

mł. kpt. mgr inż. Łukasz Zubek

Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

Wpływ wybranych czynników na wybuchowość pyłów

Abstrakt

W artykule, wykorzystując metodę analizy oraz syntezy, przedstawiono wpływ wybranych czynników na wybuchowość pyłów przemysłowych. Opisano pojęcie pyłu oraz podstawowe charakterystyki jego wybuchowości. W sposób syntetyczny przedstawiono rozwój badań wybuchowości pyłów. W części właściwej scharakteryzowano wpływ stężenia pyłu, wielkości cząstek pyłu, jego wilgotności, temperatury, ciśnienia początkowego oraz stężenia tlenu na jego wybuchowość.

Słowa kluczowe: wybuch, pył palny, determinanty wybuchowości, ochrona przeciwybuchowa

Influence of the Selected Factors on Dust Explosiveness

Abstract

This paper presents the influence of the selected factors on dust explosions. The goal is to understand the fundamental aspects of the influence of dust concentration such as particle size distribution, humidity, temperature and oxygen concentration to ignitability and explosiveness properties of dust clouds, better. The analysis is based on the literature. The dust and dust explosion characteristics were defined.

Keywords: explosion, combustible dust, dust explosion determinants, explosion prevention

1. Wprowadzenie

Wytwarzanie palnych, rozdrobnionych ciał stałych towarzyszy współcześnie wielu procesom przemysłowym. Wśród głównych wymienia się procesy obróbki mechanicznej ciał stałych, takie jak cięcie, mielenie, szlifowanie i skrawanie. Interdyscyplinarność zagrożeń pyłowych sprawia, że termin ten definiowany jest w literaturze przedmiotu na wiele sposobów.

Z punktu widzenia jakości powietrza pyły stanowią te cząstki ciała stałego, które przez pewien czas mogą pozostawać w zawieszeniu w gazie [20]. W przemyśle wydobywczym węgla kamiennego za ogólną definicję pyłu węglowego uważane są te frakcje rozdrobnionego węgla, które mogą brać udział w wybuchu [8]. Funkcjonują również inne, bardziej inżynierskie podejścia do definiowania tego pojęcia, które opierają się na przyjęciu granicznej wartości średnicy cząstki, jak w przypadku normy NFPA 68, w której wynosi ona 420 μm .

Europejskie normy w zakresie klasyfikacji przestrzeni zagrożonych wybuchem definiują oddzielnie pojęcie pyłu, pyłu palnego oraz lotnych aglomeratów palnych włókien. Zgodnie z [27], pył to ogólny termin obejmujący pyły palne oraz lotne aglomeraty palnych włókien. Pył palny stanowią rozdrobnione cząstki ciała stałego, o nominalnej wielkości poniżej 500 μm , które mogą tworzyć mieszaniny wybuchowe z powietrzem pod ciśnieniem atmosferycznym i temperaturze normalnej. Natomiast lotne aglomeraty włókien palnych stanowią cząstki ciała stałego łącznie z włóknami, o nominalnej wielkości poniżej 500 μm , które podobnie jak pył palny, mogą tworzyć mieszaniny wybuchowe z powietrzem pod ciśnieniem atmosferycznym i temperaturze normalnej. Podział pyłów i włókien palnych sporządzony w oparciu o 3 grupy wybuchowości przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Podział pyłów i włókien palnych

Grupa wybuchowości pyłów	Rodzaj pyłów
IIIA Pyły palne	Lotne aglomeraty włókien palnych
IIIB Pyły nieprzewodzące	Pył palny o rezystywności elektrycznej większej niż 103 $\Omega\cdot\text{m}$
IIIC Pyły przewodzące	Pył palny o rezystywności elektrycznej nie większej niż 103 $\Omega\cdot\text{m}$

Źródło: opracowano na podstawie [27]

Klasyfikacja pyłów wybuchowych może przebiegać w oparciu o różne kryteria. Ze względu na pochodzenie pyły dzieli się na organiczne (np. mąka, skrobia, len, bawełna) i nieorganiczne (np. sproszkowane metale). Kryterium różnorodności ziaren pozwala klasyfikować pyły na monodispersyjne, charakteryzujące się cząstkami o jednakowej średnicy oraz polidispersyjne składające się z cząstek o zróżnicowanych średnicach. W praktyce przemysłowej monodispersyjność pyłów jest zjawiskiem rzadkim. Z punktu widzenia formy występowania w warunkach przemysłowych pyły dzieli je na zawieszane (aerozole) oraz osiadłe (aerozele). Pierwszą grupę stanowią cząstki ciała stałego zawieszane w powietrzu, tworzące z powietrzem mieszaninę pyłowo-powietrzną. Drugą natomiast, cząstki ciała stałego zgromadzone na powierzchni i tworzące pokrywającą ją warstwę [3].

2. Charakterystyki wybuchowości pyłów

Właściwości wybuchowe pyłów przemysłowych opisywane oraz porównywane są za pomocą charakterystyk, które przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Podstawowe charakterystyki wybuchowości pyłów

Lp.	Charakterystyka	Jednostka	Opis
1.	Maksymalne ciśnienie wybuchu obłoku pyłu p_{\max}	bar	Maksymalna wartość nadciśnienia powstającego w zamkniętym zbiorniku podczas wybuchu atmosfery pyłowej, wyznaczana w określonych warunkach badawczych oraz normalnych warunkach atmosferycznych.
2.	Maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu obłoku pyłu $(dp/dt)_{\max}$	bar/s	Największa wartość pochodnej ciśnienia po czasie mierzona podczas wybuchu mieszaniny pyłowo-powietrznej w zamkniętym zbiorniku w określonych warunkach pomiaru.
3.	Dolna granica wybuchowości obłoku pyłu DGW	g/m ³	Najniższe stężenie pyłu palnego w mieszaninie z powietrzem, przy którym występuje wybuch.

cd. Tabeli 2.

Lp.	Charakterystyka	Jednostka	Opis
4.	Graniczne stężenie tlenu GST	% obj.	Maksymalne stężenie tlenu w palnej mieszaninie pyłowo-powietrznej oraz gazu inertnego (obojętnego), przy którym nie następuje wybuch tej mieszaniny.
5.	Minimalna energia zapłonu mieszaniny pyłowo-powietrznej MEZ	J	Najmniejsza energia elektryczna zgromadzona w kondensatorze, która przy jego wyładowaniu jest wystarczająca do spowodowania zapłonu najbardziej zapalnej mieszaniny danego pyłu, wyznaczana w określonych warunkach badania.

Źródło: opracowano na podstawie [22–26]

Celem eliminacji wpływu rozmiaru komory badawczej na otrzymywane wyniki przyjęto posługiwanie się wskaźnikiem wybuchowości pyłu K_{st} , który wyraża się wzorem (1):

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

Dla zbiornika 20 dm³ wartość K_{st} wyznacza się z zależności (2):

$$K_{st} = 0,27 \cdot \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} \quad (2)$$

Pomiarów wartości poszczególnych charakterystyk dokonuje się w standaryzowanych komorach badawczych.

