

STANDARDY CNBOP-PIB

OCHRONA PRZECIWPOŻAROWA

WYDANIE
1

Pyły palne – przegląd podstawowych
parametrów wybuchowości i zapalności
oraz metod badawczych

CNBOP-PIB-BW02P:2016



CENTRUM NAUKOWO-BADAWCZE
OCHRONY PRZECIWPOŻAROWEJ
im. Józefa Tuliszковского
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Standard CNBOP-PIB-BW02P:2016 wyd. 1.

Dokument opracował zespół autorski w składzie:

inż. Damian Bąk
mgr inż. Anna Dziechciarz
st. kpt. mgr inż. Wojciech Klapsa
mł. bryg. inż. Piotr Lesiak

Recenzenci:

mgr inż. Bożenna Porycka
mł. bryg. dr inż. Joanna Rakowska

Przygotowanie do wydania:

Anna Golińska

Projekt okładki: Julia Pinkiewicz
Projekt graficzny zawartości: Robert Śliwiński
Grafiki na okładce: made by Freepik.com

© Copyright by Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej
im. Józefa Tuliszковского
Państwowy Instytut Badawczy

© Każda część niniejszego standardu może być przedrukowywana lub kopiowana jakąkolwiek techniką bez pisemnej zgody Dyrektora Centrum Naukowo-Badawczego Ochrony Przeciwpożarowej – Państwowego Instytutu Badawczego

Wydawca:

Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej
im. Józefa Tuliszковского
Państwowy Instytut Badawczy
05-420 Józefów k/Otwocka, ul. Nadwiślańska 213
tel. (22) 76 93 200, 300; fax: (22) 76 93 356
www.cnbop.pl
e-mail: cnbop@cnbop.pl

Wydanie I, luty 2016, Józefów

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP.....	4
2. KLASYFIKACJA PODSTAWOWA.....	7
3. PARAMETRY WYBUCHOWOŚCI I ZAPALNOŚCI.....	7
4. METODY BADAWCZE STOSOWANE W LABORATORIUM BW CNBOP-PIB.....	8
4.1. Metoda badawcza parametrów P_{max} , $(dp/dt)_{max}$, K_{st} i DGW wg PN-EN 14034.....	8
4.2. Metoda badawcza minimalnej energii zapłonu MEZ [mJ].....	13
4.3. Badanie temperatury MTZ_w i MTZ_o według PN-EN 50281-2-1.....	14
5. INNE METODY BADAWCZE.....	17
6. WPŁYW ROZMIARU CZĄSTEK I WILGOTNOŚCI NA PARAMETRY WYBUCHOWOŚCI.....	17
7. PODSUMOWANIE.....	18
8. LITERATURA.....	19

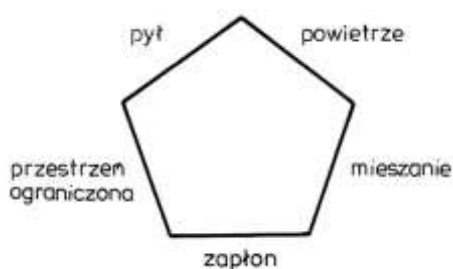
1. WSTĘP

Rozpoznanie właściwości wybuchowych mieszanin pyłowo-powietrznych ma bardzo duże znaczenie dla zapewnienia właściwego poziomu bezpieczeństwa w prowadzonych procesach przemysłowych. Oznaczenie podstawowych parametrów wybuchowości określonego pyłu pozwala ocenić ryzyko wytwarzania wyrobu oraz dobrać niezbędne środki przeciwdziałające zagrożeniom w wybranych warstwach zabezpieczeń w zakładzie.

W zakładach pracy, w których wykonuje się operacje z materiałami stałymi oraz prowadzi się obróbkę fizyczną tych materiałów (szlifowanie, mielenie, przesiewanie, transport pneumatyczny, itp.) zawsze istnieje możliwość zagrożenia wybuchem pyłowym. Cząstki pyłu osadzają się najczęściej w pobliżu źródła ich uwolnienia: na powierzchniach poziomych lub nachylonych pod pewnym kątem, np. na częściach maszyn, ich obudowach lub w kanałach wentylacyjnych i aspiracyjnych. Może także dochodzić do stałego utrzymywania się atmosfery wybuchowej w instalacji, w której pył występuje stale. Pyły mogą stwarzać zagrożenie wybuchowe w dwojaki sposób¹:

- poprzez tworzenie się mieszaniny pyłowo-powietrznej w wyniku uwalniania się pyłów podczas procesów produkcji bądź składowania,
- poprzez osadzanie się warstwy pyłu, który w wyniku samonagrzewania bądź pobierania ciepła z maszyn/elementów może ulec zapłonowi, a następnie przyczynić się do powstania kolejnych zapłonów, tzw. wybuchów wtórnych.

Niezbędne elementy prowadzące do wybuchu przedstawia rycina 1.



Ryc. 1. Pięciokąt wybuchu pyłu

Źródło: W. Kordylewski (red.), *Spalanie i paliwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, wyd. IV, Wrocław 2005.

¹ Z. Dyduch, *Właściwości wybuchowe pyłów przemysłowych* [w:] *Bezpieczeństwo przeciwybuchowe – wybrane zagadnienia*, praca zbiorowa, GIG, Katowice 2013; R. Porowski, D. Małozieć, *Zagrożenia wybuchem pyłów palnych oraz metody zapobiegania*, BITP, Vol. 28 Issue 4, 2012.

STANDARD CNBOP-PIB-BW02P:2016

Pierwszy rozważany przypadek może wystąpić, gdy rozproszony w powietrzu pył wytworzy mieszaninę pyłowo-powietrzną o stężeniu większym lub równym dolnej granicy wybuchowości.

W przypadku pojawienia się źródła zapłonu o wystarczającej energii mieszanina ulegnie zapaleniu i wybuchnie. Proces ten skrótowo można scharakteryzować w poniższej postaci:

- transport ciepła ze źródła zapłonu do cząstki – ogrzewanie cząstki pyłu,
- rozkład termiczny cząstki, wydzielanie części lotnych,
- mieszanie się części lotnych z powietrzem – wytworzenie mieszaniny palnej,
- zapłon mieszaniny palnej,
- transport ciepła w kierunku dalszych cząstek – powtórzenie i eskalacja procesu.

