

BADANIE CHARAKTERYSTYK WYBUCHOWOŚCI PYŁÓW PRZEMYSŁOWYCH

RAFAŁ POROWSKI, PIOTR LESIAK

Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości
Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwopozarowej, Państwowy Instytut Badawczy
ul. Nadwiślańska 213, 04-422 Józefów
e-mail: rporowski@cnbop.pl

Wprowadzenie

Pierwszy wybuch pyłu, jaki odnotowano w światowej literaturze miał miejsce 14 grudnia 1785r. we Włoszech. Turyńska Akademia Nauki podała, że był to wybuch pyłu mąki w magazynie w centrum Turynu. Zgodnie z zapiskami literatury w wyniku wybuchu budynek całkowicie został zniszczony. Następnie w ciągu ponad 100 lat w literaturze przedmiotu zanotowano 4 kolejne przypadki wybuchów pyłów, co przedstawia Tabela 1.

Tabela 1. Historyczne przypadki wybuchów pyłów [1, 2].

Rok	Miejsce	Instalacja	Rodzaj pyłu	Szkody
1858	Szczecin	Młyn	Zboże	Zniszczenie młynu
1860	Milwaukee (USA)	Młyn	Mąka	Zniszczenie młynu
1864	Mascoutah (USA)	Młyn	Mąka	Zniszczenie młynu
1887	Hameln (Niemcy)	Silos	Zboże	Zniszczenie silosa i kilku budynków

Ostatni z wymienionych w Tabeli 1 przypadków miał miejsce w Niemczech w miejscowości Hameln w 1887r. Wybuch powstał w silosie zbożowym, w wyniku którego oprócz silosa zniszczeniu uległo kilka położonych w okolicy budynków. Rysunek 1 przedstawia skutki, jakie spowodował ten wybuch.



Rysunek 1. Wybuch silosa zbożowego w miejscowości Hameln w Niemczech w 1887r [1].

Wybuchy pyłów palnych zdarzały i nadal zdarzają się obecnych czasach. Jako przykład drastycznego w skutkach wybuchu posłużyć może wybuch, który powstał 20 sierpnia 1997r. w miejscowości Blaye we Francji [3]. W wyniku wybuchu elewatora zbożowego śmierć poniosło 12 osób oraz jedna została ranna. Elewator zbożowy uległ w większej części zawaleniu, a budynki administracyjne zlokalizowane w pobliżu zostały całkowicie zniszczone. Rysunek 2 obrazuje częściowe skutki tego wybuchu.



Rysunek 2. Skutki wybuchu elewatora zbożowego w Blaye (Francja) w 1997 [3].

Kolejnym z przypadków tragicznych w skutkach wybuchów pyłów palnych, był incydent w fabryce leków West Pharmaceutical Services w miejscowości Kinston w Stanach Zjednoczonych, który miał miejsce w dniu 28 stycznia 2003r. [4]. W wyniku wybuchu śmierć poniosło 6 osób, 38 zostało rannych, a budynek fabryki uległ całkowitemu zniszczeniu, co przedstawia Rysunek 3.



Rysunek 3. Wybuch w fabryce leków w Stanach Zjednoczonych w 2003 [4].

Podstawy wybuchowości pyłów palnych

Zjawisko wybuchów pyłów jest bardzo podobne do wybuchu gazów, jednakże mimo wszystko istnieje kilka znaczących różnic pomiędzy tymi zjawiskami [7]. Zagrożenie wybuchem pyłów w przemyśle pojawić się może praktycznie w każdym przypadku, gdzie występuje pył palny. Pyły palne stwarzają zagrożenie wybuchem poprzez:

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

Pierwszy przypadek będzie miał miejsce w momencie, gdy rozproszony w powietrzu pył palny utworzy mieszaninę pyłowo-powietrzną w stężeniu powyżej dolnej granicy wybuchowości. Jeżeli spalający się pył zostanie rozproszony, wówczas wytworzy się jego zawiesina w powietrzu, która w obecności odpowiedniego źródła zapłonu ulegnie zapaleniu. W ten sposób powstanie wybuchowa mieszanina pyłowo-powietrzna. Ponadto, palące się cząstki pyłu mogą stwarzać potencjalne źródło zapłonu dla innych materiałów łatwopalnych znajdujących się w pobliżu. Proces wybuchu mieszaniny pyłowo-powietrznej składa się w uproszczeniu z [5]:

- transportu ciepła do powierzchni cząstki, przejmowania go przez cząstkę i jej nagrzewania,
- rozkładu termicznego powierzchni cząstki z dalszym jej nagrzewaniem oraz wydzielaniem części lotnych,
- mieszania się wydzielonych części lotnych z powietrzem wytwarzającego mieszaninę palną i jej zapaleniu,
- transportu ciepła od płomienia do sąsiednich cząstek oraz ich utlenianie i zapłon.

