

Maciej Celiński
Michał Gloc

**Parametry
charakteryzujące
wybuchowość pyłów
mieszanek paszowych
i ich komponentów**

MATERIAŁY INFORMACYJNE

Materiały informacyjne CIOP-PIB

Materiały informacyjne dotyczące parametrów charakteryzujących wybuchowość pyłów mieszanek paszowych i ich komponentów (dolna granica wybuchowości, maksymalne ciśnienie wybuchu, maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu, współczynnik K_{ST} , graniczne stężenie tlenu, minimalna energia zapłonu)

Opracowano na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, sfinansowanego w latach 2017-2019 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Projekt II.N.17: Badanie zagrożenia pyłową atmosferą wybuchową oraz wyładowaniami elektrostatycznymi w procesach produkcji mieszanek paszowych wytwarzanych na bazie surowców roślinnych

Autorzy:

dr inż. Maciej Celiński – Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych, Pracownia Bezpieczeństwa Chemicznego
dr inż. Michał Gloc – Politechnika Warszawska, Zakład Projektowania Materiałów Uczelniane Centrum Badawcze „Materiały Funkcjonalne”

Zdjęcie na okładce: Bigstock

Warszawa 2019

© Copyright by

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

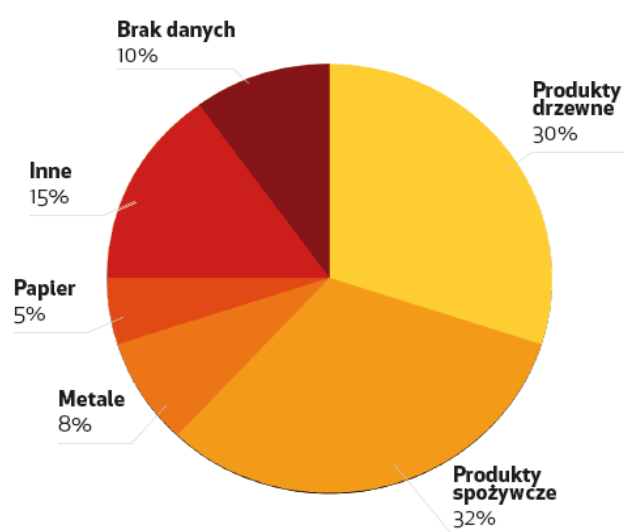
Warszawa 2019

CIOP  **PIB**

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
tel. (48-22) 623 36 98, www.ciop.pl

1. Wprowadzenie

Większość pyłów przemysłowych przy odpowiednim rozdrobnieniu i koncentracji w powietrzu oraz odpowiednim źródle zapłonu może tworzyć atmosfery wybuchowe. Wybuchy pyłów stanowią problem w różnych gałęziach przemysłu. Problem ten dotyczy praktycznie wszystkich zakładów pracy, w których występują pyły palne. Do pyłów palnych zalicza się m.in. pyły pochodzenia organicznego, np. pyły drewna, węgla, produktów żywnościowych (mąki, cukru). Rysunek 1 przedstawia procentowy udział poszczególnych pyłów palnych najczęściej ulegających zapaleniu w praktyce przemysłowej.



Rys. 1. Procentowy rozkład pyłów biorących udział w wybuchach [źródło: opracowanie własne na podst.: C. Cloney, 2017 Combustible Dust Incident Report – Version 1, 2018]

Do klasyfikacji pyłów i oceny zagrożenia wybuchem stworzono szereg znormalizowanych metod badawczych. Podstawową, najczęściej spotykaną klasyfikację pyłów określającą stopień zagrożenia wybuchem (na podstawie stałej pyłowej K_{st}) przedstawiono w tabeli 1.

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

Klasa zagrożenia	K_{st} (m · bar/s)	Zagrożenie
ST0	0	niewybuchowy
ST1	1-200	słabo wybuchowy
ST2	201-300	silnie wybuchowy
ST3	>300	bardzo silnie wybuchowy

Zagrożenie wybuchem definiuje się jako możliwość tworzenia w różnych warunkach przez palne gazy, pary palnych cieczy, pyły lub włókna palnych ciał stałych mieszanin z powietrzem, które pod wpływem czynnika inicjującego zapłon (iskra, łuk elektryczny lub przekroczenie temperatury samozapłonu) ulegają gwałtownemu spalaniu połączonemu ze wzrostem ciśnienia.

Żaden materiał palny, w tym pył w stężeniu wybuchowym, nie ulegnie zapłonowi, jeśli nie pojawi się odpowiednio silny bodziec energetyczny. Wskazanie potencjalnych źródeł zapłonu i ich efektywności to pierwszy etap działań. Największą trudnością przy ocenianiu ryzyka wybuchu jest przyporządkowanie poszczególnym źródłom zapłonu określonego prawdopodobieństwa. Należy określić, czy dane źródła zapłonu mogą występować ciągle, okazjonalnie, czy jedynie wyjątkowo.

