowości dla aerozolu **izopropanolu**

Ciecz Badacze Parametr	Izopropanol	
	Uzyskane wyniki w ramach pracy doktorskiej (komora 5 dm ³)	(Addai, 2016) (komora 20 dm ³)
p_{max} , bar g	8,3 ±0,3	9,1
$(dp/dt)_{max}$, bar/s	1800 ±89	2200
DGW , g/m ³	68 ±7	100
MIE , mJ (z indukcyjnością)	$MIE < 1,2$	–
MIE , mJ (bez indukcyjności)	$1 < MIE < 10$	–

Źródło: oprac. własne.

Tabela 11.3. Porównanie wyników badań parametrów zapalności i wybuchowości dla aerozolu **etanolu**

Ciecz Badacze Parametr	Etanol		
	Uzyskane wyniki w ramach pracy doktorskiej (komora 5 dm ³)	(El-Zahallieh 2020) (komora 20 dm ³)	(Addai, 2016) (komora 20 dm ³)
p_{max} , bar g	6,3 ±0,3	8,8	7,5
$(dp/dt)_{max}$, bar/s	510 ±63	1553	1400
DGW, g/m ³	60 ± 6	77	100
MIE, mJ (z indukcyjnością)	MIE < 1,2	—	—
MIE, mJ (bez indukcyjności)	MIE < 1	—	—

Źródło: oprac. własne.

Tabela 11.4. Porównanie wyników badań parametrów zapalności i wybuchowości dla aerozolu **eteru dietylowego**

Ciecz Badacze Parametr	Eter dietylowy	
	Uzyskane wyniki w ramach pracy doktorskiej (komora 5 dm ³)	(Guo S. i in. 2024) (komora 20 dm ³)
p_{max} , bar g	9,2 ±3	~10,5
$(dp/dt)_{max}$, bar/s	1900 ±92	~2500
MIE, mJ (bez indukcyjności)	MIE < 1	—

Źródło: oprac. własne.

Analiza porównawcza wyników badań parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli wykonanych w ramach pracy doktorskiej w komorze 5 dm³ oraz zbadanych w komorach o pojemności 20 dm³ pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- Wartości wyników w tabeli 11.1 dla nafty p_{max} i $(dp/dt)_{max}$ odbiegają znacząco od siebie. Zaobserwowane różnice w wartościach ciśnienia i szybkości przyrostu ciśnienia mogą wynikać z odmiennej metody wytwarzania aerozolu, gdzie zastosowano znacznie dłuższy czas generowania aerozolu.

- Wartości wyników w tabeli 11.2 dla izopropanolu p_{max} , $(dp/dt)_{max}$ i DGW nie odbiegają od siebie znacząco, co może sugerować, że zastosowany przez eksperymentatora wtrysk mógł wytwarzać aerozol o podobnej charakterystyce. Niewielkie różnice mogą wynikać z odmiennej objętości komory badawczej oraz zastosowanego medium gazowego do rozpylenia aerozolu.
- Wartości wyników w tabeli 11.3 dla etanolu różnią się znacząco od danych literaturowych. Warto zauważyć, że wartości $(dp/dt)_{max}$ uzyskane przez obu eksperymentatorów są około trzykrotnie wyższe od wyników uzyskanych w pracy doktorskiej, co wymaga dalszej analizy. Natomiast wartości DGW uzyskane w ramach niniejszej pracy są niższe, co może wskazywać na większą precyzję zastosowanej metody badawczej.
- Wartości wyników w tabeli 11.4 dla eteru dietylowego są zbliżone do danych literaturowych. Niewielka różnica, która była oczekiwana, może wynikać z różnic w objętości komór badawczych, w których aerozol był badany.
- W ramach niniejszej pracy uzyskano oryginalne dane dotyczące MIE bez indukcyjności dla izopropanolu, etanolu i eteru dietylowego, podczas gdy w literaturze takie dane nie były dostępne dla porównania badań.

12. Wnioski

1. Inspiracją do opracowania metody badawczej umożliwiającej oznaczanie parametrów zapalności i wybuchowości aerozoli cieczy palnych jest brak obowiązujących norm oraz uregulowań prawnych w tej tematyce. W oparciu o opracowaną metodę zaprojektowałem i skonstruowałem aparaturę do badań zapalności i wybuchowości aerozoli, a uzyskane wyniki badań pozwoliły mi na pełną realizację założonych celów pracy doktorskiej.
2. Prototypowa aparatura badawcza, w połączeniu z opracowaną przeze mnie procedurą badawczą, umożliwia oznaczanie charakterystyki wybuchowości aerozoli, na podstawie której określono podstawowe parametry wybuchowości jak maksymalne ciśnienie wybuchu p_{max} oraz maksymalną szybkość narastania ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{max}$. Badania przeprowadzono w przyjętym krótkim czasie iniekcji, w szerokim zakresie stężeń aerozoli, co spełnia wymagania postawione w tezie pracy i odróżnia tę metodę od innych.
3. Potwierdzeniem zrealizowania jednego z założonych celów pracy doktorskiej dotyczącego wytwarzania aerozolu o odpowiedniej wielkości cząsteczek jest opracowany przeze mnie układ wtryskowy aparatury, który wytwarza aerozol o wielkości kropli, określonej jako średnia średnica Sautera (SMD), mieszczących się w zakresie 10–50 μm .
4. Zastosowanie wtrysku sekwencyjnego znacząco poprawiło jakość rozproszenia tworzonej się mieszaniny aerozol-powietrze w porównaniu do wtrysku pojedynczego, stosowanego w innych rozwiązaniach badaczy.
5. Minimalna energia zapłonu (MIE) jest istotnym parametrem przy szacowaniu oceny ryzyka wybuchu, co było inspiracją dla przeprowadzenia badań w różnych warunkach turbulencji aerozolu w przestrzeni testowej, zmieniając czas opóźnienia zapłonu. Zastosowane w skonstruowanej aparaturze pojemnościowe źródło zapłonu bez indukcyjności lepiej odzwierciedla warunki wyładowań elektrostatycznych typowe dla instalacji przemysłowych niż stosowany generator iskier z indukcyjnością.
6. W opracowanej metodzie na wzrost ciśnienia w przestrzeni testowej rozpraszanego aerozolu wpływa wyłącznie objętość aerozolu.
7. Na podstawie przeprowadzonych badań i rejestracji szybką kamerą procesu rozpylania cieczy w transparentnej kuli stwierdzono, że dłuższy czas wytwarzania aerozolu może prowadzić do wzrostu ilości odparowanej cieczy, co może znacząco wpływać na wyniki badań. Precyzyjna ocena właściwości zapalnych i wybuchowych aerozoli cieczy palnych jest możliwa przy zastosowaniu krótkiego czasu atomizacji, co potwierdza postawioną tezę.