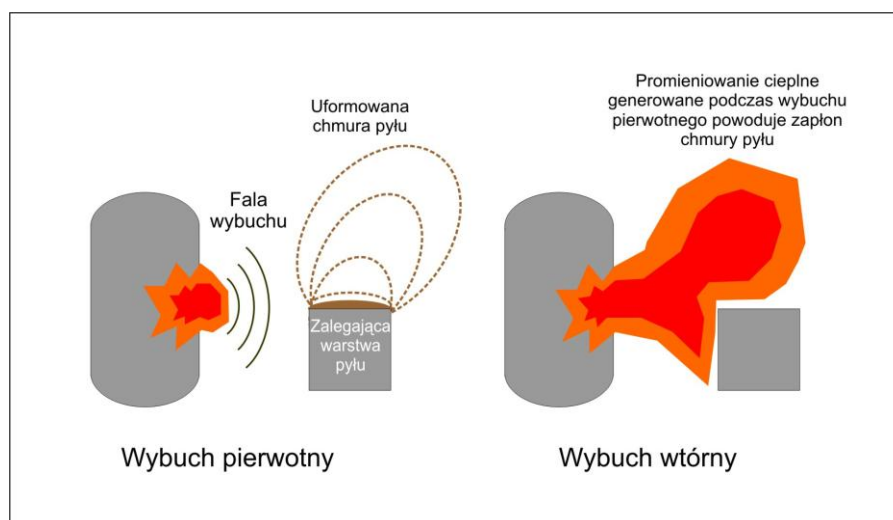
Drugi przypadek dotyczący zapłonu warstwy pyłu palnego, odnosi się głównie do urządzeń elektrycznych stosowanych w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, choć nie tylko, których gorące powierzchnie stanowią potencjalne źródło zapłonu nagromadzonych warstw pyłu. Podczas wybuchów pyłów palnych proces spalania przebiega dość gwałtownie. Szybkość rozprzestrzeniania się płomienia jest wówczas wysoka, porównywalna z szybkością wybuchu deflagacyjnego gazów. Maksymalne ciśnienie wybuchu (P_{max}) jest często porównywalne do wartości teoretycznych (obliczeniowych), w których zakłada się, że nie występują straty ciepła podczas wybuchu.

Do tej pory nie określono jeszcze jednoznacznie, czy wybuch detonacyjny mieszanin pyłowo-powietrznych może pojawić się w warunkach przemysłowych. Szybkość rozprzestrzeniania się płomienia w mieszaninach pyłowo-powietrznych jest stosunkowo duża i w niektórych przypadkach stwierdzono, że jest zbliżona do wybuchu detonacyjnego. Jednakże większość tego typu przypadków związana jest z zagrożeniem wybuchem pyłu węglowego w kopalniach, gdzie proces ten był zainicjowany przez silne źródła zapłonu, a dodatkowo wybuch rozprzestrzenił się w przestrzeni ograniczonej [6]. Nie jest jednak na 100% pewne, czy wybuch detonacyjny mieszanin pyłowo-powietrznych może być zapoczątkowany przy słabym źródle zapłonu, które bardzo często występuje w warunkach przemysłowych.

Spośród odnotowanych i przeanalizowanych przez ekspertów wybuchów pyłowych na całym świecie [1-2], kolejność zdarzeń odnotowanych podczas zaistniałych wybuchów jest zazwyczaj następująca. Pierwotny wybuch pojawia się wewnątrz zakładu. Zastosowane tam techniczne systemy zabezpieczeń okazują się niewystarczające, aby zapobiec wydostaniu się

plamieni poza zakład, zarówno podczas rozerwania np. silosa, jak również poprzez źle zaprojektowaną i wykonaną wentylację. Następuje wówczas coraz większy przepływ powietrza do spalającego się pyłu, powodując tym samym wtórny wybuch. Ilość pyłu zaangażowanego we wtórny wybuch często przekracza ilość pyłu biorącego udział w wybuchu pierwotnym. Ponadto budynek, w którym powstało zjawisko wtórnego wybuchu jest często o słabej konstrukcji budowlanej niż np. konstrukcja urządzenia, w którym pył był pierwotnie przechowywany. Należy również pamiętać o tym, że skutki wtórnego wybuchu są znacznie bardziej destrukcyjne w odniesieniu do wybuchu pierwotnego.