Tworzenie się warstw osiadłego pyłu na urządzeniach generujących znaczne ilości ciepła jest niebezpieczne. Gorące powierzchnie takich urządzeń mogą stanowić źródło zapłonu osadzającej się na nich warstwy pyłu.

Wyznaczenie parametrów wybuchowości jest podstawową czynnością, która pozwoli określić skalę zagrożenia i podjąć odpowiednie kroki zaradcze w wyżej opisanym przypadkach,- gdy pył stwarza zagrożenie wybuchowe. Analiza parametrów potwierdza, że działanie zapobiegawcze nie musi być podejmowane w wypadku, gdy substancja nie przejawia właściwości wybuchowych lub zagrożenie wybuchem jest już wyeliminowane.

Pyłem palnym nazywa się małe cząstki ciała stałego, o nominalnym rozmiarze poniżej 500 μm , które przez pewien czas mogą utrzymać się w powietrzu i osiadają powoli pod wpływem własnego ciężaru. Pyły te mogą się palić, żarzyć bądź tworzyć z powietrzem w warunkach atmosferycznych mieszaninę wybuchową.

Znane są także pyły, w których występują cząstki o większym rozmiarze (np. o podłużnym kształcie), a mimo to wykazują one właściwości zapalne/wybuchowe np. pył drzewny lub aluminiowy (ciała o włóknistej strukturze, blaszkowe). Dlatego też na potrzeby badań zwykle określa się zarówno rozkład ziarnowy danego pyłu jak i kształt jego cząstek, aby bardziej kompleksowo rozpoznać możliwe zagrożenie.

Powyższe czynniki pozwalają scharakteryzować (również w oparciu o normę PN-EN 60079-0:2013 Atmosfery wybuchowe - Część 0: Urządzenia - Podstawowe wymagania) pyły w trzech podgrupach:

- A. combustible flyings, (cząstki ciała stałego oraz włókna o nominalnym rozmiarze większym niż 500 μm , które mogą przez pewien czas pozostać zawieszane w powietrzu i opadać pod wpływem własnego ciężaru),
- B. pyły nieprzewodzące charakteryzujące się rezystywnością większą niż 1 $\text{k}\Omega\text{m}$,
- C. pyły przewodzące ładunki, charakteryzujące się rezystywnością mniejszą niż 1 $\text{k}\Omega\text{m}$.

Aby dobrać odpowiednią metodę, jak i niezbędne środki ochrony, systemy zabezpieczeń i zapobiegania wybuchom (tłumienie, izolacja itd.) należy w pierwszej kolejności określić podstawowe parametry wybuchowości.

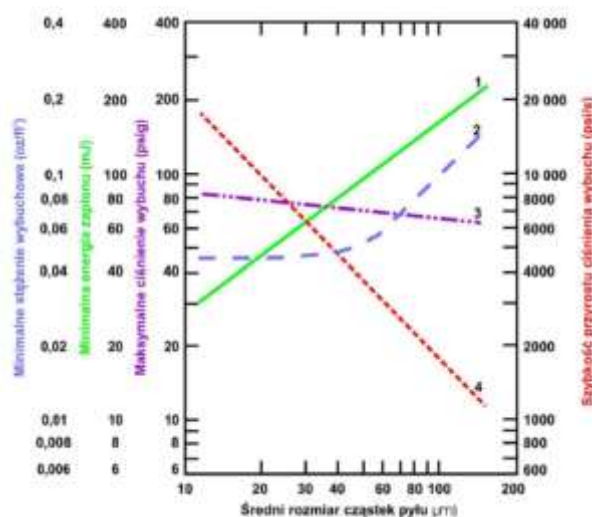
STANDARD CNBOP-PIB-BW02P:2016

Należą do nich:

- P_{\max} – maksymalne ciśnienie wybuchu;
- $(dp/dt)_{\max}$ – maksymalny przyrost ciśnienia wybuchu;
- K_{st} – stała pyłowa;
- DGW – dolna granica wybuchowości;
- GGW – górna granica wybuchowości;
- GST – graniczne stężenie tlenu;
- MEZ – minimalna energia zapłonu obłoku pyłu;
- MTZ_w – minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu;
- MTZ_o – minimalna temperatura zapłonu obłoku pyłu.

Na parametry wybuchowości pyłów może mieć wpływ szereg czynników:

- skład chemiczny cząsteczek pyłu (różne pierwiastki i związki spalają się w odmienny sposób);
- rozmiar cząsteczek pyłu (zazwyczaj parametry wybuchowości zmieniają się w zależności od rozmiaru ziaren pyłu – mniejsze ziarna spalają się szybciej. Następuje wzrost parametrów wybuchowości wraz ze zmniejszaniem się rozmiaru cząstek pyłu. Stąd istnieje konieczność określania rozkładu sitowego – ryc. 2);
- wilgotność pyłu (duża zawartość wilgoci w pyłe utrudnia jego spalanie);
- stężenie pyłu (określa ilość materiału palnego w mieszaninie pyłowo-powietrznej);
- stężenie tlenu (do inicjacji procesu spalania konieczne jest pewne graniczne stężenie tlenu – przy zbyt małym stężeniu tlenu nie zostanie zainicjowany proces spalania);
- Na poniższym wykresie przedstawiono zestawienie wybranych parametrów wybuchowości pyłu w funkcji rozmiaru jego cząstek.



Ryc. 2. Zestawienie wybranych parametrów wybuchowości pyłu w zależności od średniego rozmiaru cząstki.

Źródło: R. Porowski, D. Małozież, *Zagrożenia wybuchem pyłów palnych oraz metody zapobiegania*, BITP, Vol. 28 Issue 4, 2012.

2. KLASYFIKACJA PODSTAWOWA

W celu klasyfikacji pyłów i oceny zagrożenia wybuchem stworzono szereg znormalizowanych metod badawczych, jednak podstawową, najczęściej spotykaną klasyfikacją pyłów określającą stopień zagrożenia wybuchem przedstawiono w poniższej tabeli. Opiera się ona na stałej pyłowej K_{st} .

Tabela 1. Klasy wybuchowości na podstawie parametru K_{st}

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

Źródło: opracowanie własne

Jak przedstawiono w tabeli, wysokość klasy zagrożenia świadczy o poziomie zagrożenia, jaki stwarza mieszanina pyłowo-powietrzna.