Zjawisko wybuchu może powstać, jeśli w mieszaninie odpowiedniej ilości paliwa z powietrzem i w zakresie stężenia pomiędzy dolną a górną granicą wybuchowości pojawi się efektywne źródło zapłonu. Czynnikiem decydującym o zdolności substancji palnych do wytworzenia atmosfery wybuchowej jest przede wszystkim zdolność zapłonu mieszaniny tej substancji w powietrzu. Atmosfera wybuchowa wystąpi, kiedy zostanie osiągnięty odpowiedni stopień dyspersji substancji palnej, a stężenie tej substancji zawierać się będzie w zakresie pomiędzy granicami wybuchowości. Atmosfera wybuchowa to mieszanina substancji palnych w postaci gazów, par, mgieł lub pyłów z powietrzem o charakterystyce odpowiadającej warunkom atmosferycznym, w której po wystąpieniu zapłonu spalanie rozprzestrzeni się na całą niespaloną mieszaninę [2,3].

Wytwarzanie mieszanek paszowych wiąże się z mieszaniem ziaren zbóż w procesie ich łączenia, następnie mieszanki takie są magazynowane w silosach. Mieszanie sypkich zbóż, transport tych mieszanek i magazynowanie ich w silosach mogą powodować zagrożenia pożarowe i wybuchowe wynikające z dużej podatności rozdrobnionej masy organicznej na zapłon. Większość pyłów przemysłowych przy odpowiednim rozdrobnieniu i koncentracji w powietrzu oraz odpowiednim źródle zapłonu może tworzyć atmosfery wybuchowe. Dotyczy to również pyłów powstałych w procesach otrzymywania i obróbki ziaren zbóż i pasz rolniczych. Za palny pył uważa się ziarna materiału palnego lub trudnopalnego o wymiarze równym 500 μm lub mniejszym, które w kontakcie z powietrzem wchodzi w reakcję utleniania. Po zapłonie chmury pyłu następuje gwałtowna reakcja spalania całej objętości, w której pył jest zawieszony w powietrzu. Pyły o większych ziarnach także mogą stanowić zagrożenie, lecz ich podatność na gwałtowną reakcję spalania jest mała [2,3].

Zbadanie charakterystyk wybuchowości mieszanin pyłowo-powietrznych to podstawowe zadanie przy projektowaniu oraz prawidłowym doborze innowacyjnych systemów zabezpieczeń przed wybuchem, w tym przede wszystkim takich metod zapobiegania jak odciążanie, tłumienie czy izolacja wybuchów [4]. Do prawidłowego doboru tych metod zapobiegania konieczne jest po-

znanie najważniejszych właściwości wybuchowych pyłów palnych występujących w zakładach przemysłowych, w tym przede wszystkim:

- maksymalnego ciśnienia wybuchu – P_{max} ,
- dolnej granicy wybuchowości – DGW,
- klasy wybuchowości pyłu – indeks deflagacyjny K_{ST} ,
- granicznego stężenia tlenu – GST,
- minimalnej energii zapłonu – MEZ.

Maksymalne ciśnienie wybuchu – P_{max}

Maksymalne ciśnienie wybuchu P_{max} jest to parametr określający maksymalną wartość ciśnienia, jaką jest w stanie wygenerować wybuch mieszaniny pyłowo-powietrznej wewnątrz szczelnie zamkniętego układu. Parametr ten zależy m.in. od: stężenia pyłu, stężenia tlenu, stopnia rozdrobnienia materiału i jego składu chemicznego.

Granice wybuchowości

Mieszanina pyłowo-powietrzna jest wybuchowa jedynie w granicach odpowiedniego zakresu stężeń, tzw. granicach wybuchowości. Poniżej dolnej granicy wybuchowości (DGW) stężenie pyłu w mieszaninie pyłowo-powietrznej jest zbyt niskie, aby podtrzymać reakcję spalania, natomiast powyżej górnej granicy wybuchowości (GGW) ilość utleniacza w mieszaninie pyłowo-powietrznej jest zbyt niska, aby zapłon mógł rozprzestrzenić się w całej objętości tej mieszaniny.

Indeks deflagacyjny K_{ST}

Podstawą do klasyfikacji wybuchowości pyłów palnych jest wartość współczynnika K_{ST} danego wzorem:

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

gdzie:

K_{ST} – parametr K_{ST} ,

dp – zmiana ciśnienia,

dt – zmiana czasu,

V – objętość zbiornika.

Parametr K_{ST} służy do przyporządkowania klasy wybuchowości do badanego pyłu zgodnie z ustaleniami OSHA (Occupational Safety and Health Administration).