3. Rozwój badań wybuchowości pyłów przemysłowych

Jedną z najbardziej istotnych ról w dziedzinie badań wybuchowości pyłów odegrał rozwój przemysłu górniczego. Literatura przedmiotu wskazuje, iż przełomowym wydarzeniem, które zapoczątkowało badania nad wybuchowością pyłów oraz metodami ich zwalczania była katastrofa wybuchu pyłu węglowego we francuskiej kopalni Courriers 10 marca 1906 roku.

Istotną przyczynę tej katastrofy stanowił brak przedsięwzięć organizacyjno-technicznych ukierunkowanych na minimalizację ryzyka wybuchu pyłu. Niebezpieczeństwo wybuchu pyłu węglowego występujące w zakładach górniczych zajmujących się wydobywaniem węgla kamiennego oraz brunatnego stanowi jedno z głównych zagrożeń. Mechanizacja procesów urabiania oraz transportu węgla wpłynęła na zwiększenie ilości powstającego pyłu w wyrobiskach. Wydobywanie węgla z niższych pokładów oraz wzrost szybkości drążenia spowodowało także wzrost ilości wydzielającego się metanu, którego zapłon stanowi częsty inicjator wybuchu pyłu węglowego. W rezultacie tych działań znacznie wzrosło potencjalne zagrożenie wybuchami w górnictwie. Po katastrofie w Courriers w wielu krajach rozpoczęto szereg badań nad wybuchowością pyłów. Prawdziwym pionierem rozwoju tej dziedziny był J. Taffanel, francuski uczony, którego badania zapoczątkowały rozpoznanie podstawowych parametrów wybuchów pyłów [8].

W celu dokonania charakterystyki wybuchu pyłów przemysłowych oraz minimalizowania zagrożeń przeprowadzono szereg badań naukowych, spośród których wiele jest nadal kontynuowanych.

Casell i Liebman w swoich badaniach udowodnili, że wymagana temperatura do zapłonu chmury pyłu jest mniejsza niż temperatura zapłonu pojedynczej cząsteczki. Dalsze badania w podgrzonym środowisku doprowadziły do stwierdzenia, że wraz ze wzrostem objętości obłoku, jego temperatura zapłonu spada [6]. Sweis skupiał się na analizie właściwości wybuchowych pyłu kwasów, w tym między innymi kwasu fumarowego. Do tego celu został opracowany matematyczny model komputerowy. Badano moment inicjacji spalania oraz propagację płomienia. Nie dokonano porównania wyników modelowych z eksperymentalnymi [18]. Amyotte (i inni) w swoich pracach skupiali się na badaniu wpływu turbulencji na parametry wybuchu. Wykazano, że wszelkiego rodzaju turbulencje zmniejszają zdolność zapalną chmury pyłu [2]. Doświadczenia Hertzberga opierały się na wyznaczeniu dolnej granicy wybuchowości rozdrobnionego pyłu węglowego. Dowiedziono, że wartość DGW zależy od rozmiaru cząsteczek oraz stopnia ich dyspersji [10]. Aldis do badań wykorzystywał opracowany przez siebie dwufazowy dwuwymiarowy model komputerowy. Model służył do prognozowania przyrostu ciśnienia podczas wybuchu pyłu [1]. W swoich pracach badawczych Lesikar (i inni) określał minimalną temperaturę zapłonu, maksymalne ciśnienie oraz maksymalny przyrost ciśnienia trzech próbek pszenicy oraz sorgo w pięciu

różnych stężeniach. Stwierdzono przy tym, że przyjęte wówczas dopuszczalne wartości stężeń są niższe od rzeczywiście koniecznych do utworzenia pyłowej atmosfery wybuchowej. Zgłębiano również zagadnienia wybuchu pierwotnego oraz wtórnego [16]. Prace Cashdollara nad wybuchowością pyłów węglowych miały na celu zwiększenie poziomu bezpieczeństwa w kopalniach oraz innych przedsiębiorstwach. Badania prowadzono w 20-litrowej komorze laboratoryjnej. Zakres mierzonych parametrów obejmował badanie dolnej granicy wybuchowości, maksymalne ciśnienie wybuchu, maksymalną szybkość narastania ciśnienia wybuchu oraz graniczne stężenie tlenu. Badano również stężenia inertyzujące pyłu wapiennego. Otrzymane parametry wybuchowości porównywano z innymi pyłami, w tym pochodzenia chemicznego, jak w przypadku polietylenu. Stwierdzono, że spośród różnych rodzajów węgla największe zagrożenie stwarzają te, bardziej lotne oraz bardziej rozdrobnione [5].

Istotną rolę w dziedzinie badań wybuchowości pyłów odegrały również polskie ośrodki badawcze.

W Polsce od 1925 roku prace nad zwalczaniem niebezpieczeństw związanych z wybuchami pyłu węglowego oraz metanu prowadzi Kopalnia Doświadczalna „Barbara”. W KDB właściwości wybuchowe pyłu węglowego określano głównie przez takie parametry jak dolna granica wybuchowości, maksymalne ciśnienie wybuchu p_{\max} oraz największą szybkość narastania ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{\max}$. W wielu eksperymentach badawczych wyznaczano również minimalną energię zapłonu obłoku pyłu E_{\min} , temperaturę zapłonu 5 mm warstwy pyłu T_z oraz najniższą temperaturę zapłonu obłoku pyłu $T_{z\min}$ [8, 20].

Szerokie spektrum poruszanej problematyki nie skupiało się wyłącznie na zagrożeniach wybuchowych polskiego przemysłu wydobywczego węgla kamiennego. Lebecki (i inni) prowadził badania w pełnej skali nad wybuchowością pyłów zbożowych. Wykorzystując tunele o długości 100 oraz 400 m wykazano m.in., że minimalne stężenie pyłu zbożowego mające „zdolność” podtrzymywania propagacji płomienia wynosi 50 g/m^3 . Przywołując aspekty prewencyjne prowadzonych prac, dowiedziono, że silne wybuchy pyłu zbożowego mogą być skutecznie tłumione barierami wodnymi z ilością wody co najmniej 200 litrów na metr kwadratowy przekroju tunelu. Wykorzystanie aktywnych systemów tłumienia zarekomendowano tylko w przypadku słabszych wybuchów lub wybuchów we wczesnej fazie rozwoju [15].

Prace Klemensa (i innych) były ukierunkowane m.in. na opracowanie matematycznego modelu wzburzenia zalegających warstw pyłowych pod wpływem fal uderzeniowych. W tym celu przeprowadzono badania pyłu węglowego oraz krzemionkowego o grubości 0,1, 0,4 i 0,8 mm oraz prędkości fali kolejno 450, 490 oraz 518 m/s. Wykazano między innymi, że w pobliżu warstwy prędkość pionowa podnoszonego pyłu wzrasta wraz ze wzrostem szybkości fali uderzeniowej i grubości warstwy, a czas do wzburzenia maleje. Wskazano ponadto, że prędkość pionowa podnoszonych cząstek do pewnej wysokości komory badawczej wzrastała, a jej ostateczne wytracenie następowało w pobliżu górnej ściany komory. Rejestrowanie stężenia tworzącej się w ten sposób chmury pyłowej pozwoliło ponadto wykazać, że wraz ze wzrostem grubości warstwy oraz szybkości fali zwiększa się również kolejno wysokość osiągnięta przez chmurę pyłu oraz szybkość osiągnięcia tej wysokości. Wyniki przeprowadzonych badań wykorzystano do opracowania matematycznego modelu opisującego zjawisko unoszenia cząstek warstw pyłu za poruszającą się z dużą prędkością falą uderzeniową [14, 19].