3. PARAMETRY WYBUCHOWOŚCI I ZAPALNOŚCI

- P_{max} [bar] – to maksymalne ciśnienie wybuchu zmierzone podczas wybuchu mieszaniny pyłowo-powietrznej w zamkniętej objętości sfery pomiarowej (atmosfery wybuchowej). Wartość tego parametru zależna jest od ciśnienia początkowego.
- $(dp/dt)_{max}$ [bar/s] – to maksymalny przyrost ciśnienia wybuchu atmosfery wybuchowej w jednostce czasu. Parametr ten określa „dynamikę” procesu wybuchu danego pyłu i na jego podstawie określany jest kolejny parametr (K_{st}).
- K_{st} [m * bar/s] – stała pyłowa, zwana wskaźnikiem wybuchowości, stanowi ona podstawę do międzynarodowej klasyfikacji wybuchowości pyłów (tabela.1). Współczynnik K_{st} przelicza się z zależności:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = \frac{K_{st,max}}{\sqrt[3]{V}}$$

gdzie:

V – objętość sfery pomiarowej.

- **DGW** [g/m³] – dolna granica wybuchowości. Tym mianem określa się najniższe stężenie paliwa (w tym wypadku pyłu) z powietrzem (w sferze pomiarowej), przy którym wystąpił wybuch. Poniżej tej wartości mieszanina palna jest zbyt uboga w składnik palny oraz zawiera zbyt dużo utleniacza, aby zainicjować wybuch.
- **GGW** [g/m³] – górna granica wybuchowości to największe stężenia paliwa (pyłu) z powietrzem, dla którego mieszanina zawiera dość utleniacza, aby nastąpił wybuch. Powyżej tej wartości mieszanina palna jest zbyt bogata w składnik palny oraz zbyt uboga w tlen, aby wystąpił wybuch (możliwe jedynie spalanie).

STANDARD CNBOP-PIB-BW02P:2016

- **GST [%]** – graniczne stężenie tlenu to maksymalne stężenie tlenu w mieszaninie pyłu palnego z powietrzem i obojętnym gazem, dla którego nie występuje wybuch.
- **MEZ [mJ]** – minimalna energia zapłonu mieszaniny pyłowo-powietrznej to minimalna energia wyładowania iskrowego (energia o zadanej wartości) pomiędzy dwoma elektrodami, która wywoła zapłon mieszaniny pyłowo-powietrznej.
- **MTZ_w [°C]** – minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu to minimalna temperatura gorącej płyty, na której dojdzie do zapłonu umieszczonej w pierścieniu 5mm warstwy pyłu.
- **MTZ_o [°C]** – minimalna temperatura, w której dochodzi do zapłonu obłoku pyłu w piecu o znanej temperaturze ścianek i atmosfery.

4. METODY BADAWCZE STOSOWANE W LABORATORIUM BW CNBOP-PIB

4.1. METODA BADAWCZA PARAMETRÓW P_{max} , $(dp/dt)_{max}$, i K_{st} i DGW wg PN-EN 140034

Stanowisko do oznaczania maksymalnego ciśnienia wybuchu P_{max} , maksymalnej szybkości narastania ciśnienia $(dp/dt)_{max}$, stałej pyłowej K_{st} i dolnej granicy wybuchowości DGW obłoków pyłu zostało wykonane wg normy PN-EN 14034-1+A1:2011 (PN-EN 140134-2+A1:2011 oraz PN-EN 14034-3+A1:2011) przedstawiono na ryc. 3.

Stanowisko składa się z:

- Zbiornika kulistego 20 l wyposażonego w:
 - wziernik,
 - dwa czujniki ciśnienia dynamicznego,
 - czujnik temperatury – termopara płaszczka kuli oraz termopara typu K wewnątrz kuli,
 - system pompy próżniowej,
 - płaszcz wodny.
- Górnej głowicy wraz z:
 - złączami do podłączenia przewodów zapłonu,
 - wyciągiem odciążającym do unoszenia głowicy.
- Systemu rozpraszania pyłów wraz z:
 - zaworem wtrysku pyłu,
 - zasobnikiem pyłów,
 - manometrem kontrolnym ciśnienia wtrysku pyłów.
- Systemu nadciśnieniowego odprowadzania spalin zbiornika kulistego, w którego skład wchodzi:
 - sprężarka ze zbiornikiem (max. ciśnienie 23 bar),
 - przewód i zawór doprowadzający powietrze.
- Systemu oczyszczania zaworu pneumatycznego podającego mieszaninę pyłowo-powietrzną oraz komory zasypowej, w którego skład wchodzi:

STANDARD CNBOP-PIB-BW02P:2016

- pulpit sterowniczy wyposażony w trzy przyciski oznaczone:
 - „O” – otwarte,
 - „N” – napełnianie,
 - „Z” – zamknięte.
- Pulpitu sterowniczego integralnego z wyłącznikami zasilania, potencjometrem mocy wyciągu, wyłącznikiem układu pompy i kontrolerem temperatury
- Bloku sterowania, akwizycji danych i komunikacji z PC
- Komputera oraz oprogramowania:
 - ANKO Dust Explosion Plotter.

Badanie na podstawie norm PN-EN 14034 polega na przeprowadzeniu serii testów w sferycznym zbiorniku o objętości wewnętrznej 20 dm³. W pierwszej fazie przygotowań do badania, na elektrodach znajdujących się w pokrywie umieszcza się i skręca dwa odpowiednie zapłoniki pirotechniczne (5kJ każdy na P_{max} – Ryc. 2 i 1kJ dla DGW). Po zamknięciu komory, zbiornik jest opróżniony do wartości -0,6 bar a w zasobniku pyłowym o objętości 1,2 dm³ umieszcza się odważoną próbkę pyłu. Po zamknięciu odpowiednich zaworów, uruchomieniu procedury systemowej na komputerze, uzupełnieniu wymaganych danych i załączeniu „triggera” (pilot/przycisk zabezpieczający startowy) następuje samoczynna praca urządzenia. Zasobnik pyłowy napełniany jest powietrzem do ciśnienia 20 bar, następnie otwierany jest elektrozawór separujący kulę od zasobnika w wyniku czego pył wtłaczany jest do 20 dm³ kuli a ciśnienie w jej wnętrzu wyrównuje się do ciśnienia atmosferycznego. Po czasie opóźnienia 60 ms (względem wtrysku pyłu i wyrównania ciśnień) umieszczone wcześniej w geometrycznym centrum kuli zapłoniki pirotechniczne ulegną zapłonowi w wyniku przekazania im energii w postaci iskry elektrycznej z układu wyzwalającego. Jeśli mieszanina pyłowo-powietrzna ulegnie zapłonowi, czujniki ciśnienia dynamicznego odnotują zmianę ciśnienia w czasie oraz wartość maksymalną ciśnienia wewnątrz zbiornika sferycznego podczas badania. Po jednorazowym badaniu należy wyczyścić układ z pozostałości, przedmuchać, zamontować świeże zapłoniki i przystąpić do kolejnego badania.