Graniczne stężenie tlenu

Graniczne stężenie tlenu (GST, ang. LOC) definiuje się jako najwyższe stężenie tlenu w mieszaninie substancji palnej z powietrzem, przy którym nie następuje wybuch tej mieszaniny. Granice wybuchowości odnoszą się do stężeń palnych substancji w powietrzu, ale w procesie spalania bierze udział tylko jeden jego składnik – tlen, którego zawartość w powietrzu wynosi w warunkach normalnych około 21%. Zawarty tlen jest czynnikiem, który sprzyja zwiększeniu propagacji płomienia podczas pożaru lub wybuchu. Z tej właśnie przyczyny bardzo ważne staje się obniżenie zawartości tlenu w mieszaninie, ponieważ poniżej granicznego stężenia tlenu mieszanina substancji palnej z powietrzem nie generuje takiej ilości ciepła, jaka mogłaby spowodować pożar. GST ściśle zależy od temperatury i ciśnienia oraz zastosowanego gazu. Zmiana stężenia tlenu znacząco wpływa na zakres wybuchowości mieszaniny. Jeśli stężenie tlenu spadnie poniżej granicznego (GST), mieszanina staje się niewybuchowa. Zjawisko to wykorzystuje się w procesie inertyzacji, czyli zapobiegania tworzenia się mieszaniny wybuchowej przez rozcieńczanie jej gazem obojętnym. Pomiar polega na stopniowym obniżaniu zawartości tlenu w mieszaninie pyłu zbóż oraz mieszanek pyłowych z powietrzem w odniesieniu do stężenia pyłu.

Minimalna energia zapłonu

Minimalna energia zapłonu (MEZ) należy do ważnych parametrów charakteryzujących właściwości wybuchowe pyłów i zależy od rodzaju pyłu oraz warunków zapłonu. Definiuje się ją jako najmniejszą energię, która jest wystarczająca do spowodowania zapłonu najłatwiej zapalnej atmosfery wybuchowej w określonych warunkach badania. Minimalna energia zapłonu mieszaniny pyłowo-powietrznej to jeden z podstawowych parametrów charakteryzujących skłonność danego pyłu do wybuchowego spalania. Oznaczanie minimalnej energii zapłonu polega na pomiarach rzeczywistej energii wyładowań elektrycznych iskrowych będących efektem kumulacji ładunku pochodzącego z kondensatora wysokiego napięcia i powodujących zapalenie mieszaniny pyłowo-powietrznej. Minimalna energia zapłonu MEZ pyłów palnych zmniejsza się wraz ze zmniejszeniem rozmiaru cząstek pyłu oraz ze zwiększeniem zawartości części lotnych i stężenia tlenu. Zwiększa się wraz ze wzrostem zawartości wilgoci.

2. Badanie charakterystyk wybuchu mieszanek paszowych

Ze względu na specyfikę badań prowadzonych w ramach projektu, tj. badanie palności i charakterystyki wybuchu pyłu, materiał zbożowy przesiano z wykorzystaniem sita wibracyjnego, a następnie wybrano reprezentatywne frakcje, które poddano badaniom i wytworzono mieszanki paszowe.

2.1. Otrzymywanie pyłu zbożowego

Do analizy przyjęto cztery rodzaje najpopularniejszych ziaren zbóż: owies, pszenżyto, pszenicę i kukurydzę. Ziarna zostały przemielone na drobną frakcję przy użyciu młynka sitowego. Do badań wykorzystano pyły pszenicy, pszenżyta, owsa i kukurydzy uzyskane w procesie mielenia ziaren. Zmielone ziarno w młynku mechanicznym zostało przesiane przez sita wibracyjne. W procesie przesiewania uzyskano różne wartości pyłu. Do badań wybuchowości wybrano pyły zbóż oraz pyły mieszanek paszowych o gradacjach 71-63 μm oraz 63-32 μm , które zmieszano ze sobą w równych proporcjach.

Do dalszych badań przygotowano najczęściej stosowane mieszanki zbożowe, bez dodatków środków chemicznych. Składy mieszanek dobrano na podstawie danych literaturowych oraz ofert producentów mieszanek zbożowych. Mieszanki powstały przez mechaniczne zmieszanie ziaren zbóż w odpowiednich proporcjach. Kompozycje uzyskanych mieszanek paszowych przedstawiono w tabeli 2.