W niektórych przypadkach pierwotny wybuch może również pojawić się w przestrzeniach otwartych, gdzie nagromadzona jest odpowiednia warstwa pyłu, co z kolei może się również znacznie przyczynić do zjawiska wtórnego wybuchu. W pozostałych przypadkach pierwotny wybuch zazwyczaj związany jest z pojedynczym urządzeniem technologicznym w zakładzie, a następnie rozprzestrzenia się wewnątrz zakładu na kolejne urządzenia lub części instalacji technologicznej. Przykład mechanizmu powstania wtórnego wybuchu pyłowego obrazuje Rysunek 4. Możliwość powstania całkowicie destrukcyjnego w skutkach wybuchu wtórnego sprawia, że zagrożenie wybuchem pyłów nie może być do końca przewidywalne.



Rysunek 4. Przykład powstania wtórnego wybuchu pyłowego [2].

Zjawisko wybuchu pyłów może zaistnieć jedynie, gdy pył zostanie rozproszony w powietrzu, tworząc mieszaninę pyłowo-powietrzną o stężeniu w zakresie pomiędzy dolną, a górną granicą wybuchowości. W ten sposób powstanie wybuchowa chmura pyłu. Badanie charakterystyk wybuchowości mieszanin pyłowo-powietrznych stanowi fundamentalny aspekt w zakresie projektowania oraz prawidłowego doboru innowacyjnych systemów zabezpieczeń przed wybuchem, w tym przede wszystkim takich metod zapobiegania jak odciążanie wybuchów, tłumienie wybuchów, czy izolacja wybuchów. Do prawidłowego doboru tych metod zapobiegania konieczne jest poznanie najważniejszych właściwości wybuchowych pyłów palnych występujących w zakładach przemysłowych, w tym przede wszystkim:

- maksymalne ciśnienie wybuchu – P_{max} ,
- maksymalny przyrost ciśnienia wybuchu – $(dp/dt)_{max}$,
- dolna granica wybuchowości – DGW,
- górna granica wybuchowości – GGW,
- minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu – MTZ_w ,

- minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu – MTZ_o ,
- minimalna energia zapłonu – MEZ,
- graniczne stężenie tlenu – GST,
- klasa wybuchowości pyłu – K_{st} .

Wybuchowość mieszanin pyłowo-powietrznych określana jest poprzez parametry bardzo podobne do tych, które określają palność mieszanin gazowo-powietrznych. Jednakże istnieje pomiędzy tymi przypadkami kilka znaczących różnic. Wybuchowość pyłów można rozważyć jako wzrastający stopień stężenia wybuchowego, minimalnej temperatury zapłonu, minimalnej energii zapłonu, ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu. Charakterystyka cząstek pyłów jest czynnością niezwykle złożoną, ale ogólnie rzecz biorąc związana jest głównie z budową cząstki, gęstością, rozmiarem, kształtem, powierzchnią, zawartością wilgoci, itp. Przykładowymi czynnikami wpływającymi na wybuchowość pyłów są [2]:

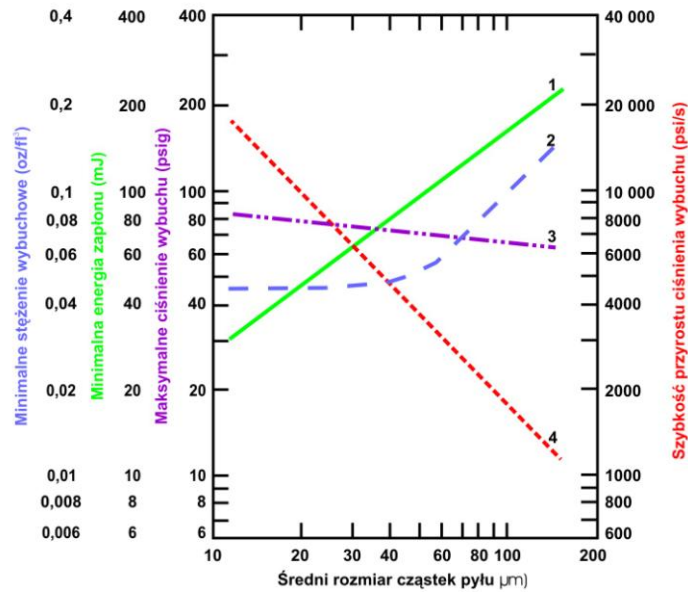
- skład chemiczny cząstki,
- rozmiar cząstki,
- zawartość wilgoci,
- stężenie tlenu,
- obecność gazu inercyjnego,
- stężenie pyłu.

Literatura przedmiotu [1-2] przedstawia dużo dowodów i przykładów wskazujących na oddziaływanie tych czynników na właściwości wybuchowe pyłów, szczególnie dla kilku rodzajów pyłów. Jest zatem kilka grup chemicznych takich jak COOH, OH, NH₂, NO₂, C≡N, C=N, N=N, które mają skłonność do wyższych właściwości wybuchowych, a natomiast pozostałe, takie jak Cl, Br czy F mają skłonności do niższych parametrów pod względem wybuchowości. Pyły czystych metali generalnie reagują z powietrzem tworząc tlenki metali. W tym przypadku przyrost ciśnienia wybuchu powodowany poprzez wydzielanie ciepła. W niektórych przypadkach metale gwałtownie reagują z azotem tworząc azotki metali. Pyły posiadają skłonności do zmiany (polepszania) właściwości wybuchowych, nawet do 10%.