Ryc. 3. Zapłoniki pirotechniczne (5kJ każdy) zamocowane na elektrodach

Źródło: opracowanie własne.

STANDARD CNBOP-PIB-BW02P:2016

Wynikiem jednorazowego badania jest oznaczenie szybkości narastania ciśnienia w czasie i maksymalnej wartości ciśnienia odnotowanej podczas próby. Po skorygowaniu wartości szybkości narastania ciśnienia o objętość zbiornika sferycznego otrzymuje się K_{st} .

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

gdzie:

$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$ - maksymalna szybkość narastania ciśnienia w czasie [bar/s] podczas oznaczenia,

V – objętość zbiornika sferycznego w m³ (0.0205 m³).

Kompletne stanowisko do oznaczania parametrów wybuchowości według serii norm PN-EN 14034 przedstawia rycina 4.



Ryc. 4. Stanowisko do badań zgodnych z normą PN-EN 14034:2011

Źródło: opracowanie własne

Badania parametrów P_{max} , $(dp/dt)_{max}$ i K_{st} wykonywane są na tej samej zasadzie przez wprowadzanie do komory badawczej kolejnych stężeń pyłu z powietrzem. Są to stężenia z ciągu ...:60; 125; 250; 500; 750; 1000; 1250; 1500; ...g/m³. Badania są prowadzone do momentu oznaczenia wartości maksymalnych wyżej wspomnianych parametrów (maksymalna wartość parametru potwierdzana jest poprzez trzykrotne zbadanie go dla tego samego stężenia pyłu w powietrzu). Należy wykonać przynajmniej po dwa badania stężeń sąsiadujących wartości maksymalnej (spadek wartości w sąsiedztwie wielkości maksymalnych upewnia nas i potwierdza słuszność wyników).

Oprogramowanie komputerowe pozwala na sterowanie procesem badania, zapisywanie wyników, ich kontrolę oraz przedstawienie w postaci graficznej (ryc. 5, ryc. 6, ryc. 7). Wartość P_{max} obliczana jest na podstawie trzech oznaczeń jako średnia arytmetyczna z wartości maksymalnego ciśnienia wybuchu uzyskanych w każdej serii pomiarowej:

$$p_{max} = \frac{p_{max[seria1]} + p_{max[seria2]} + p_{max[seria2]}}{3} \text{ [bar]}$$

Naliczane są również poprawki zmierzonych ciśnień wybuchu dla $P_{max} \geq 5,5$ bar

$$p_{max} = 0,775 * p_{max}^{1,15} \text{ [bar]}$$

STANDARD CNBOP-PIB-BW02P:2016

Natomiast poprawka dla zmierzonego ciśnienia $P_{max} < 5,5$ bar uwzględnia efekt ciśnieniowy wywołany przez zapłoniki pirotechniczne:

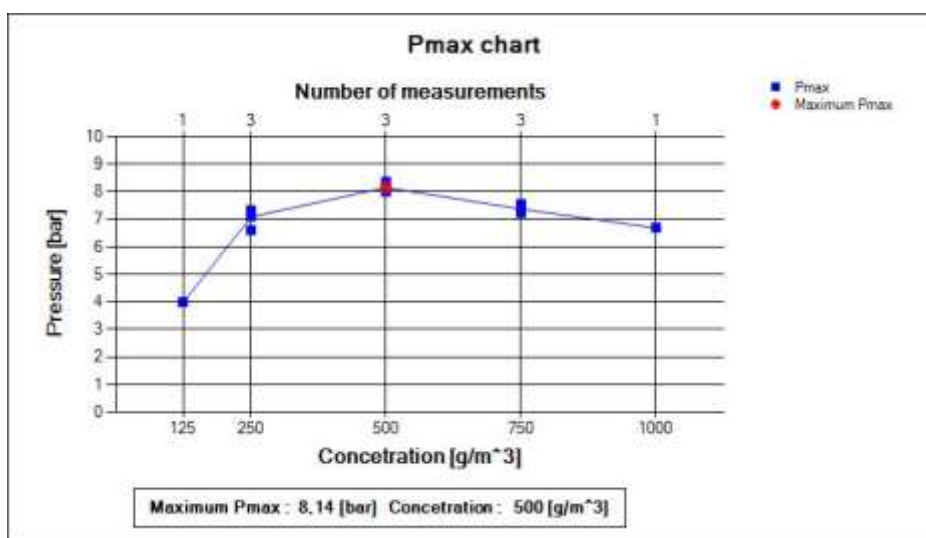
$$p_{max} = \frac{5,5 * (p_{max} - p_{ci})}{(5,5 - p_{ci})} [bar]$$

$$p_{ci} = \frac{1,6 * E_i}{1000} [bar]$$

w której:

p_{ci} – ciśnienie wywołane przez zapłoniki chemiczne [bar],

E_i – energia zapłonu [J].