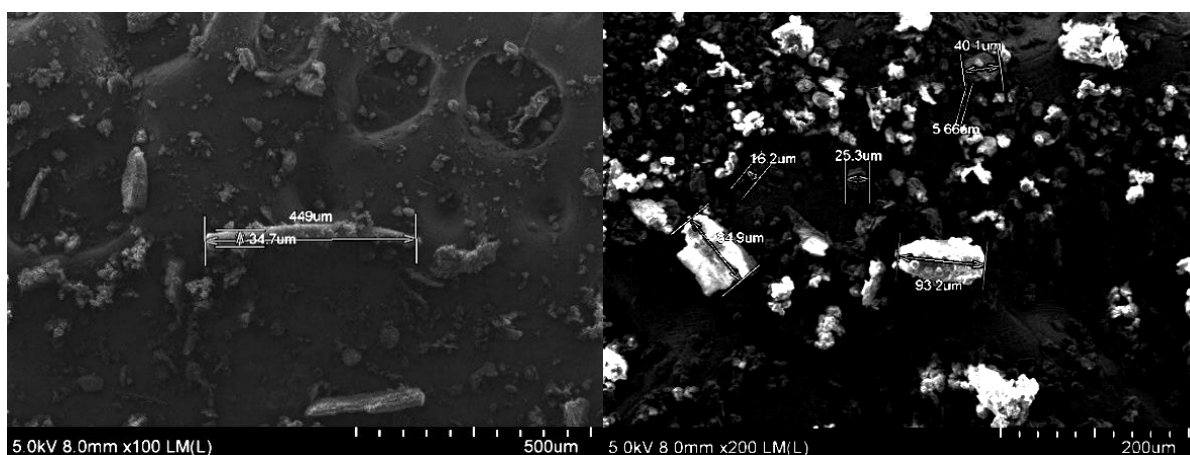
Tabela 2. Procentowy udział ziaren zbóż w przygotowanych mieszankach paszowych

Nr mieszanki/ziarno	Pszenica	Pszenżyto	Owies	Kukurydza
Mieszanka 1	25%	25%	25%	25%
Mieszanka 2	—	50%	50%	—
Mieszanka 3	—	20%	60%	20%
Mieszanka 4	75%	25%	—	—

2.2. Analiza z wykorzystaniem wysokorozdzielczego skaningowego mikroskopu elektronowego

Do określenia morfologii i kształtu cząstek zmielonych ziaren owsa, pszenicy, pszenżyta i kukurydzy, a także uzyskanych mieszanek paszowych użyto skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Pod wpływem wiązki elektronów umieszczona pod mikroskopem próbka emituje różne sygnały (m.in.: elektrony wtórne, elektrony wstecznie rozproszone, charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie), które są rejestrowane za pomocą odpowiednich detektorów, a następnie przetwarzane na obraz próbki lub widmo promieniowania rentgenowskiego.

Z analizy fotografii SEM zmielonego ziarna owsa wynika, że cząstki mają w zdecydowanej przewadze kształt globularny oraz włóknisty. Pomimo zastosowania sita o otworach $200\ \mu\text{m}$ były obserwowane wydłużone ziarna włókniste, w których jeden wymiar przekraczał wartość $200\ \mu\text{m}$. Przykładowe obrazy zarejestrowane dla ziaren owsa po procesie mielenia przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Morfologia ziarna owsa po procesie mielenia w młynku
[źródło: opracowanie własne]

2.3. Wyniki badań charakterystyki wybuchu

W trakcie badań z wykorzystaniem 20-L komory sferycznej oznaczono następujące parametry dla zbóż oraz mieszanek paszowych:

- maksymalne ciśnienie wybuchu – P_{max} (bar);
- indeks deflagacyjny – K_{ST} (bar · m/s);
- dolna granica wybuchowości pyłu – DGW (g/m^3).

Na podstawie uzyskanych wyników przydzielono poszczególne pyły do klas wybuchowości według OSHA (Occupational Safety and Health Administration). Zestawiono je w tabelach 3 i 4.

Tabela 3. Charakterystyka wybuchu dla zbóż

Zboże	P_{max}	K_{ST}	Klasa ST	DGW
	bar	bar · m/s	–	g/m ³
Pszenica	7,1	158	ST1	125
Pszennyto	7,5	134	ST1	125
Kukurydza	6,4	52	ST1	125
Owies	7,6	123	ST1	125