Wybuchowość pyłów jest znacznie związana z rozmiarem cząstek pyłu. Rozmiar cząstek pyłu jest zazwyczaj zamiennie określany jako ekwiwalent średnicy cząstek. Cząstki pyłów o średnicy większej niż 500 μm są mało prawdopodobnie zdolne do wytworzenia mieszaniny wybuchowej, chociaż ulegają procesowi spalania. Z drugiej jednak strony ograniczenie (zmniejszenie) rozmiaru cząstek poniżej ok. 50-74 μm nie odgrywa znaczenia w zwiększeniu się właściwości wybuchowych. Średnica cząstek pyłów wykorzystywana do badań nad właściwościami wybuchowymi pyłów zazwyczaj nie przekracza 75 μm.

Pył przemysłowy zazwyczaj zawiera pewien określony zakres rozmiarów cząstek. Małe aglomeraty pyłu polepszają zdolności wybuchowe. Rysunek 5 obrazuje wpływ rozmiaru cząstek na jedno z najbardziej istotnych parametrów wybuchowych pyłów. Należy jednak pamiętać, że na Rysunku 5 przedstawiono dane dla rozpylonego aluminium, który stanowi raczej jeden ze skrajnych przypadków, nie zaś dla wszystkich rodzajów pyłów.

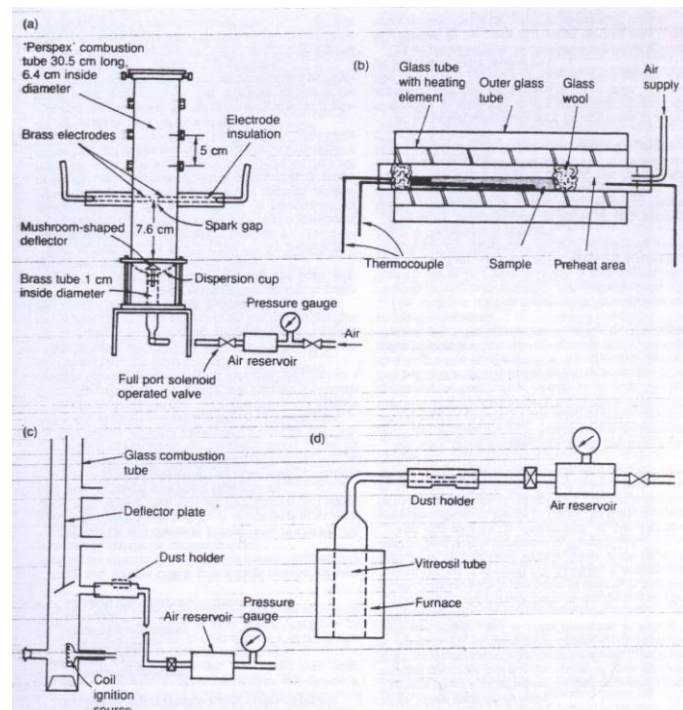
Istotne znaczenie w zakresie wybuchowości pyłów ma również zawartość wilgoci, chociaż nie odgrywa znaczącej roli poniżej 10%. Jednakże przy zawartości wilgoci powyżej 30% mało prawdopodobne, że wybuch powstanie. Stężenie tlenu w otoczeniu odgrywa silny wpływ na wybuchowość pyłów, która znacznie wzrasta proporcjonalnie do wzrostu stężenia tlenu i na odwrót.



Rysunek 5. Charakterystyka wybuchowości pyłów - wpływ rozmiaru cząstek na poszczególne parametry dla rozpylonego aluminium: **1** - MEZ, **2** - DGW, **3** - P_{max} , **4** - $(dp/dt)_{max}$.