8. W opracowanej aparaturze wprowadzono układ stabilizacji temperatury wraz z kontrolą, ponieważ parametry zapalności MIE i wybuchowości p_{max} oraz $(dp/dt)_{max}$ dla aerozoli znacząco zależą od temperatury, w której są oznaczane, co potwierdza postawioną tezę.
9. Charakterystykę wybuchowości aerozoli oznaczono z zastosowaniem indukcyjnego iskrowego źródła zapłonu o energii wyładowania 7 J, której wartość jest wystarczająca do zainicjowania wybuchu.
10. Uzyskane rezultaty badań przeprowadzonych na zbudowanej aparaturze badawczej w pełni realizują postawione cele pracy doktorskiej. Konstrukcja stanowiska badawczego może w przyszłości ewoluować i być ukierunkowana na dalszy rozwój badań zapalności i wybuchowości aerozoli, w tym oznaczenie granicznych stężeń tlenu dla zaistnienia wybuchów aerozoli, czy badania aerozoli cieczy w stanie o zróżnicowanej temperaturze.

Literatura

1. Addai E. K. (2016) Investigation of Explosion Characteristics of Multiphase Fuel Mixtures with Air. Dissertation for the award of the degree Doctor Engineering.
2. Addai E. K., Clouthier M., Amyotte P., Safdar M., Krause U., (2019), Experimental investigation of limiting oxygen concentration of hybrid mixtures, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 57 (2019) 120–130.
3. Addai E. K., Gabel D., Krause U. (2015), Lower explosion limit of hybrid mixtures of burnable gas and dust, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* xxx (2015) 1 – 8.
4. Anon., Heavy oil fire, *Loss Prevention Bulletin*. Apr. 1999, no. 146, 20.
5. Askar, E., Schröder, V., (2019). The influence of strong ignition sources on the explosion and decomposition limits of gases. *Chemical Engineering Transactions* 75. <https://doi.org/10.3303/CET1977022>.
6. ASTM E1620 – 97 (2016) Standard Terminology Relating to Liquid Particles and Atomization.
7. ASTM E2019-03, Standard Test Method for Minimum Ignition Energy of a Dust Cloud in Air.
8. ASTM E2079-19; Standard Test Methods for Limiting Oxygen (Oxidant) Concentration in Gases and Vapors.
9. ASTM Standard D3065-01 Standard Test Methods for Flammability of Aerosol Products ASTM International, West Conshohocken, PA (2013).
10. ASTM-E681-09; 2023 Standard Test Method for Concentration Limits of Flammability of Chemicals (Vapors and Gases).
11. Babrauskas, V. (2003). *Ignition handbook: Principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science*. Issaquah, WA: Fire Science Publishers.
12. Bai C. Wang Y. (2015), Study of the explosion parameters of vapor e liquid diethyl ether/air mixtures, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 38 (2015) 139 e 147.
13. Ballal D.R. and Lefebvre A.H. (1981), Flame propagation in heterogeneous mixtures of fuel droplets, fuel vapor and air, *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*, 18 (1981) 321–328.

14. Bane S.P.M., (2010). Spark Ignition: Experimental and Numerical Investigation with Application to Aviation Safety. California Institute of Technology, Pasadena, California. <https://doi.org/10.7907/W1NB-5W06>.
15. Bane S.P.M., Ziegler J. L., Boettcher P. A., Coronel S. A., Shepherd J. E. (2011), Experimental investigation of spark ignition energy in kerosene, hexane, and hydrogen, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* xxx (2011) 1-5.
16. Bane S.P.M., Ziegler J. L., Boettcher P. A., Coronel S. A., Shepherd J. E., (2013), Experimental Investigation of Spark Ignition Energy in Kerosene, Hexane, and Hydrogen, *J. Loss Prev. Process. Ind.*, Volume 26, Issue 2, March 2013, Pages 290-294 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2011.03.007>.
17. Bartknecht W. (1981), *Explosions – Course, Prevention, Protection*, Springer-Verlag, 1981.
18. Berglund R. N. i Liu B. Y. H. (1973), "Generation of Monodisperse Aerosol Standards," *Environmental Science and Technology* 7. 2, 147, 1973.
19. Bowen P. J. i Shirvill L. C. (1994) Combustion hazards posed by the pressurized atomization of high-flashpoint liquids, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 7 (1994) 233-241.
20. Burgoyne J. H. i Cohen L. (1953) The Production of Monodisperse Aerosols of Large Drop Size *Journal of Colloid Science* Volume 8, Issue 3, June 1953, Pages 364-366.
21. Burgoyne J. H. i Richardson J., (1949), The inflammability of oil mists *Fuel*, 28 (1): 2--6 (1949).
22. Burgoyne J. H. (1963), The flammability of mists and sprays, *Second symposium on chemical process hazards* (1963: INSTN Chem. ENGRS).
23. Burgoyne J. H., Cohen L. (1954), The effect of drop size on flame propagation in liquid aerosols. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.. 225, 1954, 375-392. [10.1098/rspa.1954.0210](https://doi.org/10.1098/rspa.1954.0210).
24. Cernansky N. P., Namer I. i Tidona R. J. (1986), *Combustion characteristics in the transition region of liquid fuel sprays*, Final Report, Mechanical Engineering and Mechanics Department Drexel University Philadelphia, PA 19104.
25. Cesana-AG - Manual for 20-l-Apparatus.
26. Cleary V., Bowen P., Witlox H. (2007) Flashing liquid jets and two-phase droplet dispersion: I. experiments for derivation of droplet atomisation correlations, *Journal of Hazardous Materials*, 142 (2007) 786-796.