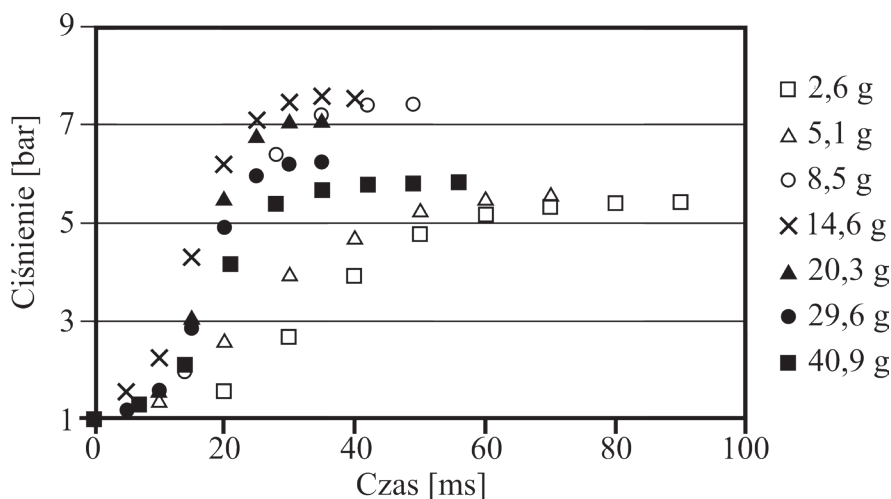
Wraz z rozwojem przemysłu istotnie wzrosło znaczenie prewencji przeciwybuchowej mającej na celu ograniczanie prawdopodobieństwa wystąpienia wybuchu lub jego skutków w procesach przemysłowych. Opracowanie rozwiązań technicznych jest nieodzownie połączone z prowadzeniem w tym zakresie badań naukowych, ukierunkowanych na szersze poznanie przebiegu podstawowych charakterystyk wybuchu i mechanizmów oddziaływania jego determinantów. Wyniki tego rodzaju badań poddaje się wnikliwej analizie z uwagi na ilość czynników warunkujących przebieg wybuchu pyłów.

4. Wybrane determinanty wybuchowości pyłów

4.1. Stężenie pyłu w mieszaninie

Stężenie palnych drobin w obłoku pyłowym stanowi jeden z głównych determinantów jego wybuchowości. Badania mające na celu określenie wpływu stężenia pyłu na wybuchowość pyłów opierają się na określaniu tych stężeń, które mogą spowodować największe skutki. Wyniki badań prezentowane są w postaci wykresów zależności przebiegu ciśnienia wybuchu od czasu dla różnych stężeń badanego materiału. Wykreślenie krzywych $p(t)$ stanowi podstawę wyznaczenia maksymalnego ciśnienia wybuchu p_{\max} . Do badań,

których wyniki zaprezentowano na rys. 1, wykorzystano mieszaninę pyłu buku oraz dębu o gęstości właściwej około 1600 kg/m^3 . Badania prowadzono w zbiorniku sferycznym o objętości 20 dm^3 . Wielkość cząstek pyłu zawierała się w zakresie $25\text{--}45 \text{ }\mu\text{m}$.



Rys. 1. Przebieg ciśnienia wybuchu w zależności od czasu dla 7 różnych mas pyłu drzewnego

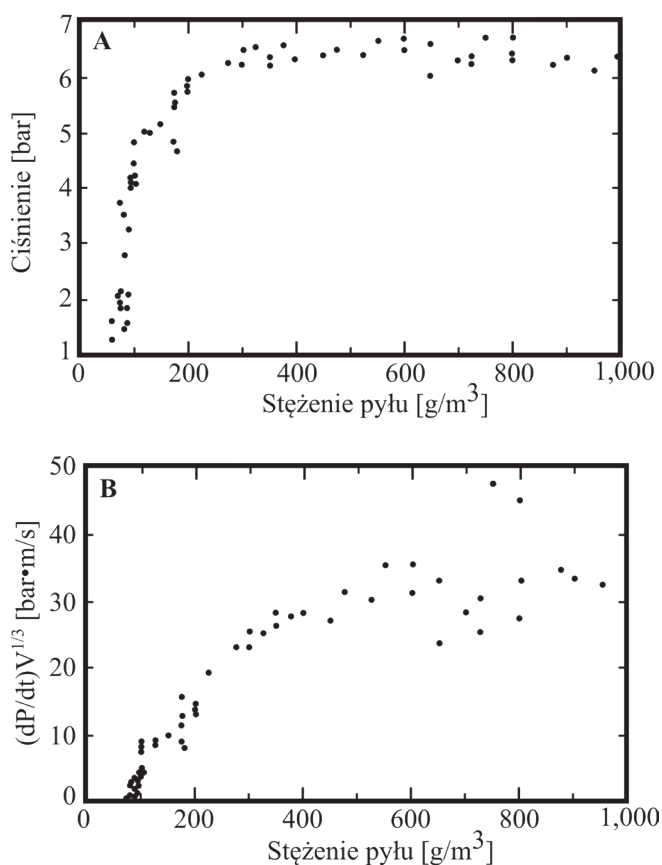
Źródło: opracowano na podstawie [4]

Jak zaprezentowano na rys. 1, w początkowej fazie zwiększanie masy (stężenia) palnego pyłu powoduje zwiększenie dynamiki jego wybuchu. Zmierzone wartości maksymalnego ciśnienia oraz szybkość jego narastania są coraz większe. Tendencja ta utrzymuje się do dawki $14,6 \text{ g}$. W wyższych stężeniach zarówno osiągnięte ciśnienia, jak i dynamika oraz wartości parametrów wybuchowości zaczynają maleć. Szybkość reakcji spalania obłoku pyłowego, tak jak w przypadku gazów, determinowana jest stosunkami ilościowymi materiału palnego oraz utleniacza.

Na rys. 2 przedstawiono zależność wyznaczonego ciśnienia wybuchu oraz wskaźnika wybuchowości pyłu K_{st} od stężenia dla pyłu z węgla bitumicznego pochodzącego z kopalni w Pittsburghu. Węgiel bitumiczny charakteryzuje się wysoką zawartością części lotnych oraz smoły. Na podstawie tych danych zauważono wyraźne zróżnicowanie badanych parametrów w zależności od masy pyłu węglowego. Poniżej DGW, które w tych badaniach wniosło około 80 g/m^3 , zjawisko wybuchu pyłu nie występuje. Uzasadnione jest to zbyt dużym

mi odległościami pomiędzy cząsteczkami paliwa, ograniczającymi dynamikę przekazywania ciepła oraz propagację płomienia. Wartości ciśnienia wybuchu oraz wskaźnika wybuchowości rosną wraz ze stężeniem pyłu, następnie w określonym zakresie stężeń wartości te stabilizują się.