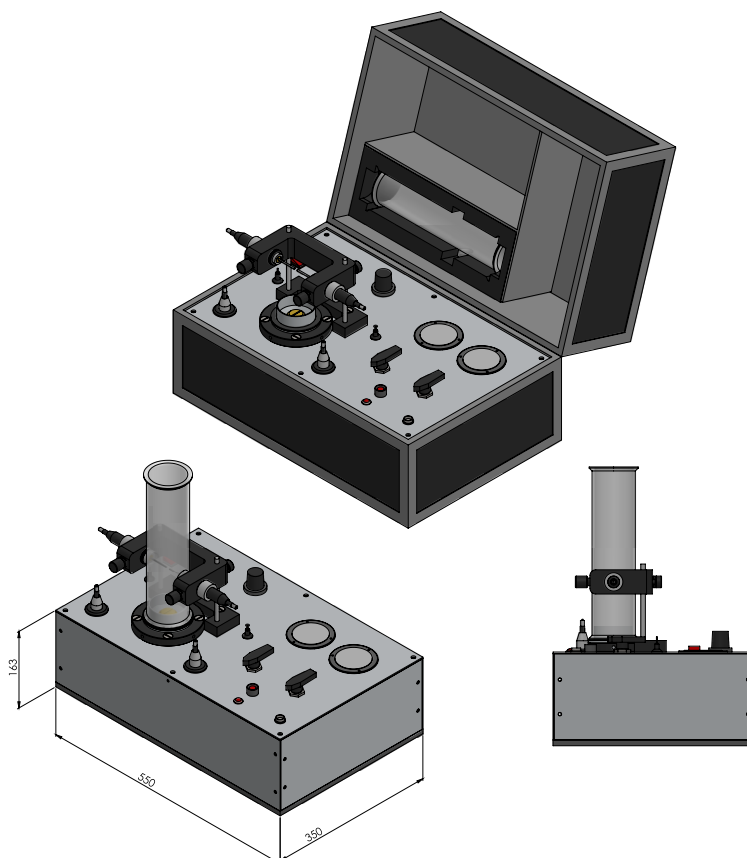
Metody badawcze

W wielu krajach na całym świecie prowadzone są badania w zakresie wybuchowości pyłów. Należałoby jednak w tym miejscu rozpocząć od badań, które przeprowadziło Bureau of Mines w Stanach Zjednoczonych, które później w szerokim zakresie wykorzystywano na całym świecie, również w Polsce. Niektóre stanowiska badawcze do pomiarów parametrów wybuchowości pyłów palnych używane w testach BoM pokazano na Rysunku 6.



Rysunek 6. Stanowiska badawcze do pomiarów charakterystyk wybuchowości pyłów Bureau of Mines: **(a)** pionowa rura Hartmanna, **(b)** pozioma rura, **(c)** aparat zapłonowy, **(d)** piec Godbert-Greenwalda.

Wybuchowość pyłów została określona między innymi w urządzeniu Hartmanna [1], Rysunek 6a. Stanowisko to złożone jest z pionowej rury o pojemności 1.2 l. Podczas testu pył zostaje rozproszony przez wtrysk sprężonego powietrza. Źródło zapłonu stanowi gorący przewód drutowy lub zapłon iskrowy. Jeśli podczas testu zaobserwuje się jakiegokolwiek rozprzestrzenianie się płomieni, to badany pył uważa się za wybuchowy. Obecnie w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości CNBOP-PIB do wstępnej oceny wybuchowości pyłów wykorzystuje się zmodyfikowane stanowisko Hartmanna, nazwane jako demonstrator wybuchowości pyłów, co przedstawiono na Rysunku 7.



Rysunek 7. Stanowisko badawcze do wstępnej oceny wybuchowości pyłów, stosowane w CNBOP-PIB.

Dwa pozostałe rodzaje aparatury badawczej, pierwotnie stosowane w Bureau of Mines, które są również wykorzystywane do badania czy pył jest wybuchowy, to pozioma rura oraz urządzenie zapłonowe (tzw. inflammator), przedstawione na Rysunku 6 b i c. W urządzeniu złożonym z poziomej rury pył jest również rozpraszany przez podmuch powietrza, a źródło zapłonu stanowi gorąca spirala. W urządzeniu zapłonowym zawieszona pyłu w powietrzu zostaje wtrącona do urządzenia na płytkę odchylającą i opada prosto na źródło zapłonu (rozgrzany drut lub zapalnik iskrowy). Urządzenie to jest szczególnie wykorzystywane w przypadku pyłów, które nie zostały jeszcze rozproszone.

Minimalna temperatura zapłonu obłoku pyłu badana jest w piecu Godbert-Greenwalda, co zostało przedstawione na Rysunku 6 d. Zawieszona pyłu zostaje wtrącona do pionowej rury utrzymywanej w stałej temperaturze pieca. Podczas tego badania obserwuje się pojawienie się płomienia na otwartym wylocie pieca.

Oddzielne oznaczenie minimalnej temperatury zapłonu stosuje się dla warstwy pyłu osiadłego, która zasadniczo różni się od przypadku oznaczenia MTZ obłoku pyłu. W celu zbadania MTZ dla warstwy pyłu osiadłego również wykorzystywany jest piec Godbert-Greenwalda, jednakże w tym przypadku pył jest zgromadzony w koszu z siatki drucianej o średnicy 1 cala i głębokości 0,5 cala. Inną metodą stosowaną w tym zakresie jest również zapłon warstwy pyłu osiadłego od gorącej płytki, na której pył ten jest zgromadzony, według wymagań standardu PN-EN 50281-2-1 [8]. Na Rysunku 8 przedstawiono stanowisko badawcze do pomiarów minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu, stosowane w CNBOP-PIB.