27. Coward H.F., Jones G.W. (1939) Limits of Inflammability of Gases and Vapors, U.S. Bureau of Mines, Bulletin 279.
28. Cybulski W. (1973) Wybuchy pyłu węglowego i ich zwalczanie Wydawnictwo Śląsk.
29. Danis A.M. Cernansky N.P., Namer I. (1985), Transition region ignition characteristics of n-heptane fuel sprays, WS/CSCIJ85-1-6B, College of Engineering Department of Mechanical Engineering and Mechanics Philadelphia, PA 1910-4 (215)895-2352-53.
30. Dyduch Z. (2017), Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych, GIG Katowice 2017.
31. Dyduch Z., Majcher-Morawiec B. (2006), Ignition of a dust layer by a constant heat flux-heat transport in the layer, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19, No. 2-3, 2006.
32. Dyduch Z., Toman A., Adamus W. 2016, Measurements of turbulence intensity in the standard 1 m³ vessel, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 40, 2016, 180-187.
33. Dyrektywa 2014/34/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej.
34. Dz.U. 2010 nr 109 poz. 719 Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów z zm.
35. Eckhoff R. K., Ngo M., Olsen W. (2010), On the minimum ignition energy (*MIE*) for propane/air, Journal of hazardous materials, 175.1-3 (2010): 293-297.
36. Eckhoff R.K. (2016). Explosion Hazards in the Process Industries. Gulf Professional Publishing. Book Second Edition 978-0-12-803273-2, DOI <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03887-7>.
37. Eckhoff R.K. (2019) Measurement of minimum ignition energies (*MI*E)s of dust clouds – history, present, future, J. Loss Prev. Process. Ind. 61 147–159.
38. Eckhoff, R. K. (2002), Minimum ignition energy (*MIE*) - a basic ignition sensitivity parameter in design of intrinsically safe electrical apparatus for explosive dust clouds. Journal of Loss Prevention in the process industries, 15(4), 305-310.
39. Eckhoff, R. K. (2003), Dust explosions in the process industries: identification, assessment and control of dust hazards. 2003: Gulf professional publishing.

40. Eckhoff, R. K., (1995), Generation, Ignition, Combustion and Explosion of Sprays and Mists of Flammable Liquids in Air: a Literature Survey. Offshore Technology Report OTN 95 260. Health and Safety Executive, UK.
41. Egerton A.C., (1953), Limits of Flammability, Proc. 4th Symp. on Combustion, The Combustion Institute, pp. 4-13, 1953.
42. Eichhorn J. (1955), Careful! Mist can explode, Pet. Refiner, 34 (1955) 194.
43. El - Zahlanieh S., Charveta A., Vignesb A., Tribouilloyb B. & Dufauda O. (2020) *Hydrocarbon aerosol explosion: towards hazardous area classification* Proceedings of the 13th ISHPMIE DOI: 10.7795/810.20200724.
44. El - Zahlanieh S., Dos Santos I. S., Brunello D., Tribouilloy B., Blanchard C., Koenig C., Vignes A., Dufaud O. (2022a), Mist Can Explode, but Still No Standard! Proposal of a Combustible Sprays Test Method, Chemical Engineering Transactions VOL. 90, 2022, DOI: 10.3303/CET2290014.
45. El - Zahlanieh S., Sivabalan S., Dos Santos I. S., Tribouilloy B., Brunello D., Vignes A., Dufaud O. (2022b), A step toward lifting the fog off mist explosions: Comparative study of three fuels, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 74 (2022) 104656.
46. European Chemicals Agency (2017), Guidance on the Application of the CLP Criteria,, Guidance to Regulation (EC) No 1272/2008 on classification, labelling and packaging (CLP) of substances and mixtures.
47. Faeth, G.M. and D.R. Olson (1968), The ignition of hydrocarbon fuel droplets in air., SAE Technical Paper.
48. Förster, H. (2000), Eigenschaften brennbarer Nebel und Schäume. Chapter in Steen 2000.
49. Franke H. (1978); Bestimmung der Minderstzudenergie von Kohlenstaub/Methan/Luft Gemisches (hybride Gemische). VDI-Berichte, 1978. 304: p. 69-72.
50. Gant, S. et al., (2013). Generation of flammable mists from high flashpoint fluids: Literature review. Research Report RR980, HSL report, Buxton, UK.
51. Gieras M., Klemens R., Kuhl A., Oleszczak P., Trzciński W., Wolański P. (2008), Influence of the chamber volume on the upper explosion limit for hexane-air mixtures. J. Loss Prev. Process Ind.. 2008,10.1016/j.jlp.2008.02.006.
52. Graco Inc(1995) Atomization, Concept and Theory Training Form No. 321-027 8/95 Printed in U.S.A.