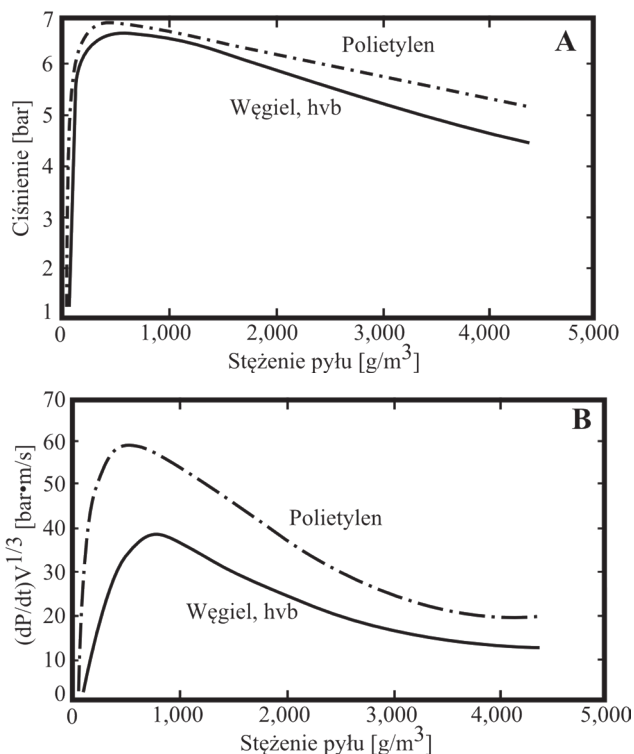
W badaniach prowadzonych przez Kopalnię Doświadczalną „Barbara” najniższe DGW (25 g/m^3) oznaczono dla węgla brunatnego z kopalni Sienawa, zawartość części lotnych wynosiła 57,2%. Najwyższą natomiast dla węgla z kopalni Wałbrzych (700 g/m^3), przy zawartości części lotnych 16,7%. Należy podkreślić, że metody badawcze KD „Barbara” oraz omówionych powyżej wyników różniły się [8].



Rys. 2. Zależność ciśnienia wybuchu (A) oraz współczynnika wybuchowości (B) od stężenia pyłu węglowego

Źródło: opracowano na podstawie [13]

Cechą wykresów stężeniowych jest występowanie w niższych zakresach stężeń fazy stabilizacji parametrów wybuchowości. Celem szerszego spojrzenia na te zagadnienia prowadzono badania uwzględniających wyższe stężenia palnych drobin. Przykładowe wyniki zaprezentowano na rys. 3.

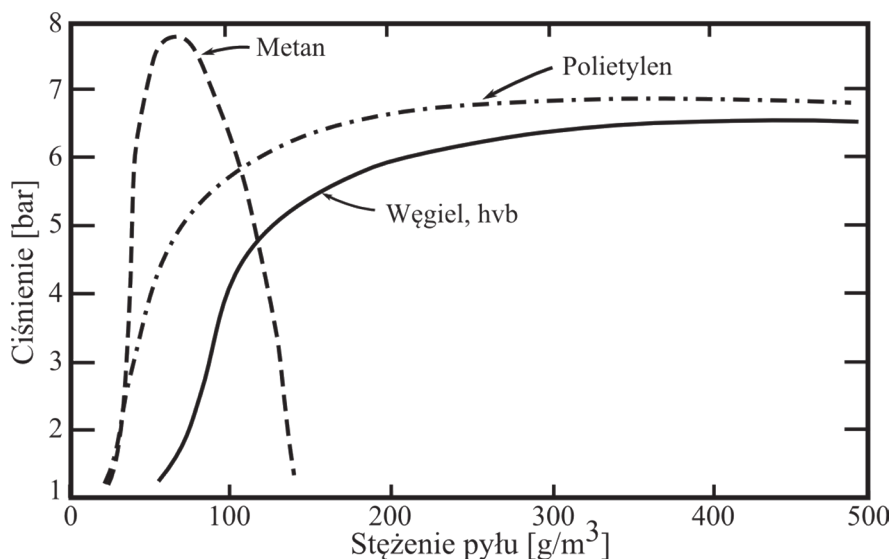


Rys. 3. Zależność ciśnienia wybuchu (A) oraz współczynnika wybuchowości (B) od stężenia pyłu polietylenowego oraz węglowego

Źródło: opracowano na podstawie [13]

Na rys. 3 porównano wartości ciśnienia oraz współczynnika K_{st} od stężenia pyłu węgla bitumicznego oraz pyłu polietylenowego. Stabilizujące się do stężenia około 1000 g/m^3 parametry wybuchowości, wraz postępującym zwiększaniem stężenia pyłu ulegają stopniowemu zmniejszaniu. Co istotne, oba pyły zachowały właściwości wybuchowe nawet w stężeniach powyżej 4000 g/m^3 . Badania eksperymentalne wykazały ponadto, że górna granica wybuchowości w przypadku pyłów nie jest wartością jednoznaczną. Odmienny przebieg krzywych ciśnienie-stężenie stanowi cechą odróżniającą gazowe i pyłowe wybuchy.

Celem ich porównania, na rys. 4 zaprezentowano zależność wartości maksymalnego ciśnienia wybuchu od stężenia dla pyłu węglowego, pyłu polietylenu oraz metanu.



Rys. 4. Zależność ciśnienia wybuchu od stężenia metanu, rozdrobnionego polietylenu oraz pyłu węglowego

Źródło: opracowano na podstawie [11]

Krzywe pyłowe są do siebie zbliżone. Niewielkie zróżnicowanie występuje w zakresie DGW oraz p_{max} . Wartości dolnej granicy wybuchowości polietylenu oraz metanu są porównywalne. Badania wskazały, że przy niskich stężeniach całkowicie lotny polietylen spala się podobnie jak metan. Z przebiegu krzywej metanu daje się określić zarówno dolną, jak i górną granicę wybuchowości, co w przypadku pyłów nie jest jednoznaczne. Wraz ze wzrostem stężenia drobin maksymalne ciśnienie wybuchu spada, lecz nieznacznie w porównaniu z gazem.