Rysunek 8. Stanowisko badawcze do pomiarów minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłów wg PN-EN 50281-2-1 w CNBOP-PIB.

Minimalna temperatura zapłonu pyłów palnych zmniejsza się wraz ze zmniejszeniem rozmiaru cząstek pyłu oraz wraz ze zwiększeniem zawartości części lotnych oraz stężenia tlenu, jak również ulega zwiększeniu wraz ze wzrostem zawartości wilgoci.

Minimalna energia zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych mierzona jest w pionowej rurze Hartmanna [9]. Podczas tego badania pył jest rozpraszany przez wtrysk sprężonego powietrza, a źródłem zapłonu jest iskra elektryczna. Następnie obserwuje się zapłon mieszaniny pyłowo-powietrznej oraz rozprzestrzenianie się płomienia przy zadanej wartości energii wyładowania iskry. Na Rysunku 9 przedstawiono stanowisko badawcze do pomiarów minimalnej energii zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych, stosowane w CNBOP-PIB.



Rysunek 9. Stanowisko badawcze do pomiarów minimalnej energii zapłonu pyłów wg PN-EN 13821 w CNBOP-PIB.

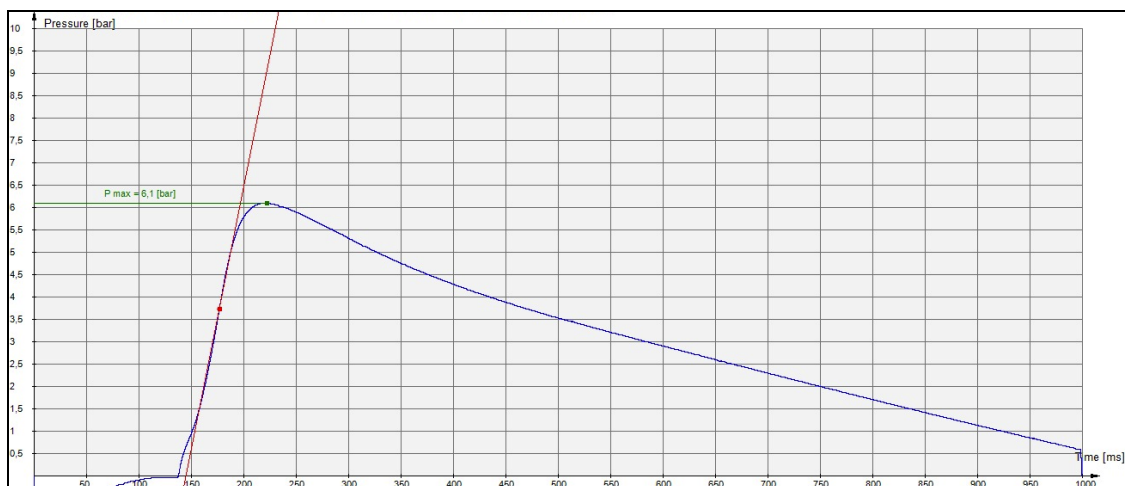
Minimalna energia zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych zmniejsza się wraz ze spadkiem rozmiaru cząstek pyłu oraz wraz ze zwiększeniem zawartości części lotnych i stężenia tlenu, jak również ulega zwiększeniu wraz ze wzrostem zawartości wilgoci.

Parametry takie jak granice wybuchowości (DGW i GGW), maksymalny przyrost ciśnienia wybuchu (P_{\max}), maksymalna szybkość przyrostu ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{\max}$ oraz graniczne stężenie tlenu (GST), mierzone są przy wykorzystaniu stanowiska badawczego wyposażonego w komorę testową o pojemności 1 m^3 , lub alternatywnie w mniejszej skali, przy wykorzystaniu sferycznego zbiornika o pojemności 20 dm^3 [10]. Na Rysunku 10 przedstawiono stanowisko badawcze do pomiarów wyżej wspomnianych parametrów wybuchowości mieszanin pyłowo-powietrznych, stosowane w CNBOP-PIB.