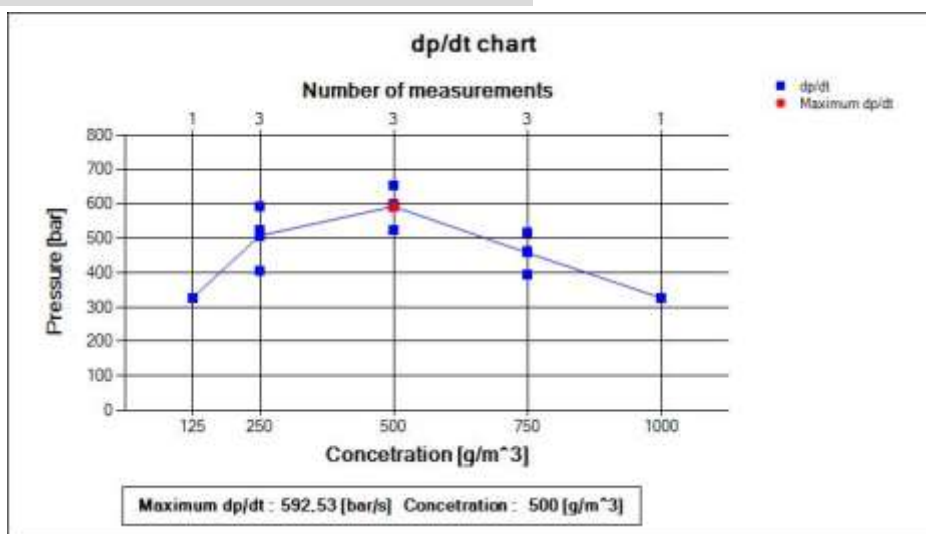


Ryc. 5. Wynik oznaczenia P_{max} przykładowego pyłu

Źródło: opracowanie własne

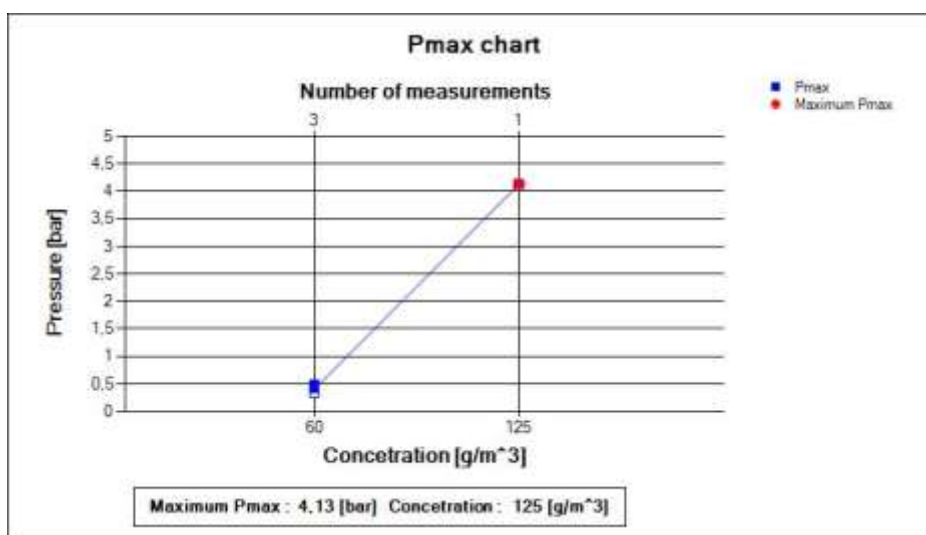
Analogicznie dla $(dp/dt)_{max}$ średnia z trzech najwyższych wartości w tym samym stężeniu wynosi:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = \frac{\left(\frac{dp}{dt}\right)_{ex[seria1]} + \left(\frac{dp}{dt}\right)_{ex[seria2]} + \left(\frac{dp}{dt}\right)_{ex[seria3]}}{3} [bar * s^{-1}]$$

Ryc. 6. Wynik oznaczenia $(dp/dt)_{max}$ przykładowego pyłu

Źródło: opracowanie własne.

W procedurze badawczej do oznaczania DGW używa się dwóch główek zapalczyczych o energii 1 kJ każda, natomiast sama idea polega na wyznaczeniu największego stężenia, przy którym wartość ciśnienia wybuchu wynosi $P_{ex} < 0,5$ bar (zapłon ma miejsce jeśli w zbiorniku powstaje nadciśnienie 0,5 bar względem ciśnienia początkowego). Zwykle badane są stężenia z ciągu 15; 30; 60; 125... g/m³. Procedurę badawczą rozpoczyna się od stężenia, co do którego jest pewność, że wybuch nastąpi, a następnie sprawdza się stężenie o połowę mniejsze, aż do momentu uzyskania P_{ex} mniejszego niż 0,5 bar.



Ryc. 7. Wynik oznaczenia DGW przykładowego pyłu

Źródło: opracowanie własne.

Parametry P_{max} , $(dp/dt)_{max}$ i DGW zmieniają się wraz ze zmianą rozmiaru nominalnego cząstek pyłu i jego wilgotnością, dlatego przed badaniem oznacza się rozkład ziarnowy pyłu (do badania kieruje się cząstki, które przeszły przez sito kontrolne o rozmiarze nominalnym oczka 500 μ m) i wyznacza jego wilgotność. Wyniki odnotowywane są w protokole pomiarowym.

4.2. METODA BADAWCZA OZNACZANIA MINIMALNEJ ENERGII ZAPŁONU MEZ [mJ]

Stanowisko badawcze do szacowania minimalnej energii zapłonu (ryc. 8) zgodnie z normą PN-EN 13821:2004 składa się z:

- układu odprowadzania spalin,
- komory badawczej o poj. 1,2 dm³,
- zestawu przyłączy elektrycznych i pneumatycznych,
- panelu kontrolno-sterującego całą procedurą.

W skład komory badawczej wchodzi:

- naczynie badawcze (rura Hartmanna),
- elektroda wysokiego napięcia,
- elektroda ruchoma,
- dwa przewody wysokiego napięcia (po jednym dla każdej z elektrod).
- przewód pneumatyczny dostarczający powietrze do wytworzenia mieszaniny pyłowo-powietrznej.

Panel sterujący urządzenia umożliwia ustawienie czasu opóźnienia od 0 do 10000 ms (± 10 ms) i regulację energii iskry wyładowania do wartości 1, 3, 10, 30, 100, 300, 1000 mJ.