4.2. Wielkość cząstek pyłu

Rozmiar cząstek oraz skład frakcyjny istotnie wpływają na wybuchowość pyłu. Od stopnia rozdrobnienia zależy wielkość powierzchni cząstek pyłu przypadającej na jednostkę jego masy. Powierzchnia właściwa determinuje

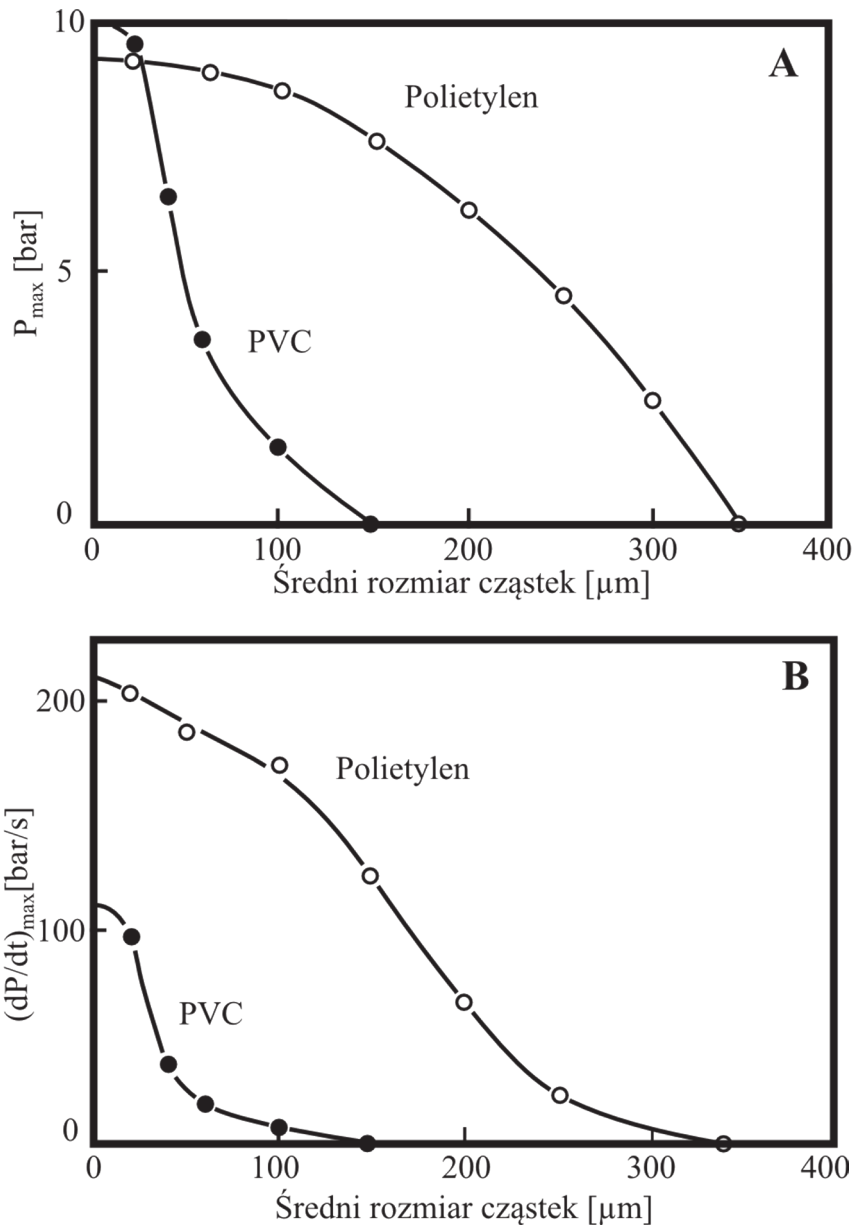
szybkość reagowania materiału z utleniaczem. Ze spadkiem wielkości cząstek obniża się ilość energii potrzebnej do ich zapalenia, wzrasta szybkość palenia się i ryzyko powstania ładunków elektrostatycznych. Ogólna zależność wynikające z analizy literatury przedmiotu wskazuje, że wraz ze zwiększeniem stopnia rozdrobnienia pyłu zwiększa się również w ujęciu ogólnym jego wybuchowość [17]. Wśród amerykańskich oraz radzieckich badaczy pyłu węglowego istniał pogląd, że w ujęciu ogólnym jego wybuchowość wzrasta z rozdrobnieniem do pewnej granicy, po przekroczeniu której ulega obniżeniu. Badanie prowadzone przez Kopalnię Doświadczalną „Barbara” w latach 1945 oraz 1952 z wykorzystaniem frakcji od 0 do 60 μm nie potwierdziły tej tezy. Późniejsze badania wykazały, że poniżej określonej średnicy cząstek parametry wybuchu stabilizują się [8].

Na rys. 5 pokazano zależność maksymalnego ciśnienia p_{max} oraz maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu dp/dt_{max} polietylenu oraz polichlorku winylu od średniego rozmiaru ich cząstek.

Na rys. 5 przedstawiono ogólną zależność, jaką wykazuje większość palnych pyłów w zakresie charakteryzowanych parametrów. Istnieją jednak materiały, które różnią się w zakresie mniejszych średnic cząstek. Do tych materiałów zaliczane są pyły węglowe oraz pyły organiczne [9].

Wydzielanie się części lotnych w przypadku pyłu węglowego jest pirolizą, w skutek której ulega on fizycznym oraz chemicznym przemianom. W pierwszej kolejności spalaniu ulegają wydzielone części lotne, w drugiej około 20 razy dłużej trwa spalanie pozostałości koksowej [8].

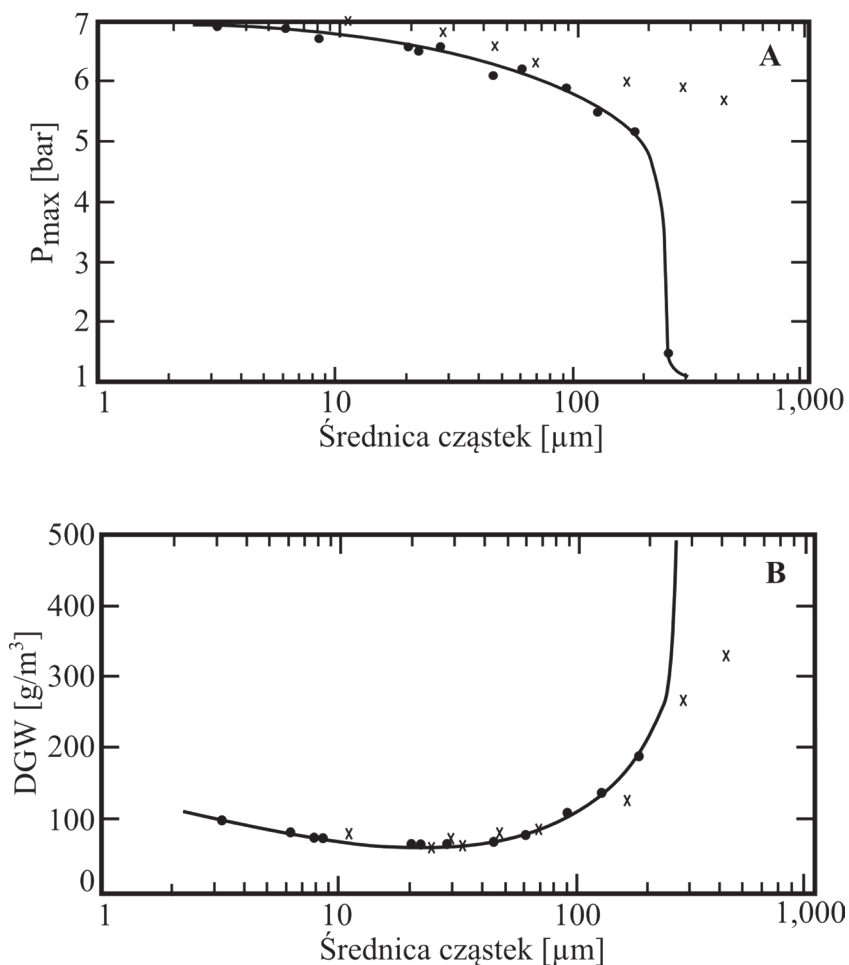
Minimalna średnica cząstek, poniżej której szybkość spalania stabilizuje się, zależy od czasu trwania trzech następujących po sobie procesów: wydzielania części lotnych, mieszania fazy gazowej oraz jej spalania. Średnica cząsteczki pyłu warunkuje głównie szybkość wydzielania części lotnych. Dlatego, jeśli spalanie fazy gazowej przebiega najwolniej spośród trzech procesów, zwiększanie szybkości wydzielania części lotnych poprzez zmniejszanie średnicy cząstek nie zwiększy ogólnej szybkości spalania pyłu. Stąd wykazano, że minimalna średnica cząstek pyłu węglowego, poniżej której parametry spalania oraz wybuchu stabilizują się wynosi około 50 μm . Średnica cząstek dla materiałów, których gazowe produkty pirolizy utleniają się szybciej niż części lotne pyłu węglowego jest mniejsza, czego przykładem stanowią pyły organiczne np. skrobia, dla których wynosi ona około 10 μm [13].