53. Guo S., Wu F., Wang H., Pan X., Zang X., Hua M., Jiang J. (2024), Evolution characteristics of ethyl ether spray explosion process in 20L near-spherical vessel, *Fuel* 357 (2024) 129736.
54. Harris R. J. (1983), The investigation and control of gas explosions in buildings and heating plant. 1983: E. & FN Spon in association with the British Gas Corp.
55. Harris R., Marshall M., and Moppett D. (1977) The response of glass windows to explosion pressures. in British Gas Corporation. I. Chem. E. Symposium Serious. 1977.
56. Hayashi S., Kumagai S., Sakai T. (1977), Propagation velocity and structure of flames in droplet-vapor-air mixtures, *Combustion Science and Technology*, 15 (1977) 169-177.
57. Hazardous Cargo Bulletin, June 1981, p. 24.
58. Huang S.-Y. (2013), High flash-point fluid flow system aerosol flammability study and combustion mechanism analysis, Dissertation for the award of the degree, Chemical Engineering.
59. Jia Y.S., Zhang C., Zhang Q., Liang H.M. (2023) Correlation between concentration, droplet size, turbulent intensity and explosion parameters of gas-liquid two-phase mixture, *Fire Safety Journal* 136 (2023) 103731.
60. Kabiesz J. i in. (2014), Raport roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego, Katowice: Główny Instytut Górnictwa, 2014.
61. Kinbara T. (1932), *Bull Inst. Phys. Chem. Res. Japan*, 9 (1932) 561.
62. Kistler piezoresistive amplifier typ 4624AK - dane techniczne.
63. Kistler universal absolute pressure sensor typ 4011A Series – dane techniczne.
64. Kletz, T.A. (1975/76), Some Fires and Explosions in Liquids of High Flash Point, *Journal of Hazardous Materials*, 1 pp. 165–170.
65. Kühner A.G. (2009), 20 Liters Apparatus and KESP 7.0 Manual. 2009.
66. Krause E., Cybulski K (2000), Współczesne aspekty zagrożeń gazowych i pyłowych w polskich kopalniach podziemnych, *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* nr. 10 (74) 2000.
67. Krause E., Cybulski K (2002), Wybuchowość mieszanin hybrydowych metanowo-pyłowych w ścianach o wysokiej koncentracji wydobywania, *Seminarium nt. Zagrożenia wybuchem metanu i pyłu węglowego – teoria i praktyka ROP – 2002*.
68. Krause E., Łukowicz K. (2004), Zasady prowadzenia ścian w warunkach zagrożenia metanowego, *Instrukcje GIG* nr. 17/2004.

69. Krause E., Cybulski K (2007), Zasady zaliczania wyrobisk w polach metanowych w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny do stopni niebezpieczeństwa wybuchu metanu, Instrukcje GIG nr. 18/2007.
70. Krause E. (2009), Ocena i zwalczanie zagrożenia metanowego w kopalniach węgla kamiennego, Prace Naukowe GIG nr. 878/2009.
71. Krause E. (2019), Zagrożenia metanowe w kopalniach węgla kamiennego, GIG Katowice 2019.
72. Lebecki K. (1967), Les recherches sur la theorie des coups de poussières. Proceedings of the 12 International Conference of Safety in Mines Research Establishments, Dortmund, VS Tremonia.
73. Lebecki K., Śliż J. (1972), Laboratoryjne badania wybuchowości pyłów węglowych. Prace GIG, Komunikat nr 560.
74. Lebecki K., Dyduch Z., Fibich A. i Śliż J. (2003), Ignition of a dust layer b a constant heat flux, Journal of Loss Prevention in the Process Industries Volume 16, Issue 4, pages 243-248.
75. Lesiak P., Bąk D., Dziechciarz A., Wolańska A. (2016) Metody badania temperatury zapłonu substancji ciekłych niebezpiecznych pożarowo Standard CNBOP-PIB-BW03P: wyd. 1.Wytyczne.
76. Lim, J. and Sivathanu Y.R. (2005), Optical patteration of a multi-orifice spray nozzle. Atomization and Sprays, 2005. 15(6), pp. 687-698.
77. Lin Y.-R. (2017) Droplet analysis and flame propagation study for paraffin aerosols generated by improved electrospray device, Dissertation for the award of the degree Doctor.
78. Liu J., Bi M., Jiang H., Gao W. (2020) Evaluation of spark discharge, J. Electrostat. 107 103500.
79. Magison, E. C. (1990). Electrical equipment in hazardous locations (3rd ed.). Instrument Society of America.
80. Malvern Instruments Ltd, (2007), Instrukcja obsługi Spraytec. Malvern Instruments Ltd, Worcestershire.
81. Maragkos A. and Bowen P.J. (2002), Combustion hazards due to impingement of pressurized releases of high-flashpoint liquid fuels, Proceedings of the Combustion Institute, Volume 29, 2002/pp. 305–311.