Praca urządzenia inicjowana jest po wybraniu określonej energii iskry i czasu opóźnienia zapłonu, zasypaniu w sposób równomierny komory wokół dyszy odpowiednią naważką badanego pyłu, założeniu rury Hartmanna, dosunięciu prawej elektrody oraz zamknięciu szyby ochronnej przyciskiem „Start”. Do komory automatycznie włączane jest powietrze pod ciśnieniem, które unosi pył tworząc chmurę zawieszoną przez krótki czas w rurze Hartmanna. Po upływie czasu opóźnienia pneumatyczny siłownik wyzwala ruch prawej elektrody, która dosuwa się do wierzchołka drugiej elektrody na odległość ≈ 6 mm. Wówczas następuje wyładowanie kondensatora w wyniku czego pomiędzy elektrodami przeskakuje iskra. Jeśli energia wyładowania jest wystarczająca, następuje zapłon mieszaniny pyłowo-powietrznej. Wystąpienie zapłonu bądź jego brak odnotowuje się w protokole pomiarowym.

Jeśli zapłon nie wystąpił w kolejnych 10 próbach dla danego stężenia (bądź serii stężeń) przy różnych czasach opóźnienia to MEZ można oszacować jako:

$$E_1 < \text{MEZ} \leq E_2$$

gdzie:

E_2 – ostatnia energia, przy której wystąpił zapłon w jednej z 10 prób;

E_1 – pierwsza energia, przy której nie dochodzi do zapłonu w kolejnych 10 próbach.

Wartość minimalnej energii zapłonu zmniejsza się wraz ze zmniejszeniem rozmiarów cząstek i wilgotności pyłu, dlatego też na potrzeby badania określa się zarówno rozkład ziarnowy próbki (badaniu poddaje cząstki pyłu, które przeszły przez sito kontrolne o nominalnym wymiarze oczka 63 μm zgodnie z wymaganiami ww. normy). Określa się również wilgotność pyłu.



Ryc. 8. Stanowisko do badania minimalnej energii zapłonu wg normy PN-EN 13821:2004

Źródło: opracowanie własne.

4.3. BADANIE TEMPERATURY MTZ_w i MTZ_o wg PN-EN 50281-2-1

Metoda A – warstwa pyłu na płycie grzejnej o stałej temperaturze

Na rycinie 9 przedstawiono aparaturę do wyznaczenia minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu umieszczonej na powierzchni gorącej płyty w pierścieniu o wysokości np. 5mm; 12,5 mm lub 20 mm. Badanie polega na umieszczeniu pierścienia stalowego o ustalonej wysokości na powierzchni płyty podgrzanej do określonej temperatury, zamontowaniu termopary wewnątrz pierścienia, a następnie dokładnym zasypaniu wnętrza pierścienia badanym pyłem (równomiernie bez ubijania). Badaniu poddaje się pył, który przeszedł przez sito o nominalnym rozmiarze oczka 200 μm .

Na protokole pomiarowym notuje się temperaturę otoczenia, w jakiej prowadzono badanie oraz oznaczoną gęstość nasypową pyłu obliczoną na podstawie masy naważki pyłu i objętości wnętrza pierścienia. Na płytę grzejną i termoelement nakłada się pierścień, który posiada rowki, umożliwiające odpowiednie usytuowanie termoelementu. Następnie włączany jest piec płyty a ta ogrzewana jest do zadanej temperatury, wtedy też włączany jest komputer i oprogramowanie rejestrujące temperaturę. Po osiągnięciu nominalnej zadanej temperatury wewnątrz pierścienia umieszcza się naważkę pyłu i zrównuje warstwę pyłu z górną krawędzią pierścienia. Następnie usuwa się pył rozsypany wokół pierścienia oraz jego nadmiar, następnie rozpoczyna badanie. Przez 30 min obserwuje się zachowanie pyłu na płycie o stałej temperaturze.



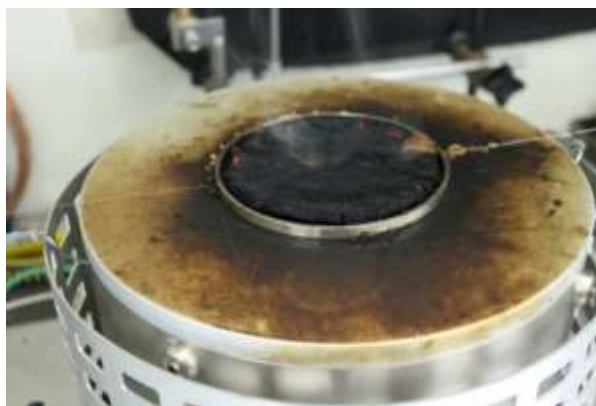
Ryc. 9. Aparatura do oznaczania minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu wg PN-EN 50281-2-1:2002

Źródło: opracowanie własne

Zgodnie z normą uznaje się, że zapłon nastąpił, gdy:

1. Zaobserwowano żarzenie (ryc. 10) lub palenie lub
2. Mierzona temperatura warstwy pyłu osiągnie 450°C lub
3. Mierzona temperatura przekroczyła o 250K temperaturę płyty grzejnej.

Jeżeli w czasie 30 min nie zostanie spełnione żadne z wyżej wspomnianych kryteriów wykonuje się pomiar na świeżej naważce pyłu i podnosi temperaturę płyty o 10°C. Wyniki badania notuje się w protokole pomiarowym. Po uzyskaniu najniższej temperatury, w której dochodzi do zapłonu odnotowuje się wartość i zapisuje temperaturę o 10°C mniejszą, jako minimalną temperaturę zapłonu warstwy pyłu.



Ryc. 10. Przykład wystąpienia zapłonu w postaci ognisk żarzenia

Źródło: opracowanie własne

Metoda B – badanie minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu w piecu o stałej temperaturze

Na poniższej rycinie (ryc. 11) przedstawiono aparaturę służącą do badania minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu w piecu o stałej temperaturze wg normy PN-EN 50281-2-1:2002 Urządzenia elektryczne stosowane w obecności gazów palnych - Część 2-1: Metody badawcze - Metody oznaczania minimalnej temperatury zapłonu pyłu (metoda B). Badanie polega na wtrysnięciu pod niskim ciśnieniu (z reguły 0,1 bar – nie większe niż 1 bar) próbki pyłu (odpowiedniej naważki) do pieca i obserwowaniu czy wystąpił zapłon (kryteria zapłonu – wyrzut płomienia poza piec).