Rys. 5. Zależność maksymalnego ciśnienia wybuchu (A) oraz maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu (B) od średniej wielkości cząstek pyłu polietylenu oraz polichlorku winylu

Źródło: opracowano na podstawie [9]

Na rys. 6 przedstawiono wpływ średnicy cząsteczki na parametry wybuchowości bitumicznego pyłu węglowego.



Rys. 6. Zależność maksymalnego ciśnienia wybuchu (A) oraz dolnej granicy wybuchowości (B), od średnicy cząstek pyłu węgla bitumicznego

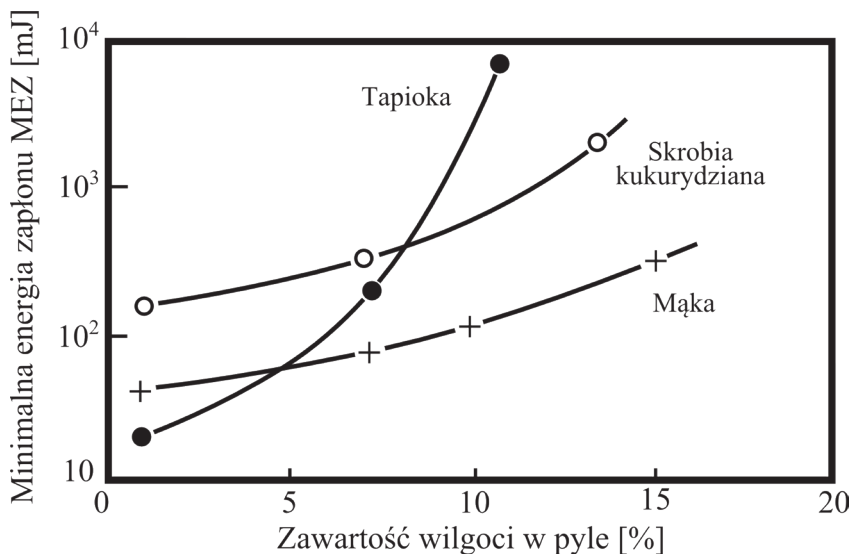
Źródło: opracowano na podstawie [13]

Zmniejszenie średnicy cząsteczek pyłu powoduje wzrost maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz spadek dolnej granicy wybuchowości. Wartości DGW stabilizują się dla mniejszych średnic, następnie nieznacznie rosną

wraz z dalszym rozdrabnianiem. Ponadto istnieje graniczna wartość średnicy cząstek pyłu, powyżej której nie wykazuje on właściwości wybuchowych. W przytoczonych badaniach wyniosła ona ok. 300 μm .

4.3. Wilgotność pyłu

Wilgotność palnego pyłu determinuje jego wybuchowość głównie poprzez zwiększanie energii zapłonu oraz zmniejszenie szybkości reakcji spalania zachodzących w początkowej fazie wybuchu. Zależność minimalnej energii iskry elektrycznej powodującej zapłon od wilgotności dla trzech pyłów pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Zależność minimalnej energii zapłonu od wilgotności dla pyłu tapioki, skrobi kukurydzianej oraz mąki

Źródło: opracowano na podstawie [9]

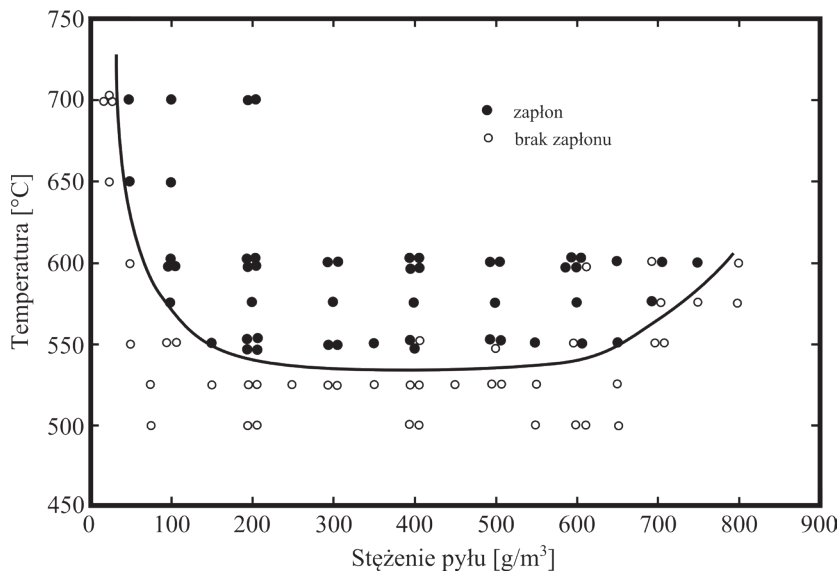
Jak przedstawiono na rys. 7 wilgotność pyłu istotnie wpływa na jego „zdolność” do zapłonu i dynamicznej propagacji spalania w całej objętości obłoku pyłowo-powietrznego.

Wpływ wilgotności na minimalną temperaturę zapłonu obłoku pyłu nie jest już taki wyraźny. Przykładowo wartość minimalnej temperatury zapłonu suchej mąki poddanej badaniom wyniosła 440°C, natomiast dla mąki o wilgotności

14% wyniosła 470°C. Wpływanie na wybuchowość pyłów organicznych przez wilgotność jego cząstek sprowadza się do trzech sposobów oddziaływania. W pierwszym w skutek ogrzania cząstek dochodzi do odparowania wody. Następnie pary wody mieszają się z produktami pirolizy cząstek organicznych schładzając je oraz rozrzedzając, co sprawia, że są one mniej reaktywne. Trzecim sposobem jest ograniczanie stopnia dyspersji pyłu przez zwiększenie kohezji międzycząsteczkowej [13].