Na podstawie analizy uzyskanych parametrów opisujących charakterystykę wybuchu mieszanin pyłowo-powietrznych badanych pyłów składników mieszanek zbożowych oraz mieszanek można wywnioskować, że zgodnie z ogólnie przyjętymi kryteriami wszystkie badane pyły wykazują tożsame charakterystyki wybuchu: klasę ST1. Warto jednak zauważyć, że wybuch kukurydzy charakteryzuje się znacznie mniejszą szybkością przyrostu ciśnienia wybuchu w jednostce czasu niż pozostałe pyły. Indeks deflagacyjny K_{ST} na poziomie 52 bar · m/s oznacza, że szybkość wybuchu osiąga wartość jedynie 8 m/s (~29 km/h), co świadczy o stosunkowo wolnym procesie spalania mieszaniny pyłowo-powietrznej. Wyniki te korelują z wynikami uzyskanymi w trakcie badań parametrów procesu spalania. Związkiem charakteryzującym się najwyższą wartością parametru K_{ST} jest pszenica (158 bar · m/s), natomiast najwyższy skok ciśnienia wybuchu uzyskano dla owsa (7,6 bara). Wysokie wartości ciśnienia wybuchu sugerują możliwość spowodowania większych szkód podczas ewentualnego zdarzenia na terenie zakładu, w szczególności wewnątrz pomieszczeń zamkniętych. Badania DGW wykazały, że najniższa wartość stężenia, dla której pyły badanych substancji w mieszaninie pyłowo-powietrznej mogą stworzyć atmosferę wybuchową, wynosi 125 g/m³. Wartość ta jest zbliżona do wyników uzyskanych dla likopodium, pyłu polietylenu oraz sacharozy i świadczy o możliwości wystąpienia zapłonu mieszaniny pyłowo-powietrznej przy stosunkowo niedużym stężeniu pyłu. Analogiczne badania wykonano dla mieszanek paszowych. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Charakterystyka wybuchu dla mieszanek paszowych

Mieszanka	P_{max}	K_{ST}	Klasa ST	DGW
	bar	bar · m/s	–	g/m ³
Mieszanka 1	6,8	114	ST1	60
Mieszanka 2	7	156	ST1	60
Mieszanka 3	7,2	113	ST1	60
Mieszanka 4	7,5	144	ST1	125

Na podstawie analizy parametrów opisujących charakterystykę wybuch mieszanek zbożowych można wywnioskować, że zgodnie z ogólnie przyjętymi kryteriami wszystkie badane pyły wykazują tożsame charakterystyki wybuchu: klasę ST1. Warto zauważyć, że wybuch mieszanki 1 zawierającej kukurydzę (25%) + pszenżyto (25%) + pszenicę (25%) + owies (25%) charakteryzuje się mniejszą szybkością przyrostu ciśnienia wybuchu w jednostce czasu niż pozostałe pyły. Indeks deflagacyjny K_{ST} na poziomie odpowiednio 114 bar · m/s oznacza, że szybkość wybuchu osiąga wartość 17 m/s, co świadczy o relatywnie średnim procesie spalania mieszaniny pyłowo-powietrznej. Wyniki te korelują z wynikami uzyskanymi w trakcie badań parametrów procesu spalania. Mieszaną charakteryzującą się najwyższą wartością parametru K_{ST} jest mieszanka 2 (158 bar · m/s), natomiast najwyższy skok ciśnienia wybuchu uzyskano dla mieszanki 4 (7,4 bara).

Dodatkowo wykonano dla mieszanek paszowych badanie granicznego stężenia tlenu GST. Wyniki przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Charakterystyka wybuchu dla granicznego stężenia tlenu GST

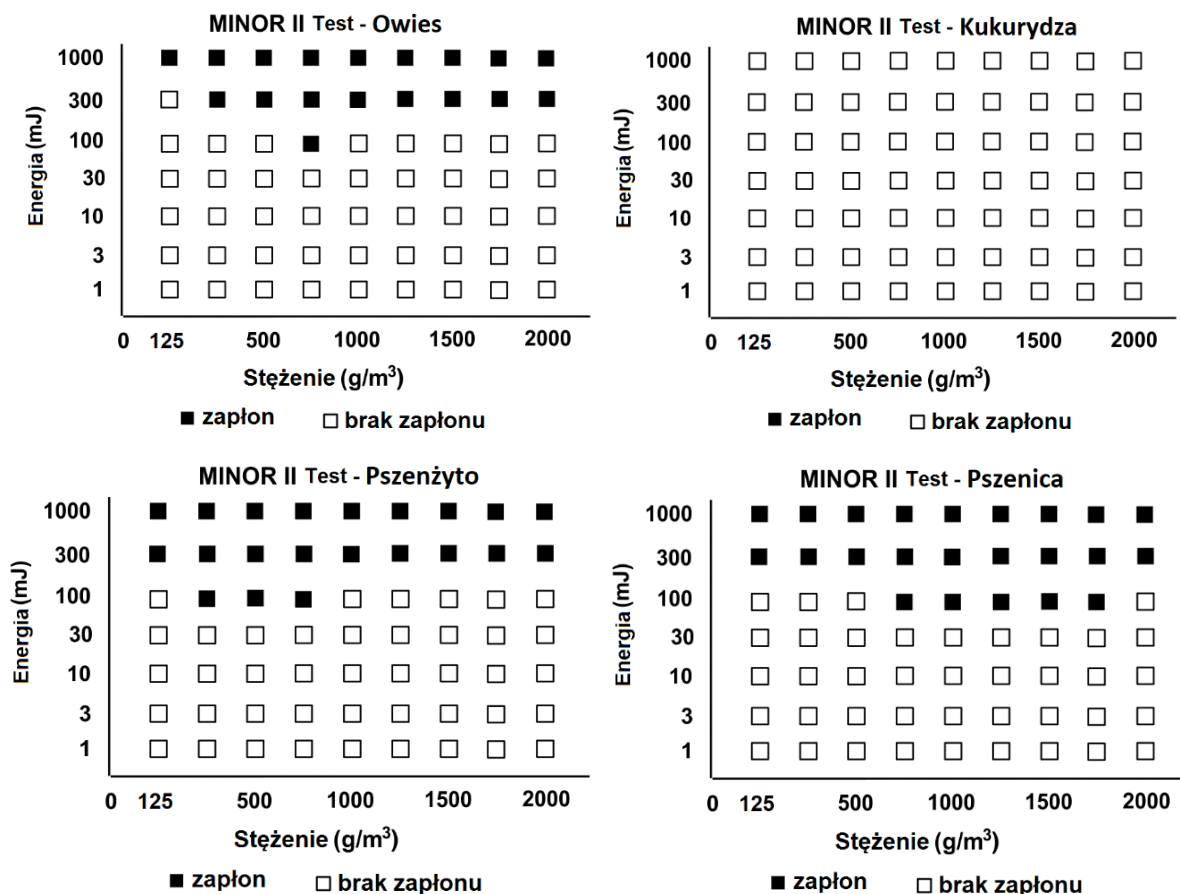
Mieszanka	K_{ST}	GST
	bar · m/s	%
Mieszanka 1	5	16
Mieszanka 2	4	15
Mieszanka 3	4	14
Mieszanka 4	5	14