82. Maremonti M., Russo G., Salzano E., Tufano V. (1999), Post-accident analysis of vapour cloud explosions in fuel storage areas. *Process safety and environmental protection*, 1999. 77(6): p. 360-365.
83. Maximator GmbH, Schmidt Kranz Group – dane techniczne.
84. Mullier, A. and Rustin, A., (1984), Fire in a Compressor House, *Plant Operations Progress*, Jan. 1984, 3, No. 1, 46–49.
85. NFPA 30, Flammable and combustible liquids code, National Fire Protection Association, Quincy, MA., 2015.
86. Nicholson K., Otto N., Ledohowski E., (1992) A history of flour milling in Manitoba, *Economic History Theme Study Historic Resources Branch* May 1992.
87. Oancea D., Razus Domnina, Munteanu V., Cojocea Irina (2003) High voltage and break spark ignition of propylene/air mixtures at various initial pressures *Loss Prevention in the Process Industries*, 16 5 353-361.
88. Orzechowski Z. i Prywer J. (2008), Wytwarzanie i zastosowanie rozpylonej cieczy. WNT, Warszawa.
89. PN ISO 4225: 1999 Jakość powietrza -- Zagadnienia ogólne – Terminologia.
90. PN-EN 1127-1:2019-10, Atmosfery wybuchowe -- Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem -- Część 1: Pojęcia podstawowe i metodyka.
91. PN-EN 13237:2013-04 Atmosfery potencjalnie wybuchowe -- Terminy i definicje dotyczące urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferach potencjalnie wybuchowych.
92. PN-EN 13821:2004 Przestrzenie zagrożone wybuchem – Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem – Oznaczenia minimalnej energii zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych.
93. PN-EN 15967:2022 Oznaczanie maksymalnego ciśnienia wybuchu i maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu gazów i par.
94. PN-EN 1839; 2017-02 Oznaczanie granic wybuchowości i granicznego stężenia tlenu (GST) dla palnych gazów i par.
95. PN-EN IEC 60079-10-1:2021-09 Atmosfery wybuchowe - Część 10-1: Klasyfikacja przestrzeni - Gazowe atmosfery wybuchowe.
96. PN-EN ISO/IEC 80079-20-1:2015 Atmosfery wybuchowe -- Część 20-1: Właściwości materiałowe dotyczące klasyfikacji gazów i par -- Metody badawcze i dane.

97. PN-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016, Atmosfery wybuchowe -- Część 20-2: Właściwości materiałowe -- Metody badań pyłów palnych.
98. PN-EN 14034-1+A1:2011 Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłów – Część 1: Oznaczanie maksymalnego ciśnienia wybuchu $p_{\max}$ obłoku pyłu.
99. PN-EN 14034-2+A1:2011 Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłów – Część 2: Oznaczanie maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{\max}$ obłoku pyłu.
100. PN-EN 14034-3+A1:2011 Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu -- Część 3: Oznaczanie dolnej granicy wybuchowości DGW obłoków pyłu.
101. PN-EN 14034-4+A1:2011 Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu -- Część 4: Oznaczanie granicznego stężenia tlenu GST obłoków pyłu.
102. PN-EN-15794: 2010, Oznaczanie punktów wybuchowości cieczy palnych.
103. Polymeropoulos, C.E., (1984). Flame propagation in aerosols of fuel droplets, fuel vapor and air. Combust. Sci. Technol.. doi:10.1080/00102208408923807.
104. Price D. J. and Brown H. H. (1922) Dust Explosions, National Fire Protection Association, Boston, MA, 1922.
105. Randeberg E., Eckhoff Rolf K. (2007) Measurement of minimum ignition energies of dust clouds in the <1 mJ region,, Journal of Hazardous Materials 140 (2007) 237-244.
106. Randeberg E., Olsen W., Eckhoff Rolf K., (2006) A new method for generation of synchronised capacitive sparks of low energy Journal of Electrostatics 64 263–272.
107. Rose, H.E., Priede, T., (1958). Ignition Phenomena in Hydrogen-Air Mixtures, 7th Symposium (International) on Combustion. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(58\)80076-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(58)80076-4).
108. Santon R. C. (2009) Mist Fires and Explosions – An Incident Survey IChemE Symposium series no. 155 (2009) 370-374.
109. Schicka R. J. (2008) Spray Technology Reference Guide: Understanding Drop Size Bulletin No. 459C Printed in the U.S.A. ©Spraying Systems Co. 2008.
110. Shepherd Joseph E., Christopher J. K., and Lee Julian J. (1997) Jet A Explosion Experiments: Laboratory Testing, Explosion Dynamics Laboratory Report FM97-5.
111. Shepherd, Joseph E., Krok, J.C., Lee, J.J., (2000), Spark Ignition Energy Measurements in Jet A, Explosion Dynamics Laboratory Report FM97-9. National Transportation Safety Board.
112. SIRIUS Technical Reference Manual V24-2 (2022).

113. Siwek R. (1988), Reliable Determination of the Safety Characteristics in the 20-l Apparatus, Proceedings of the Conference 'Flammable Dust Explosion'. St. Louis. Missouri. USA. 2-4 November 1988.
114. Skowron M., Pielecha I. (2015) Comparative analysis of fuel spray behaviour of selected types of liquid fuel injectors(in Polish) Journal Logistik No.3.
115. Spitzer S., Askar E., Krietsch A., Schröder V. (2021). Comparative study on standardized ignition sources used for explosion testing, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 71 (2021) 104516.
116. Sulaiman M. Y., Ayob M. R and Meran, I. (2013), Performance of Single Cylinder Spark Ignition Engine Fueled by LPG, Procedia Engineering 53 (2013) 579 – 585.
117. Sullivan M. V., Wolfe J. K., Zisman W. A. (1947). Flammability of the higher boiling liquids and their mists. Ind. Eng. Chem. 39 (12), 1607-1614.
118. Tauseef S. M., Ramyapriya R., Abbasi T. and Abbasi S. A. (2017) Models for assessing the spread of flammable liquid spills and their burning International Journal of Engineering, Science and Mathematics (UGC Approved) Vol. 6 Issue 8.
119. Thimothée R., (2017), Experimental Characterization of a Laminar Flame Propagation in a Two-phase Medium (Aerosol) in Microgravity Conditions, PhD Thesis. Université' Orléans, France (in French).
120. Toman A., Adamus W. (2022), Explosive properties of selected aerosols determined in the spherical 5-L test chamber Proceedings of the 14th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE 2022), Braunschweig, Germany, 2022. DOI: 10.7795/810.20221124.
121. Toman A., Adamus W. (2023), Explosive properties of selected aerosols determined in a spherical 5-L test chamber, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 82, April 2023, 104992.
122. Toman A., Adamus W. (2024), Experimental Determination of the Minimum Ignition Energy for Aerosols of Combustible Liquids, 15th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions Naples, Italy | June 10 – 14, 2024 DOI: 10.5281/zenodo.12515711.
123. Uchman W., Werle S. (2018) The ignition phenomenon of gases—part I: the experimental analysis—a review Journal of Power Technologies 98 (2) 171-182.