4.4. Temperatura

Zjawisko samozapłonu zachodzi, gdy dla określonego stężenia zostanie on podgrzany powyżej określonej temperatury, tzw. temperatury samozapłonu. Minimalna temperatura zapłonu obłoku pyłu definiowana jest jako najniższa temperatura gorącej powierzchni w której najbardziej zapalna mieszanina pyłu z utleniaczem ulega zapłonowi w określonych warunkach badania. Na rys. 8 przedstawiono związek pomiędzy wybuchowością pyłu a temperaturą gorącej powierzchni w funkcji stężenia pyłu węglowego. Pełne punkty odwzorowują te pomiary, podczas których nastąpił zapłon obłoku o zadanym stężeniu, puste natomiast jego brak.



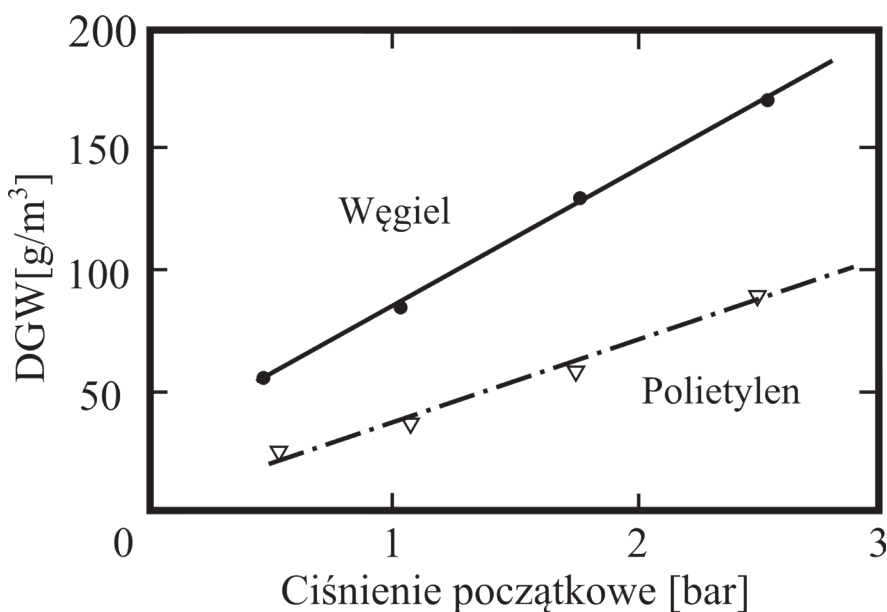
Rys. 8. Zależność temperatury zapłonu od stężenia pyłu węglowego

Źródło: opracowano na podstawie [7]

Krzywa utworzona na granicy strefy wybuchowej oraz niewybuchowej wyznacza graniczną wartość temperatury samozapłonu badanego pyłu węglowego w funkcji jego stężenia. Najniższą wartość, którą przyjmuje ta krzywa wynosi 530°C. Jest to wartość minimalnej temperatury samozapłonu obłoku pyłu.

4.5. Ciśnienie początkowe

Parametry wybuchowości pyłów uwarunkowane są również wartością ciśnienia początkowego, pod którym ma miejsce zapłon obłoku pyłu. Na rys. 9 pokazano zależność dolnej granicy wybuchowości od ciśnienia dla pyłu węglowego oraz polietylenowego.



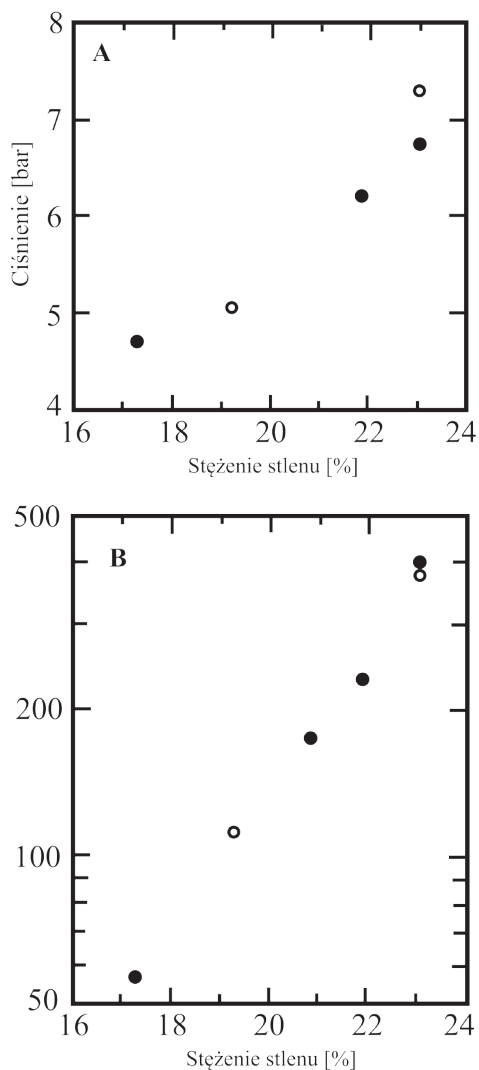
Rys. 9. Zależność minimalnego stężenia wybuchowego od ciśnienia początkowego dla pyłu węglowego oraz polietylenowego

Źródło: opracowano na podstawie [12]

Badania wykazały, że zależność minimalnego stężenia wybuchowego od początkowego ciśnienia wybuchu jest liniowa dla niskich wartości tego ciśnienia. Podobne wyniki otrzymano dla pyłu węgla brunatnego. Inne badania

wykazały zbliżony efekt liniowego wzrostu maksymalnego ciśnienia p_{\max} oraz współczynnika wybuchowości K_{st} w zależności od ciśnienia początkowego z zakresu 1–4 bary [13].

4.6. Stężenie tlenu

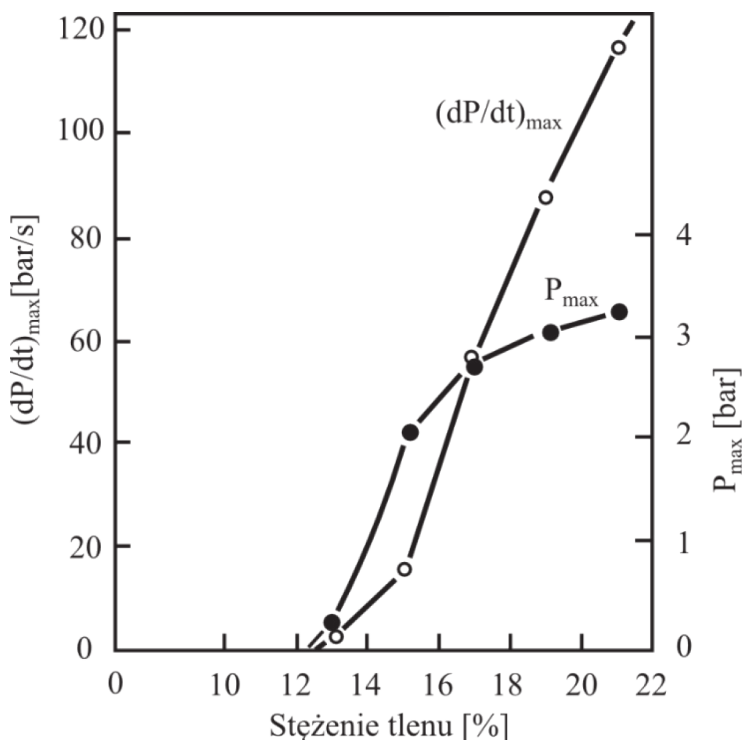


Rys. 10. Zależność maksymalnego ciśnienia wybuchu (A) oraz maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu (B) od stężenia tlenu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]