Analizując wyniki granicznego stężenia tlenu, można stwierdzić, że wartości, przy których nie następuje wybuch, są identyczne dla mieszanek paszowych 3 i 4. W przypadku mieszanki 1 GST wynosiło 16%, a w przypadku mieszanki 2 uzyskano wynik 15%. Zawarty tlen jest czynnikiem, który sprzyja zwiększeniu propagacji płomienia podczas pożaru lub wybuchu. Z tej właśnie przyczyny

bardzo ważne staje się obniżenie zawartości tlenu w mieszaninie, ponieważ poniżej granicznego stężenia tlenu mieszanina substancji palnej z powietrzem nie generuje takiej ilości ciepła, jaka mogłaby spowodować pożar.

2.4. Wyniki badań z wykorzystaniem aparatu MINOR 2

Wartości minimalnej energii zapłonu uzyskane w efekcie badań prowadzonych dla zbóż z wykorzystaniem aparatu MINOR 2 przedstawiono na rysunku 3.

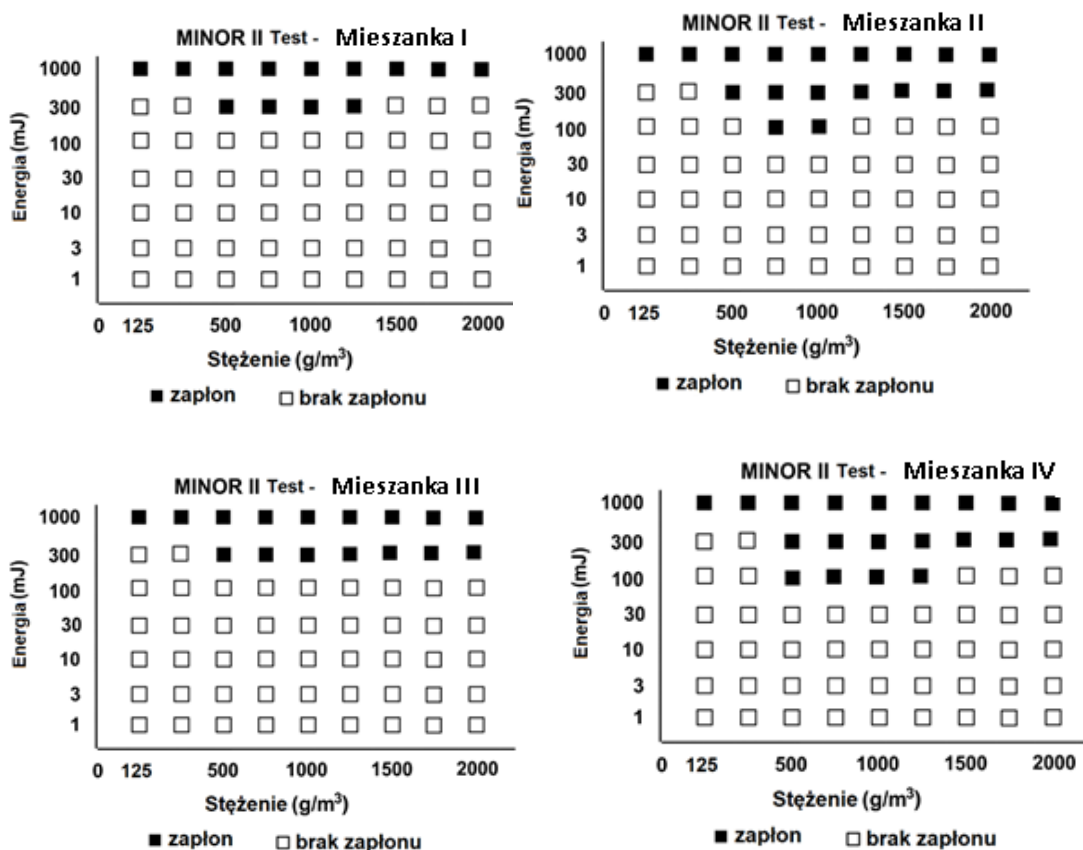


Rys. 3. Wyniki pomiarów minimalnej energii zapłonu (MEZ) badanych pyłów [źródło: opracowanie własne]

Analizując uzyskane wyniki, można stwierdzić, że minimalna energia zapłonu dla pszenicy, pszenżyta i owsa wynosi 100 mJ, dalsze obniżanie energii iskry, szczególnie w zakresach stężeń pyłu 250-1000 g/m³, nie spowodowało zapłonu w trakcie dziesięciu następujących po sobie prób badawczych. Wyjątek stanowi pył kukurydzy, dla którego minimalna energia zapłonu wykracza poza maksymalną wartość testową, tj. 1000 mJ, co oznacza, że w całym zakresie badawczym pył

ten nie ulegał zapłonowi. Warto zauważyć, że w przypadku pyłu pszenicy zakres stężeń, w którym dochodziło do zapłonu, jest znacznie szerszy niż w przypadku pozostałych dwóch zbóż, dla których wartości MEZ, choć tożsame z wartością uzyskaną dla pszenicy, ujawniają się w znacznie węższym zakresie stężeń.

Wartości minimalnej energii zapłonu uzyskane w efekcie badań prowadzonych dla zbóż z wykorzystaniem aparatu MINOR 2 przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wyniki pomiarów minimalnej energii zapłonu (MEZ) badanych mieszanek [źródło: opracowanie własne]