Ryc. 11. Aparatura do oznaczania minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu w piecu o stałej temperaturze

Źródło: opracowanie własne

Wewnątrz pieca znajduje się ogrzewana rura krzemionkowa (ustawiona pionowo), z otwartym dolnym końcem. W rurze znajdują się też dwie termopary, jedna mierząca temperaturę wewnętrznej ścianki pieca, druga zaś atmosfery pieca. Na górną część rury krzemionkowej nakłada się szklaną „fajkę” oraz nasadkę z podajnikiem pyłu. Nasadka połączona jest gumowym wężem z elektromagnetycznym zaworem ciśnieniowym. Zawór uwalnia sprężone powietrze, które wdmuchuje zawartość zasobnika pyłowego do wnętrza pieca. Jeśli pył ulegnie zapłonowi, widoczny będzie wyrzut płomieni poza dolny koniec rury krzemionkowej, co również będzie można zaobserwować w ustawionym pod wylotem pieca zwierciadle z polerowanej stali nierdzewnej.

Do badania używa się pyłu, który przedostał się przez sito kontrolne o wymiarze oczka $71\ \mu\text{m}$. W przypadku, gdy badany jest pył o większym rozmiarze cząstek odnotowywane jest to w protokole pomiarowym (jak również temperatura otoczenia i wilgotność pyłu). W zasobniku umieszcza się ok. 0,1 g pyłu i ustala temperaturę pieca na 500°C . Jeżeli zapłon nie wystąpi powtarza się badanie z nową próbką pyłu i temperaturą większą o 50°C aż do 1000°C . W przypadku wystąpienia zapłonu, zmienia się masę naważki i ciśnienie wtrysku, aż do momentu uzyskania najbardziej intensywnego zapłonu. Używając tej samej naważki i ciśnienia jak przy najbardziej intensywnym zapłonie obniża się temperaturę pieca o 20°C do momentu aż zapłon nie wystąpi w 10 kolejnych próbach (wykonuje się również próby przy najniższej znalezionej temperaturze dla różnych naważek i ciśnienia). W przypadku wystąpienia zapłonu powtarza się procedurę jak wyżej. Jeżeli zapłon nie wystąpił odnotowuje się temperaturę końcową (pomniejszoną o 20°C dla temperatury pieca powyżej 300°C lub pomniejszoną o 10°C dla temperatury niższej bądź równej 300°C).

5. INNE METODY BADAWCZE

Poza wyżej opisanymi metodami badawczymi dotyczącymi oznaczania parametrów wybuchowości pyłów stosowanymi w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości można wyróżnić:

- metodę badawczą wg PN-EN 14034-4+A1:2011 Oznaczenie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu -- Część 4: Oznaczenie granicznego stężenia tlenu GST obłoków pyłu, której celem jest wyznaczenie współczynnika GST tj. granicznego stężenia tlenu w mieszaninie pyłowo-powietrznej, czyli maksymalnego stężenia tlenu w mieszaninie palnej, w którym nie dojdzie do wybuchu. Zgodnie z normą badanie takie możliwe jest do wykonania zarówno przy użyciu 20 dm³ jak i 1 m³.
- badania wg PN-EN 61241-2-2:2002 Elektryczne urządzenia do stosowania w obecności pyłu wybuchowego -- Część 2-2: Metody wyznaczania rezystywności pyłu w warstwach. Norma ta określa postępowanie przy badaniach rezystywności warstwy pyłu ρ przy stosowaniu stałego źródła napięcia, nie jest jednak odpowiednia do stosowania dla pyłów posiadających właściwości wybuchowe.
- PN-EN 15188:2009 Oznaczenie skłonności nagromadzeń pyłu do samozapalenia, która dotyczy oznaczania temperatur samozapalenia pyłów palnych (SIT). Badanie polega na określaniu skłonności nagromadzonego pyłu do samozapalenia, jako funkcję objętości danego pyłu podczas jego składowania w piecu grzewczym o stałej temperaturze.

6. WPŁYW ROZMIARU CZĄSTECZEK I WILGOTNOŚCI NA PARAMETRY WYBUCHOWOŚCI

Rozkład ziarnowy wyznaczany jest w celu uzyskania ogólnej informacji o zawartości danych frakcji w pyłe. Informacje o tym, jakiego rozmiaru ziaren jest najwięcej w pyłe pozwala lepiej ocenić zagrożenie wybuchowe z nim związane. Analiza sitowa umożliwia też wykonywanie innych normatywnych badań, ponieważ niektóre normy wymagają do badań cząsteczek pyłu o konkretnym rozmiarze np.:

- PN-EN 13821:2004 – ziarno o wymiarze 63 μm i mniejszym.
- PN-EN 50281-2-1:2002 metoda A – ziarna o wymiarze 200 μm i mniejszym.
- PN-EN 50281-2-1:2002 metoda B – ziarna o wymiarze 71 μm i mniejszym.

Rozmiar cząstek pyłu ma istotny wpływ na dynamikę i wybuchowość pyłu. Rozdrobnienie pyłu bezpośrednio wpływa na prędkość reagowania pyłu z tlenem. Rozmiar ziarna łączy się z przypadającą na jego powierzchnię jednostką masy – drobniejszy pył posiada większą podatność na spalanie i jest bardziej wybuchowy.

Wyznaczenie wilgotności w próbce pozwala na lepsze zrozumienie warunków przechowywania i składowania pyłu oraz w jakich warunkach zalega on w magazynie czy hali produkcyjnej etc. W praktyce wyznaczanie wilgotności polega na przygotowaniu np. trzech próbek pomiarowych, ich zważeniu,

STANDARD CNBOP-PIB-BW02P:2016

a następnie suszeniu do momentu uzyskania stałej wagi. Po wysuszeniu próbek, waży się je ponownie a wilgotność wyznacza na podstawie poniższej zależności:

$$W = \frac{W_{p1} - W_{p2}}{W_{p1}} \cdot 100\%$$

gdzie: W – zawartość wilgoci w pyłe [%wag],
 W_{p1} – masa próbki przed suszeniem [g]
 W_{p2} – masa próbki po wysuszeniu [g]

Wilgotność próbki oznacza się, jako średnią z trzech pomiarów wcześniej przygotowanych próbek. Wilgotność pyłu ma znaczny wpływ na jego wybuchowość, wzrost wilgotności oraz powoduje zmniejszenie wybuchowości pyłu. Literatura wskazuje, że pyły o zawartości wilgoci ok. 15% posiadają mniejsze skłonności do wybuchów, natomiast pyły o wilgotności ok. 30% nie wykazują właściwości wybuchowych wcale.