Występowanie atmosfer wybuchowych, zarówno o zredukowanej, jak i zwiększonej w stosunku do powietrza ilości tlenu istotnie wpływa na jej właściwości wybuchowe. Wyniki badań prowadzonych w tym zakresie zaprezentowano na rysunku 10. Badano pył węglowy w stężeniu 375 g/m^3 (znaczniki puste) oraz 500 g/m^3 (znaczniki pełne). Wykazano, że szybkość narastania ciśnienia wybuchu pyłu węglowego rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem stężenia tlenu. Podobnie w przypadku zarejestrowanego ciśnienia wybuchu, jednak zależność ta ma raczej liniowy charakter w stężeniach znacznie większych od DGW. W stężeniach bliskich DGW ciśnienie wybuchu maleje znacznie szybciej wraz z redukcją stężenia tlenu powodując utratę ich liniowej zależności.

Wykładnicza zależność dp/dt_{\max} od wartości stężenia tlenu nie została potwierdzona w pracach innych badaczy.



Rys. 11. Zależność maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu od stężenia tlenu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [9]

Prezentowane na rys. 11 wyniki badań Hartmana prowadzone w latach 50. oraz później przez Wiemanna w latach 80. XX w. wykazały, że zarówno maksymalne ciśnienie wybuchu, jak i maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu maleją proporcjonalnie (w przypadku p_{\max} do wartości 16–17%) do zawartości tlenu w atmosferze wybuchowej. Obie charakterystyki różnią się jednak znacznie pod względem dynamiki. Zmniejszenie zawartości tlenu do 15% spowodowało spadek wartości p_{\max} o około 30%, podczas gdy wartość dp/dt_{\max} spadła o ponad 85%, co wskazuje na silny związek pomiędzy zawartością tlenu a kinetyką reakcji spalania.

Podsumowanie

Problematyka determinacji wybuchowości pyłów przemysłowych jest bardzo rozległa z uwagi na mnogość czynników oraz form i zakresów ich występowania. Prowadzone w tym zakresie badania laboratoryjne pozwalają szeroko spojrzeć na tę, mającą interdyscyplinarny charakter problematykę. Potrzeba praktycznego ich wykorzystania w szerokorozumianej profilaktyce przeciwybuchowej wymaga zwiększenia skali, w której wykonywane są badania, gdyż te stanowią istotny element procesu identyfikacji oraz ograniczania skutków potencjalnych wybuchów mieszanin-pyłowo powietrznych.

Literatura

- [1] Alids D., Two-dimensional analysis of dust explosion, *AICHE Journal* 1990, 36(7), 1087–1096.
- [2] Amyotte P., Chippett S., Pegg M., Effect of turbulence on dust explosion, *Progress in Energy and Combustion* 1988, 14(4), 293–310.
- [3] Borkowski R., Jaskółowski W., Piechocka E., Półka M., *Fizykochemia spalania i wybuchów: ćwiczenia laboratoryjne*, Warszawa, 1996.
- [4] Calle S., Kłaba L., Thomas D., Perrin L., Dufaud O., Influence of the size distribution and concentration on wood dust explosion: Experiments and reaction modeling, *Powder Technology* 2005, 158.
- [5] Cashdollar K.L., Coal dust explosibility, *Journal of Loss Prev. Process, Ind.* 1996, 9(1), 65–76.
- [6] Cassel H., Liebman M., Ignition of dust clouds, *Combustion and Flame* 1959, 3, 467–475.

- [7] Conti R.S., Cashdollar K.L., Thomas R.A. (1993). Improved 6.8-L furnace for measuring the autoignition temperatures of dust clouds, US Bureau of Mines RI 9467, 26 pp.
- [8] Cybulski W., Wybuchy pyłu węglowego i ich zwalczanie, Bytom 1973.
- [9] Eckhoff R.K., Dust Explosions in the process industries. Third edition, USA 2003.
- [10] Hertzberg M., Cashdollar K.L., Zlochower I.A., Flammability limit measurements for dusts and gases: ignition energy requirements and pressure dependences, [w:] 21st Symposium (International) on Combustion (pp. 303–313), Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1988.
- [11] Hertzberg M., Zlochower I.A., Cashdollar K.L., Volatility model for coal dust flame propagation and extinguishment, [w:] 21st Symposium (International) on Combustion (pp. 325–333), Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1988.
- [12] Hertzberg M., & Cashdollar, K.L., Introduction to dustexplosions, [w:] Industrial dust explosions, STP 958 (pp. 5–32), West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 1987.
- [13] Cashdollar K.L., Overview of dust explosibility characteristics, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2000, 13, s. 188.
- [14] Klemens R., Zydak P., Kaluzny P., Litwin D., Wolanski P., Dynamics of dust dispersion from the layer behind the propagating shock wave, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2006, 19, s. 200–209.
- [15] Lebecki K., Cybulski K., Śliż J., Dyduch Z., Wolański P., Large scale grain dust explosions-research in Poland, *Shock Waves* 1995, 5, 109–114.
- [16] Lesikar B., Parnell C., Garcia A., Determination of grain dust explosibility parameters, *American Society of Agricultural Engineering* 1991, 34(2), 571–576.
- [17] Ostrowski T., Wybuchy pyłów w przemyśle, Warszawa 1980.
- [18] Sweis F., Dust Explosions Studies, Ph.D. Thesis, University of Manchester, U.K., 1982.
- [19] Zydak P., Klemens R., Modelling of dust lifting process behind propagating shock wave, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2007, 20, s. 417–426.
- [20] PN-EN 50281-2-1, Urządzenia elektryczne do stosowania w obecności pyłów palnych, Część 2–1: Metody badania, Metody oznaczania minimalnej temperatury zapłonu pyłu.

- [21] PN-ISO 4225:1999 – Jakość powietrza – Zagadnienia ogólne – Terminologia.
- [22] PN-EN 13821: 2004, Przestrzenie zagrożone wybuchem – Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem – Oznaczanie minimalnej energii zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych.
- [23] PN-EN 14034-1: 2011, Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu – Część 1: Oznaczanie maksymalnego ciśnienia wybuchu p_{max} obłoków pyłu.
- [24] PN-EN 14034-2: 2011, Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu – Część 2: Oznaczanie maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{max}$ obłoków pyłu.
- [25] PN-EN 14034-3: 2011, Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu – Część 3: Oznaczanie dolnej granicy wybuchowości DGW obłoków pyłu.
- [26] PN-EN 14034-4: 2011, Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu – Część 4: Oznaczanie granicznego stężenia tlenu GST obłoków pyłu.
- [27] PN-EN 60079-10-2: 2015, Atmosfery wybuchowe; Część 10–2: Klasyfikacja przestrzeni; Pyłowe atmosfery wybuchowe.