124. Wang Z., Sheng H., Yang S., Ye S. (2022) Reconsideration of energy measurement of spark discharge using different triggering methods and inductance loads *Journal of Electrostatics* 117 103724.
125. Williams, A. (1990) *Combustion of liquid fuel sprays.*: Butterworth-Heinemann.
126. Yuan S., Ji C., Han H., Sun Y., Mashuga C (2021), A review of aerosol flammability and explosion related incidents, standards, studies, and risk analysis *Process Safety and Environmental Protection* 146 (2021) 499–514.
127. Yuan S., Ji C., Monhollen A., Sang-II Kwon J., Mashuga C (2019) Experimental and thermodynamic study of aerosol explosions in a 36 L Fuel *Volume 245*, 1 June 2019, Pages 467-477 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.02.078>.
128. Zabetakis M.G. (1965), *Flammability characteristics of combustible gases and vapors.* 1965, DTIC Document.
129. Zehr, J., (1965), *Eigenschaften brennbarer Stäube und Nebel in Luft.* Chapter in "Handbuch der Raum explosionert\ editedby H.H. Freytag, Verlag Chenfie GmbH, Weinheim 1965; p. 164-186.

Spis rysunków

Rys. 4.1.	Trójkąt wybuchowości Cowarda mieszaniny powietrzno–metanowej (oprac. własne na podstawie: Kabiesz i in. 2014).....	19
Rys. 4.2.	Pięciokąt wybuchowości (oprac. własne).....	20
Rys. 4.3.	Proces atomizacji [Schicka, 2008].....	26
Rys. 5.1.	Widok stanowisk badawczych z układami do rozpylania heksanu [Gieras i in., 2008]	35
Rys. 5.2.	Schemat układu wytwarzania aerozolu heksanu [Gieras i in., 2008]	35
Rys. 5.3.	Schemat stanowiska badawczego [Huang, 2013].....	36
Rys. 5.4.	Stanowisko badawcze [Bai i Wang, 2015]	36
Rys. 5.5.	Schemat stanowiska badawczego ze sferą o pojemności 20 dm ³ [Addai, 2016] ..	37
Rys. 5.6.	Stanowisko badawcze [Yuan i in., 2019]	38
Rys. 5.7.	Schemat oceny zapalności i skutków wybuchu przez [Yuan i in., 2019].....	38
Rys. 5.8.	Syfonowo-grawitacyjny układ do generowania mgły [El – Zahlanieh i in., 2020, 2022a,b]	39
Rys. 5.9.	Rura do badań rozprzestrzeniania się płomienia w aerozolu [El – Zahlanieh i in., 2020, 2022a]	39
Rys. 5.10.	(A) sfera wybuchowa o pojemności 20 litrów, (B) połączenia dyszy do sfery [El – Zahlanieh i in., 2020, 2022a,b]	40
Rys. 5.11.	Konfiguracja eksperymentalna [Jia i in., 2023].....	40
Rys. 6.1.	Przykładowy przebieg wyznaczania parametrów wybuchowości p_{max} i $(dp/dt)_{max}$ (oprac. własne).....	46
Rys. 7.1.	Stanowisko badawcze (fot. A. Toman)	57
Rys. 7.2.	Komora badawcza 5 dm ³ (fot. A. Toman).....	57
Rys. 7.3.	Górny adapter komory z elektrodami zapłonowymi (fot. A. Toman).....	58
Rys. 7.4.	Dolny adapter komory na wtrysk (fot. A. Toman)	59
Rys. 7.5.	Wysokociśnieniowa pompa Maximator GSF 35 (fot. A. Toman)	60
Rys. 7.6.	Charakterystyka wydajnościowa pompy GSF 35 (źródło: dokumentacja techniczna).....	61
Rys. 7.7.	Schemat połączenia pompy wysokociśnieniowej (źródło: instrukcja montażu i obsługi)	61
Rys. 7.8.	Pompa wysokociśnieniowa z zamontowanym lejkiem na ciecz (fot. A. Toman) ..	62

