

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)

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

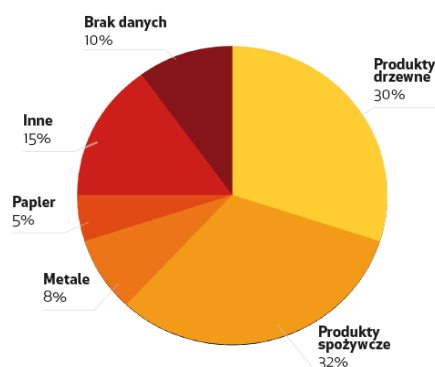
Maciej Celiński

Michał Gloc

NC-4

1. Wprowadzenie

Większość pyłów przemysłowych przy odpowiednim rozdrobnieniu i koncentracji w powietrzu oraz odpowiednim źródle zapłonu może tworzyć atmosfery wybuchowe. Wybuchy pyłów stanowią poważny 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 [1]

W celu klasyfikacji pyłów i oceny zagrożenia wybuchem stworzono szereg znormalizowanych metod badawczych, jednak podstawową, najczęściej spotykaną klasyfikację pyłów określającą stopień zagrożenia wybuchem przedstawiono w tabeli 1. Opiera się ona na stałej pyłowej K_{st} .

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 przez palne gazy, pary palnych cieczy, pyły lub włókna palnych ciał stałych, w różnych warunkach, 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 w tym samym miejscu i czasie odpowiednio silny bodziec energetyczny. Wskazanie potencjalnych źródeł zapłonu i ich efektywności jest pierwszym etapem działań. Największym problemem przy ocenianiu ryzyka wybuchu jest umiejętność przyporządkowania 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 oraz w zakresie stężenia pomiędzy dolną i 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 z powietrzem. W przypadku kiedy osiągnięty zostanie odpowiedni stopień dyspersji substancji palnej, jak również w przypadku, gdy stężenie tej substancji zawierać się będzie w zakresie pomiędzy granicami wybuchowości, to wówczas należy przyjąć, że występuje w tych warunkach atmosfera wybuchowa. Jest to mieszanina substancji palnych w postaci gazów, par, mgieł lub pyłów z powietrzem o charakterystyce odpowiadającej warunkom atmosferycznym,

w której po wystąpieniu zapłonu spalanie rozprzestrzenia się na całą niespaloną mieszaninę [2,3].

Wytwarzanie mieszanek paszowych wiąże się z mieszaniem ziaren zbóż w procesie ich łączenia, a następnie mieszanki takie są magazynowane w silosach. Stosowanie silosów do magazynowania oraz procesy transportu lub mieszania sypkich zbóż 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 lub mniejszym $500\ \mu\text{m}$, 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.

Mieszaniny powietrze – pył palny stanowią bardzo silną atmosferę wybuchową. Wiele materiałów, które są trudno palne, w przypadku ich rozdrobnienia tworzy z powietrzem groźne mieszaniny, które mogą ulec zapaleniu i wybuchowi. Za palny pył uważa się ziarna materiału palnego lub trudnopalnego o wymiarze równym lub mniejszym $500\ \mu\text{m}$, 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 do gwałtownej reakcji spalania jest mała [5,6].

Wykonanie badania charakterystyk wybuchowości mieszanin pyłowo–powietrznych stanowi podstawowe kryterium w zakresie projektowania oraz prawidłowego doboru innowacyjnych systemów zabezpieczeń przed wybuchem, w tym przede wszystkim takich metod zapobiegania jak odciążanie wybuchów, tłumienie wybuchów, czy izolacja wybuchów [4]. Do prawidłowego doboru tych metod zapobiegania konieczne jest poznanie najważniejszych właściwości wybuchowych pyłów palnych występujących w zakładach przemysłowych, w tym przede wszystkim:

- maksymalne ciśnienie wybuchu – P_{max} ,
- dolna granica wybuchowości – DGW,
- klasa wybuchowości pyłu – indeks deflagacyjny K_{ST} ,
- graniczne stężenie tlenu – GST,

- minimalna energia 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 jest od m.in. stężeniu pyłu, stężenia tlenu, stopnia rozdrobnienia materiału i jego składu chemicznego.

Granice wybuchowości

Mieszanina pyłowo-powietrzna jest wybuchowa jedynie w granicach odpowiedniego zakresu stężeń tzw. granic 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} jest wykorzystywany 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/wybuchu. Z tej właśnie przyczyny bardzo ważne staje się

obniżenie zawartości tlenu w mieszaninie z tego względu, że poniżej granicznego stężenia tlenu mieszanina substancji palnej z powietrzem nie generuje takiej ilości ciepła, która 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 zapobieganiu tworzenia się mieszaniny wybuchowej poprzez rozcieńczanie jej gazem obojętnym. Pomiary polegają 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. Definiowana jest jako najmniejsza energia, która jest wystarczająca do spowodowania zapłonu najłatwiej zapalnej atmosfery wybuchowej w określonych warunkach badania. Minimalna energia zapłonu mieszaniny pyłowo - powietrznej jest jednym 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 ulega zmniejszeniu wraz ze zmniejszeniem rozmiaru cząstek pyłu oraz wraz ze zwiększeniem zawartości części lotnych i stężenia tlenu, jak również ulega zwiększeniu wraz ze wzrostem zawartości wilgoci.