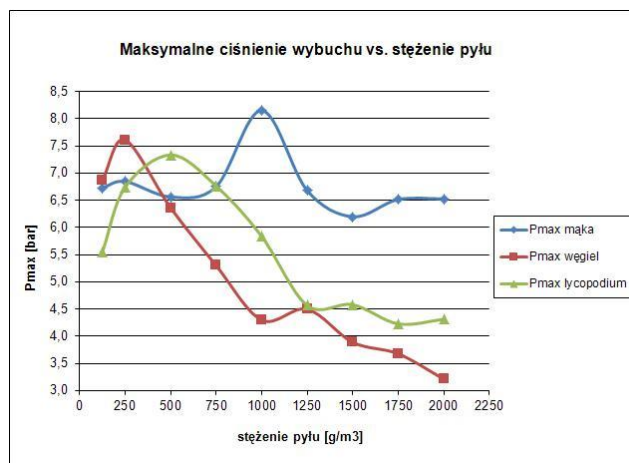
Rysunek 10. Stanowisko badawcze do pomiarów parametrów wybuchowości mieszanin pyłowo-powietrznych (P_{\max} , DGW, GGW, GST, dp/dt_{\max}) wg serii norm PN-EN 14034 w CNBOP-PIB.

W badaniu tym pył jest wprowadzany do sferycznego zbiornika z podajnika pyłu. Źródło zapłonu ulokowane jest w centrum urządzenia i jest to zazwyczaj 2 zapalniki chemiczne, zazwyczaj każdy o energii zapłonu 5 kJ. Pomiędzy wprowadzeniem pyłu a zapłonem stosuje się standardowe opóźnienie wynoszące 60 ms. Badanie to wykorzystywane jest zarówno do określeń jakościowych, jak i ilościowych. Wynikiem takiego badania jest standardowy wykres przyrostu ciśnienia w czasie, z zaznaczeniem wartości maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz szybkości przyrostu w czasie, co przedstawiono na Rysunku 11. Analiza przeprowadzonych wyników na tym stanowisku badawczym jest bardzo podobna do analizy przeprowadzanej przy wybuchach gazów w stałej objętości.

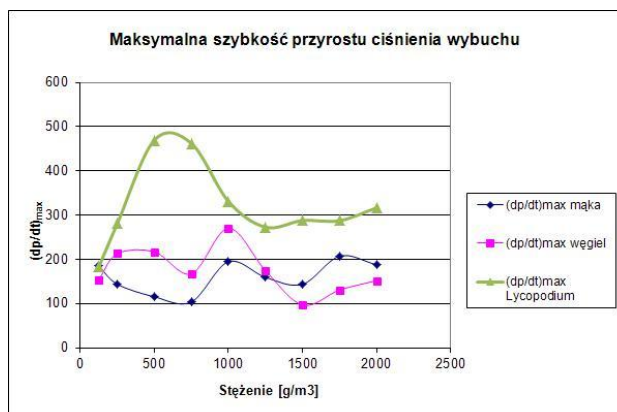


Rysunek 11. Przyrost ciśnienia wybuchu mieszanki mąki ziemniaczanej z powietrznej w czasie (1250 g/m^3), uzyskany podczas pomiarów na stanowisku badawczym wg PN-EN 14034 w CNBOP-PIB.

Na Rysunkach 12 i 13 przedstawiono zbiorcze zestawienie zależności maksymalnego ciśnienia wybuchu (P_{\max}) oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{\max}$ od gęstości pyłu. Badania wykonano dla trzech rodzajów pyłów, tj. mąki ziemniaczanej, węgla aktywnego oraz likopodium.



Rysunek 12. Zależność maksymalnego ciśnienia wybuchu od stężenia pyłu dla 3 wybranych mieszanin pyłowo-powietrznych, uzyskane podczas pomiarów na stanowisku badawczym wg PN-EN 14034 w CNBOP-PIB.



Rysunek 13. Zależność maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu od stężenia pyłu dla 3 wybranych mieszanin pyłowo-powietrznych, uzyskane podczas pomiarów na stanowisku badawczym wg PN-EN 14034 w CNBOP-PIB.

Zależność maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu od pojemności zbiornika testowego została zapisana w postaci wzoru:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} V^{1/3} = K_{st}$$

gdzie:

K_{st} – stała wybuchowości pyłów (współczynnik K_{st})

p – ciśnienie całkowite

t – czas

V – objętość zbiornika

Współczynnik K_{st} stanowi podstawę klasyfikacji wybuchowości pyłów oraz jest miarą maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia. Współczynnik K_{st} jest odzwierciedleniem współczynnika K_G dla gazów. W Wielkiej Brytanii od wielu lat stosowana jest następująca klasyfikacja wybuchowości pyłów [2]:

- grupa A – pyły, które się zapaliły oraz wystąpiło rozprzestrzenianie się płomieni w aparaturze badawczej,
- grupa B – pyły, przy których nie doszło do rozprzestrzeniania się płomieni w aparaturze badawczej.

Za pyły grupy A uważa się pyły, które powodować powstanie zjawiska wybuchu. Natomiast pyły grupy B nie są wybuchowe. Klasyfikacja pyłów do obydwu grup A i B ma zastosowanie tylko w przypadku dyspersji pyłów w normalnej temperaturze. W wyższych temperaturach pyły grupy B mogą również powodować zagrożenie wybuchem.