Rys. 7.9.	Schemat układu pompowego (oprac. własne)	63
Rys. 7.10.	Wtryskiwacz BOSCH HDEV 0 261 500 109 (fot. A. Toman)	64
Rys. 7.11.	Przezroczysta komora sferyczna i rozproszony aerozol nafty o koncentracji 336 g/m ³ (fot. A. Toman)	64
Rys. 7.12.	Rozpylenie paliwa z wielootworowego wtryskiwacza elektromagnetycznego Bosch HDEV (widok od frontu) [Skowron i Pielecha, 2015]	64
Rys. 7.13.	Układ sterowania wtryskiem Motoelektron CR1 (fot. A. Toman)	66
Rys. 7.14.	Generator iskier indukcyjnych o energii 7 J (fot. A. Toman)	68
Rys. 7.15.	Wyładowanie iskrowe pomiędzy elektrodami z generatora indukcyjnego (fot. A. Toman)	69
Rys. 7.16.	Szkic stanowiska badawczego z indukcyjnym źródłem zapłonu [Toman i Adamus, 2024]	69
Rys. 7.17.	Szkic stanowiska badawczego z pojemnościowym źródłem zapłonu [Toman i Adamus, 2024]	70
Rys. 7.18.	Generator iskier pojemnościowych (fot. A. Toman)	71
Rys. 7.19.	Schemat blokowy układu sterowania (oprac. własne)	73
Rys. 7.20.	Układ sterowania (fot. A. Toman)	73
Rys. 7.22.	Czujnik ciśnienia firmy Kistler 4011A020DSH, zamontowany w adapterze (fot. A. Toman)	76
Rys. 7.23.	Schemat czujnika ciśnienia firmy Kistler 4011A020DSH (źródło: Kistler data sheet)	77
Rys. 7.24.	Umieszczenie czujnika ciśnienia w komorze badawczej (fot. A. Toman)	77
Rys. 7.25.	Piezorezystancyjny wzmacniacz Kistler 4624A z podłączonym czujnikiem ciśnienia (fot. A. Toman)	78
Rys. 7.26.	Termopara typu K (fot. A. Toman)	79
Rys. 8.1.	Wytwarzanie aerozolu w przezroczystej, sferycznej kuli o objętości około 5 dm ³ ; stężenie aerozolu 150 g/m ³ , pojedynczy wtrysk (oprac. własne)	82
Rys. 8.2.	Przykładowy przebieg czasowy sekwencji 10 wtrysków (oprac. własne)	83
Rys. 8.3.	Wytwarzanie aerozolu nafty w przezroczystej, sferycznej kuli o objętości około 5 dm ³ ; stężenie aerozolu 336 g/m ³ , sekwencja 10 impulsów (oprac. własne)	83
Rys. 8.4.	Test wydajnościowy wtryskiwacza dla ciśnienia wtrysku 100, 150, 200 barg (oprac. własne)	85

Rys. 8.5.	Pomiar wielkości cząstek aerozoli; ciśnienie cieczy 150 barg [Toman i Adamus, 2023].....	86
Rys. 8.6.	Schemat poglądowego stanowiska pomiarowego wielkości cząstek aerozolu (oprac. własne).....	87
Rys. 8.7.	Stanowisko pomiarowe wielkości cząstek aerozolu (fot. A. Toman)	88
Rys. 8.8.	Pomiar średniej średnicy Sautera nafty dla 1 i 10 wtrysków w transparentnej kuli, ciśnienie cieczy 150 barg [Toman i Adamus, 2023]	89
Rys. 8.9.	Pomiar średniej średnicy Sautera izopropanolu w sekwencji 1 i 10 wtrysków w transparentnej kuli, ciśnienie cieczy 150 barg [Toman i Adamus, 2023].....	89
Rys. 8.10.	Rozkład wielkości cząstek aerozolu izopropanolu w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2023].....	91
Rys. 8.11.	Rozkład wielkości cząstek aerozolu izopropanolu w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2023]	91
Rys. 8.12.	Rozkład wielkości cząstek aerozolu nafty w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2023].....	92
Rys. 8.13.	Rozkład wielkości cząstek aerozolu nafty w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2023].....	92
Rys. 8.15.	Rozkład wielkości cząstek aerozolu izopropanolu w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2024]	94
Rys. 8.16.	Rozkład wielkości cząstek aerozolu izopropanolu w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2024]	95
Rys. 8.17.	Rozkład wielkości cząstek aerozolu etanolu w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2024].....	96
Rys. 8.18.	Rozkład wielkości cząstek aerozolu eteru dietylowego 99,5% w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera $D [3][2]$ (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2024].....	97

Rys. 8.19.	Rozkład wielkości cząstek aerozolu eteru dietylowego 99,5% w funkcji czasu dla średniej średnicy Sautera D [3][2] (10 wtrysków wytwarzanych w kuli, ciśnienie cieczy 150 barg) [Toman i Adamus, 2024]	97
Rys. 8.20.	Synchronizacja źródła zapłonu z procesem atomizacji (fot. A. Toman).....	99
Rys. 8.21.	Sprawdzenie synchronizacji czasowej przekaźnika ETM-442 z procesem atomizacji (oprac. własne)	99
Rys. 8.22.	Ciśnienie wybuchu p nafty dla stężenia 336 g/m^3 w funkcji opóźnienia zapłonu w temperaturze $\sim 20^\circ\text{C}$ [Toman i Adamus, 2023].....	100
Rys. 8.23.	Maksymalna szybkość wzrostu ciśnienia wybuchu (dp/dt) nafty dla stężenia 336 g/m^3 w funkcji opóźnienia zapłonu w temperaturze $\sim 20^\circ\text{C}$ [Toman i Adamus, 2023]	101
Rys. 8.24.	Ciśnienie wybuchu p izopropanolu dla stężenia 314 g/m^3 w funkcji opóźnienia zapłonu w temperaturze $\sim 20^\circ\text{C}$ [Toman i Adamus, 2023]	102
Rys. 8.25.	Maksymalna szybkość wzrostu ciśnienia wybuchu (dp/dt) izopropanolu dla stężenia 314 g/m^3 w funkcji opóźnienia zapłonu w temperaturze $\sim 20^\circ\text{C}$ [Toman i Adamus, 2023].....	102
Rys. 8.26.	Zależność ciśnienia wybuchu p aerozolu nafty dla stężenia 336 g/m^3 od temperatury [Toman i Adamus, 2023].....	103
Rys. 8.27.	Zależność maksymalnej szybkość wzrostu ciśnienia wybuchu (dp/dt) aerozolu nafty dla stężenia 336 g/m^3 od temperatury [Toman i Adamus, 2023]	104
Rys. 9.1.	Fragment przedniego panelu systemu sterowania (fot. A. Toman).....	108
Rys. 9.2.	Schemat funkcjonalny stanowiska badawczego z przepływem mediów i sygnałów [Toman i Adamus, 2023].....	109
Rys. 9.3.	Wykres czasowy procesu atomizacji i opóźnienia zapłonu [Toman i Adamus, 2024].....	110
Rys. 9.4.	Wykres czasowy dla 10, 20 i 30 wtrysków z opóźnieniem zapłonu w danej sekwencji [Toman i Adamus, 2023].....	111
Rys. 9.5.	Przebieg przyrostu ciśnienia z zaznaczonym maksymalnym ciśnieniem wybuchu (p_{ex}) dla aerozolu izopropanolu (oprac. własne).....	113
Rys. 9.6.	Przebieg wyznaczonej wartości szybkości narastania ciśnienia (dp/dt) w funkcji czasu z przebiegu ciśnienia (P) dla aerozolu izopropanolu (oprac. własne)	114