Minimalna energia zapłonu dla mieszanek 2 i 4, w których udział pszenicy, pszenżyta i owsa jest największy, wynosi 100 mJ, a dalsze obniżanie energii iskry, szczególnie w zakresach stężeń pyłu 1000-2000 g/m³, nie spowodowało zapłonu w trakcie dziesięciu następujących po sobie prób badawczych. W przypadku mieszanek z dodatkiem kukurydzy minimalna energia zapłonu wynosi 300 mJ.

3. Wnioski

W celu uzyskania reprezentatywnej frakcji pyłu do badań ziarna zbóż zostały przemielone na drobną frakcję przy użyciu młynka sitowego. Następnie uzyskany pył poddano analizie sitowej. Do badań wybuchowości wybrano pyły o dwóch stopniach gradacji i zmieszano je ze sobą w równych proporcjach. Do badań w drugiej części wykorzystano mieszanki paszowe wykorzystywane w praktyce przemysłowej. Przygotowano mieszanki:

1. Kukurydza (25%) + pszenżyto (25%) + pszenica (25%) + owies (25%),
2. Owies (50%) + pszenżyto (50%),
3. Owies (60%) + pszenżyto (20%) + kukurydza (20%),
4. Pszenica (75%) + pszenżyto (25%).

W celu określenia morfologii i kształtu cząstek uzyskanych wskutek mielenia ziaren owsa, pszenicy, pszenżyta i kukurydzy wykorzystano do analizy skaningowy mikroskop elektronowy (SEM). Z analizy fotografii SEM zmielonego ziarna owsa wynika, że cząstki mają w zdecydowanej przewadze kształt globularny oraz włóknisty.

Zgodnie z ogólnie przyjętymi kryteriami wszystkie badane pyły oraz mieszanki wykazują tożsame charakterystyki wybuchu: klasę ST1. Warto jednak zauważyć, że wybuch pyłów kukurydzy charakteryzuje się znacznie mniejszą szybkością przyrostu ciśnienia wybuchu w jednostce czasu niż pozostałe pyły. Indeks deflagacyjny K_{ST} na poziomie 56 bar · m/s oznacza, że szybkość wybuchu osiąga wartość jedynie 8 m/s (~29 km/h), co świadczy o stosunkowo wolnym procesie spalania mieszaniny pyłowo-powietrznej.