W Stanach Zjednoczonych, NFPA wprowadziło klasyfikację materiałów niebezpiecznych jako Klasę I dla gazów i par oraz Klasę II dla pyłów. Druga z nich została podzielona na podklasę E dla pyłów metali, F dla pyłów węglowych i G dla pyłu mąki. Bureau of Mines wprowadziło natomiast indeks wybuchowości IE, który jest wynikiem zależności pomiędzy siłą wybuchu ES i podatnością na zapłon IS [11]:

$$IE = IS \times ES$$

Przy założeniu, że obydwa wyżej wspomniane parametry wyrażają się następującymi wzorami:

$$IS = \frac{(MIT \cdot MIE \cdot MEC)_{Pc}}{(MIT \cdot MIE \cdot MEC)_{próbka}}$$

$$ES = \frac{(MEP \cdot MRPR)_{Pc}}{(MEP \cdot MRPR)_{próbka}}$$

gdzie:

MEC – dolna granica wybuchowości,

MEP – maksymalne ciśnienie wybuchu,

MIE – minimalna energia zapłonu,

MIT – minimalna temperatura zapłonu,

MRPR – maksymalna szybkość przyrostu ciśnienia wybuchu,

indeks "Pc" – węgiel Pittsburgh (pył standardowy)
indeks "próbka" – dla pyłu badanego

W Polsce obowiązuje jednak europejska klasyfikacja wybuchowości pyłów, określana w oparciu o współczynnik K_{st} , co przedstawiono w szczegółach w Tabeli 2. Zasadniczo, wyróżnia się 4 klasy wybuchowości pyłów, począwszy od St. 0 (pył niewybuchowy) do St. 3 (pył bardzo silnie wybuchowy).

Tabela 2. Klasyfikacja wybuchowości pyłów według współczynnika K_{st} [11].

Klasa wybuchowości	K_{st} (bar m/s)	Nazwa
St. 0	0	niewybuchowy
St. 1	1- 200	słabo wybuchowy
St. 2	201 - 300	silnie wybuchowy
St. 3	> 300	bardzo silnie wybuchowy

Pozostałym parametrem w zakresie wybuchowości pyłów palnych jest szybkość spalania. Niestety do tej pory nie opracowano jeszcze standardowej metody badawczej, która umożliwiłaby dokonywanie pomiarów tego parametru. Wiedza na temat tego parametru pozwoliłaby na opracowanie potrzebnych w praktyce modeli numerycznych, które zostały rozwinięte w zakresie wybuchów gazów.

Podsumowanie

Badanie charakterystyk wybuchowości pyłów palnych stanowi zespół precyzyjnie określonych metod pomiarowych, do których zaprojektowane i skonstruowane powinny być odpowiednie stanowiska badawcze. Zarówno zakres metod pomiarowych, jak również technologia wykonania przedmiotowych stanowisk badawczych ulegała i nadal ulega ciągłym udoskonaleniom, aby parametry wybuchowości pyłów palnych określone były w sposób najbardziej adekwatny do rzeczywistego zagrożenia w warunkach przemysłowych. Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości CNBOP-PIB posiadając wykwalifikowany personel badawczy prowadzi określanie charakterystyk wybuchowości pyłów palnych w oparciu o opisane w tym artykule metody i stanowiska badawcze.

Bibliografia

1. Bartknecht W., Explosions – Course, Prevention, Protection, Springer-Verlag, 1981.
2. Eckhoff R.K., Dust explosions in the process industries, Elsevier, 2003.
3. Summary report on explosion of grain silo in Blaye, INERIS, 1998.
4. Investigation report on dust explosion in West Pharmaceutical Services in Kinston, U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, 2004.
5. Teodorczyk A., Podstawy modelowania matematycznego wybuchu mieszaniny pyłowo-gazowej, III Międzynarodowa Szkoła Wybuchowości Pyłów Przemysłowych, 1987.
6. Lebecki K., Zagrożenia pyłowe w górnictwie, GIG, 2004.
7. Eckhoff R.K., Differences and similarities of dust and gas explosions: A critical evaluation of the European ATEX directives in relation to dust, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19, 2006.
8. PN-EN 50281-2-1, Urządzenia elektryczne do stosowania w obecności pyłów palnych. Część 2-1: Metody oznaczania minimalnej temperatury zapłonu pyłów, PKN, 2002.

9. PN-EN 13821, Przestrzenie zagrożone wybuchem. Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem. Oznaczanie minimalnej energii zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych, PKN, 2004.
10. PN-EN 14034, Części od 1 do 4. Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu, 2011.
11. Mannan S., Lees' Loss Prevention in the Process Industries, Elsevier, 2005.