Rys. 9.7.	Wykres przyrostu ciśnienia (p) i graficzna metoda wyznaczania $(dp/dt)_{ex}$ z zaznaczonymi najważniejszymi elementami opisującymi histogram (oprac. własne).....	115
Rys 9.8.	Schemat postępowania w opracowanej metodzie badawczej pracy doktorskiej.	121
Rys. 10.1.	Oznaczenie parametru wybuchowości p_{max} aerozolu nafty w zakresie stężeń 45 – 336g/m ³ [Toman i Adamus, 2023]	123
Rys. 10.2.	Oznaczenie parametru wybuchowości $(dp/dt)_{max}$ aerozolu nafty w zakresie stężeń 45 – 336g/m ³ [Toman i Adamus, 2023]	123
Rys. 10.3.	Oznaczenie parametru wybuchowości p_{max} aerozolu izopropanolu w zakresie stężeń 63 – 943 g/m ³ [Toman i Adamus, 2023]	124
Rys. 10.4.	Oznaczenie parametru wybuchowości $(dp/dt)_{max}$ aerozolu izopropanolu w zakresie stężeń 63 – 943 g/m ³ [Toman i Adamus, 2023]	125
Rys. 10.5.	Oznaczenie parametru wybuchowości p_{max} aerozolu eteru dietylowego dla różnych czasów opóźnienia zapłonu [Toman i Adamus, 2024]	126
Rys. 10.6.	Oznaczenie parametru wybuchowości $(dp/dt)_{max}$ aerozolu eteru dietylowego dla różnych czasów opóźnienia zapłonu [Toman i Adamus, 2024]	127
Rys. 10.7.	Oznaczenie parametru wybuchowości p_{max} aerozolu etanolu dla różnych czasów opóźnienia zapłonu (oprac. własne)	128
Rys. 10.8.	Oznaczenie parametru wybuchowości $(dp/dt)_{max}$ aerozolu etanolu dla różnych czasów opóźnienia zapłonu (oprac. własne).....	129
Rys. 10.9.	Dolna granica wybuchowości (DGW) dla aerozolu izopropanolu (oprac. własne)	130
Rys. 10.10.	Oznaczenie dolnej granicy wybuchowości (DGW) dla aerozolu etanolu (oprac. własne).....	131
Rys. 10.11.	Wynik oznaczenia MIE dla izopropanolu z indukcyjnym źródłem zapłonu [Toman i Adamus, 2024]	132
Rys. 10.12.	Wynik oznaczenia MIE dla izopropanolu z zastosowanym źródłem zapłonu bez indukcyjności [Toman i Adamus, 2024]	133
Rys. 10.13.	Wynik oznaczenia MIE dla etanolu z zastosowanym źródłem zapłonu bez indukcyjności [Toman i Adamus, 2024]	134
Rys. 10.14.	Wynik oznaczenia MIE dla eteru dietylowego z zastosowanym źródłem zapłonu bez indukcyjności [Toman i Adamus, 2024]	135

Spis tabel

Tabela 4.1.	Wybrane metody oznaczania temperatury zapłonu cieczy	23
Tabela 4.2.	Klasyfikacja cieczy palnych	24
Tabela 4.3.	Klasyfikacja cieczy palnych i łatwopalnych.....	25
Tabela 7.1.	Dane techniczne wtryskiwacza BOSCH HDEV 0 261 500 109	65
Tabela 7.2.	Dane techniczne kanałów STG urządzenia pomiarowego Sirius HS	74
Tabela 7.3.	Dane techniczne czujników ciśnienia Kistler typu 4011A20	76
Tabela 7.4.	Dane techniczne wzmacniacza czujnik ciśnienia Kistler typu 4624A	78
Tabela 8.1.	Właściwości fizykochemiczne badanych cieczy	81
Tabela 8.2.	Parametry rozkładu wielkości kropel cieczy	87
Tabela 8.3.	Parametry rozkładu wielkości kropel cieczy	90
Tabela 11.1.	Porównanie wyników badań parametrów wybuchowości dla aerozolu nafty .	141
Tabela 11.2.	Porównanie wyników badań parametrów zapalności i wybuchowości dla aerozolu izopropanolu	141
Tabela 11.3.	Porównanie wyników badań parametrów zapalności i wybuchowości dla aerozolu etanolu	142
Tabela 11.4.	Porównanie wyników badań parametrów zapalności i wybuchowości dla aerozolu eteru dietylowego	142