Badania DGW wykazały, że najniższa wartość stężenia, dla której pyły badanych substancji w mieszaninie pyłowo-powietrznej mogą stworzyć atmosferę wybuchową, wynosi 125 g/m³. W przypadku mieszanek paszowych wartości te były niższe dla mieszanek 1, 2 oraz 3 (60 g/m³), dla mieszanki 4 wartość ta wyniosła właśnie 125 g/m³.

Analizując uzyskane wyniki, można stwierdzić, że minimalna energia zapłonu dla pszenicy, pszenżyta i owsa wynosi 100 mJ, a dalsze obniżanie energii iskry, szczególnie w zakresach stężeń pyłu 250-1000 g/m³, nie spowodowało zapłonu w trakcie dziesięciu następujących po sobie prób badawczych. Wyjątek stanowi pył kukurydzy, dla którego minimalna energia zapłonu wykracza poza maksymalną wartość testową, tj. 1000 mJ, co oznacza, że w całym zakresie badawczym pył ten nie ulegał zapłonowi. Warto zauważyć, że w przypadku pyłu pszenicy zakres stężeń, w którym dochodziło do zapłonu, jest znacznie szerszy niż w przypadku pozostałych dwóch zbóż, dla których

wartości MEZ, choć tożsame z wartością uzyskaną dla pszenicy, ujawniają się w znacznie węższym zakresie stężeń.

W przypadku pomiarów mieszanek paszowych minimalna energia zapłonu, dla mieszanek 2 i 4, w których udział pszenicy, pszenżyta i owsa jest największy, wynosi 100 mJ, a dalsze obniżanie energii iskry, szczególnie w zakresach stężeń pyłu 1000-2000 g/m³, nie spowodowało zapłonu w trakcie dziesięciu następujących po sobie prób badawczych. W przypadku mieszanek z dodatkiem kukurydzy minimalna energia zapłonu jest wyższa i wynosi 300 mJ. Wynika to z faktu, że pył kukurydzy jest relatywnie ciężki i zawiera w sobie tłuszcz, który powoduje sklejanie się ze sobą cząstek podczas rozpylania, co zmniejsza podatność na zapłon.

4. Bibliografia

- [1] Cloney C., 2017 Combustible Dust Incident Report – Version 1, 2018.
- [2] Klemens R.H., Mechanizm propagacji i struktura płomienia w mieszaninach pyłowo-powietrznych i hybrydowych, Warszawa, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1993.
- [3] Veysiere B., Development and propagation regimes of dust explosions, Powder Technology, 71, 1992, 171.
- [4] CNBOP-PIB BW02P:2016 Pyły palne – przegląd podstawowych parametrów wybuchowości i zapalności oraz metod badawczych.
- [5] Prusiel A., Łapko A., Przeciwdziałanie wybuchom pyłów materiałów sypkich składowanych w silosach, Inżynier Budownictwa, 2(92), 2012, 68-71.
- [6] Rozporządzenie ministra gospodarki z dnia 8 lipca 2010 r. w sprawie minimalnych wymagań, dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy, związanych z możliwością wystąpienia w miejscu pracy atmosfery wybuchowej (Dz. U. z 2010 r., Nr 138, poz. 931).
- [7] Toman W., Parametry palności i wybuchowości pyłów biomasy stosowanej w elektrowniach ciepłych, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach, 1(9), 2013, 83-96.
- [8] Romaniuk W., Majchrzak M., Przygotowanie i zadawanie pasz treściwych i objętościowych oraz sposoby ich magazynowania w gospodarstwach rodzinnych i farmerskich, Falenty, Wydawnictwo Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego 2013.
- [9] Dustex Research, 2018 mid-year Combustible Dust Incident Report.
- [10] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. Report No. 2008-05-I-GA, 2009.

- [11] ISO 5660 (2002) Reaction to fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Rate of heat release from building products. Part 2: Smoke production rate (dynamic measurements) – Cone calorimeter method.
- [12] PN-EN 14034-1+A1:2011 Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu – Część 1: Oznaczanie maksymalnego ciśnienia wybuchu p_{max} obłoków pyłu.
- [13] PN-EN 13821:2004 Przestrzenie zagrożone wybuchem – Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem – Oznaczanie minimalnej energii zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych.
- [14] Piotrowski T., Gałęziowski C., Pomiar minimalnej energii zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych za pomocą aparatu Mike 3, Przemysł Chemiczny 79(7), 2000, 25-28.
- [15] PN-E-05201:1992 Ochrona przed elektrycznością statyczną – Metody oceny zagrożeń wywołanych elektryzacją materiałów dielektrycznych stałych – Metody oceny zagrożenia pożarowego i/lub wybuchowego.
- [16] De Graef M., Introduction to Conventional Transmission Electron Microscopy, Cambridge University Press 2003.
- [17] Williams D.B., Carter C.B., The Transmission Electron Microscope: A Textbook for Materials Science, Springer 2009.