7. PODSUMOWANIE

W myśl rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 8 lipca 2012 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy, każdy pracodawca zobowiązany jest do wykonania oceny ryzyka związanego z możliwością wystąpienia w miejscu pracy pożaru czy atmosfery wybuchowej. Nieodłącznym elementem tej oceny jest poznanie parametrów, właściwości pożarowych oraz wybuchowych substancji, w tym pyłów palnych występujących na miejscu pracy.

Wspomniane w standardzie normy i metody badawcze pozwalają na kompleksową ocenę zagrożeń poprzez dalszą analizę parametrów wybuchowości. Celem badań parametrów wybuchowości jest poznanie możliwości zachowania się danego pyłu w prawdopodobnych i występujących w środowisku pracy warunkach. Zagrożeniami występującymi w miejscach pracy mogą być niekontrolowane wyładowania iskrowe spowodowane gromadzeniem się ładunków na pewnych elementach, wyładowania spowodowane przerwaniem ciągłości obwodów elektrycznych czy przebicia elektryczne na obudowach urządzeń elektrycznych. Podatność pyłów na te wyładowania określa parametr MEZ (minimalna energia zapłonu) i metoda badawcza zgodna z normą PN-EN 13821:2004. Zagrożenia mogą być wywołane również przez pył osadzający się na gorących powierzchniach (nagrzewające się obudowy pracujących urządzeń itd.). Wysoka temperatura może spowodować zapłon zalegającej warstwy pyłu. Parametr określający to zagrożenie to MTZ_w (minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu), który sprawdza się metodą badawczą zgodną z normą PN-EN 50281-2-1:2002 (Metoda A). Jeśli pył nie jest bezpośrednio wystawiony na oddziaływanie gorących powierzchni, może znaleźć się pod wpływem wysokiej temperatury na skutek rozpylenia w gorącej atmosferze (nagrzane powietrze) np. we wnętrzu pieca, komina itd. Podatność pyłu na takie zagrożenie nazywa się MTZ_o (minimalna temperatura zapłonu obłoku pyłu), sposób badania tego parametru opisuje norma PN-EN 50281-2-1:2002 (Metoda B). Z kolei rodzina norm PN-EN 14034 pozwala na zdobycie ogólnej wiedzy o pyłe i zagrożeniach z nim związanych poprzez pomiar parametrów takich jak P_{max} , $(dp/dt)_{max}$, K_{st} , DGW czy GST. Wielkości te pozwalają określić

STANDARD CNBOP-PIB-BW02P:2016

parametry związane bezpośrednio ze spalaniem pyłu i stwarzaniem przez niego zagrożenia wybuchowego, ciśnień generowanych przy jego spalaniu i podatności na wybuch.

Pełne badanie i wyznaczenie wyżej wspomnianych parametrów pozwala na kompleksową ocenę zagrożenia, natomiast ich analiza połączona z oględzinami miejsca pracy umożliwia określenie strefy zagrożenia w zakładzie, w którym dany pył występuje i w odpowiedni sposób przygotować miejsce pracy tak, aby zminimalizować ryzyko wystąpienia pożaru bądź atmosfery wybuchowej.

8. LITERATURA

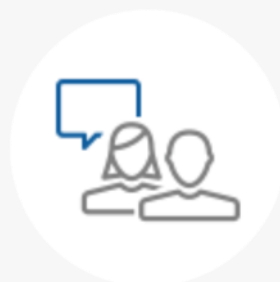
1. Barton J., *Dust Explosion Prevention and Protection – A Practical Guide*, IChemE 2002
2. Dyduch Z., *Właściwości wybuchowe pyłów przemysłowych*, [w:] *Bezpieczeństwo przeciwwybuchowe – wybrane zagadnienia, praca zbiorowa*, GIG, Katowice 2013.
3. Kordylewski W. (red.), *Spalanie i paliwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, wyd. IV, Wrocław 2005.
4. PN-EN 14034-1+A1:2011 Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu - Część 1: Oznaczanie maksymalnego ciśnienia wybuchu P_{max} obłoków pyłu
5. PN-EN 14034-2+A1:2011 Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu -- Część 2: Oznaczanie maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{max}$ obłoków pyłu
6. PN-EN 14034-3+A1:2011 Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu -- Część 3: Oznaczanie dolnej granicy wybuchowości DGW obłoków pyłu
7. PN-EN 14034-4+A1:2011 Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu -- Część 4: Oznaczanie granicznego stężenia tlenu GST obłoków pyłu
8. PN-EN 13821:2004 Przestrzenie zagrożone wybuchem - Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem - Oznaczanie minimalnej energii zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych
9. PN-EN 50281-2-1:2002 Urządzenia elektryczne stosowane w obecności gazów palnych - Część 2-1: Metody badawcze - Metody oznaczania minimalnej temperatury zapłonu pyłu
10. PN-EN 61241-2-2:2002 Elektryczne urządzenia do stosowania w obecności pyłu wybuchowego -- Część 2-2: Metody wyznaczania rezystywności pyłu w warstwach
11. PN-EN 15188:2009 Oznaczanie skłonności nagromadzeń pyłu do samozapalenia
12. PN-EN 60079-0:2013 Atmosfery wybuchowe - Część 0: Urządzenia - Podstawowe wymagania
13. Porowski R., Małozieć D., *Zagrożenia wybuchem pyłów palnych oraz metody zapobiegania*, BITP, Vol. 28 Issue 4, 2012.
14. Porowski R., Lesiak P., *Badanie charakterystyk wybuchowości pyłów przemysłowych*, prezentacja CNBOP-PIB.



**CENTRUM NAUKOWO-BADAWCZE
OCHRONY PRZECIWPOŻAROWEJ**
im. Józefa Tuliszkowskiego
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

DANE KONTAKTOWE

ul. Nadwiślańska 213
05-420 Józefów k/Otwocka
tel. +48 22 789 11 11
fax: +48 22 769 33 56
e-mail: cnbop@cnbop.pl



ZESPÓŁ LABORATORIÓW PROCESÓW SPALANIA I WYBUCHOWOŚCI - BW

tel. +48 22 769 32 18
e-mail: bw@cnbop.pl

CENTRUM OBSŁUGI KLIENTA CNBOP-PIB

tel. +48 22 789 33 45
e-mail: cok@cnbop.pl



www.cnbop.pl