2. Badanie charakterystyk wybuchu mieszanek paszowych

Ze względu na specyfikę badań prowadzonych w ramach projektu tj. badanie palności i charakterystyka 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, pszenice i kukurydze. 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 uzyskano poprzez mechaniczne zmieszanie ziaren zbóż w odpowiednich proporcjach. Uzyskano mieszanki paszowe w następującej kompozycji, przedstawione w tabeli 2.

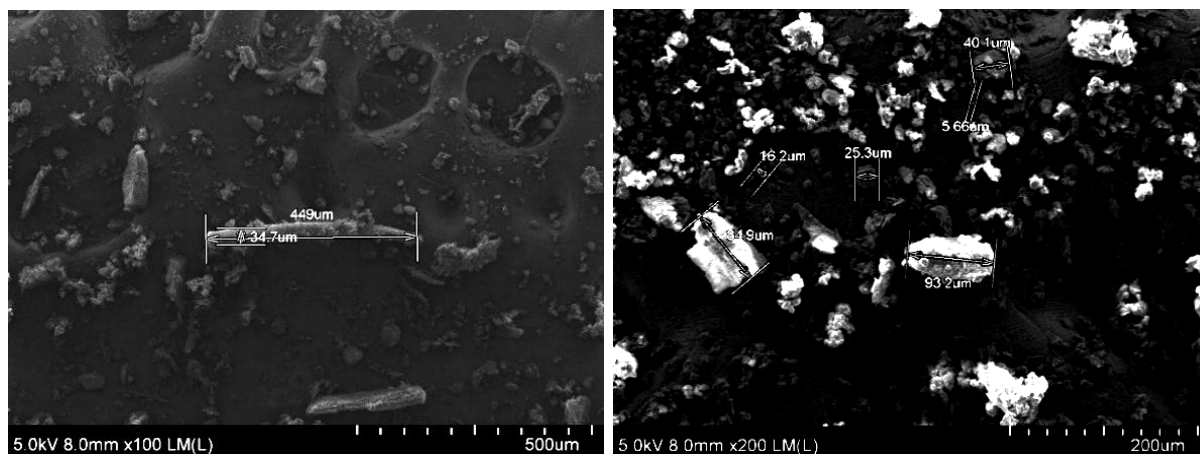
Tabela 2 Procentowy udział ziaren zbóż w przygotowanych mieszankach paszowych

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

W celu określenia morfologii i kształtu cząstek uzyskanych w skutek mielenia ziaren owsa, pszenicy, pszenżyta i kukurydzy a także uzyskanych mieszanek paszowych 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. Pomimo zastosowania sita o otworach 200 μm obserwowane były wydłużone ziarna włókniste, w których jeden wymiar przekraczał wartości 200 μm , przykładowe obraz zarejestrowany dla ziaren owsa po procesie mielenia został przedstawiony na rysunku 3.



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/m³).

Na podstawie uzyskanych wyników przydzielono poszczególne pyły do klas wybuchowości według OSHA (Occupational Safety and Health Administration) zestawiono 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
Pszenżyto	7,5	134	ST1	125
Kukurydza	6,4	52	ST1	125
Owies	7,6	123	ST1	125

W efekcie 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, klasa 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 52bar·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} bar	K_{ST} bar · m/s	Klasa ST -	DGW 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

W efekcie analizy parametrów opisujących charakterystykę wybuch mieszanek zbożowych, można wywnioskować, że zgodnie z ogólnie przyjętymi kryteriami wszystkie badane pyły wykazują tożsame charakterystyki wybuchu, klasa ST1. Warto zauważyć, że wybuch mieszanki I zawierającej kukurydze (25%) + pszenżyto (25%) + pszenice (25%) + owies (25%) charakteryzuje się mniejszą szybkością przyrostu ciśnienia wybuchu w jednostce czasu niż pozostałe pyły. Indeks deflagacyjny K_{ST} na poziomie odpowiednio 114bar·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 II (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

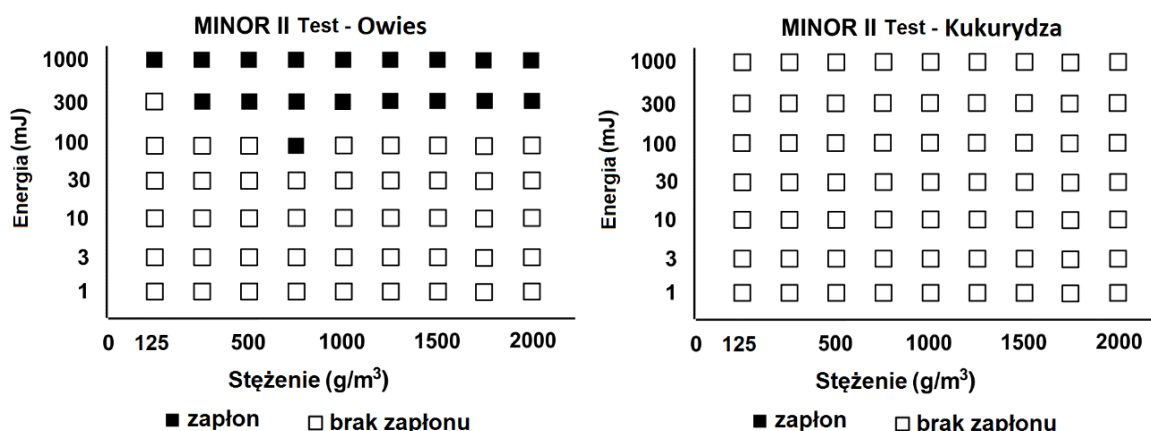
Tabela 5. Charakterystyka wybuchu dla granicznego stężenia tlenu GST

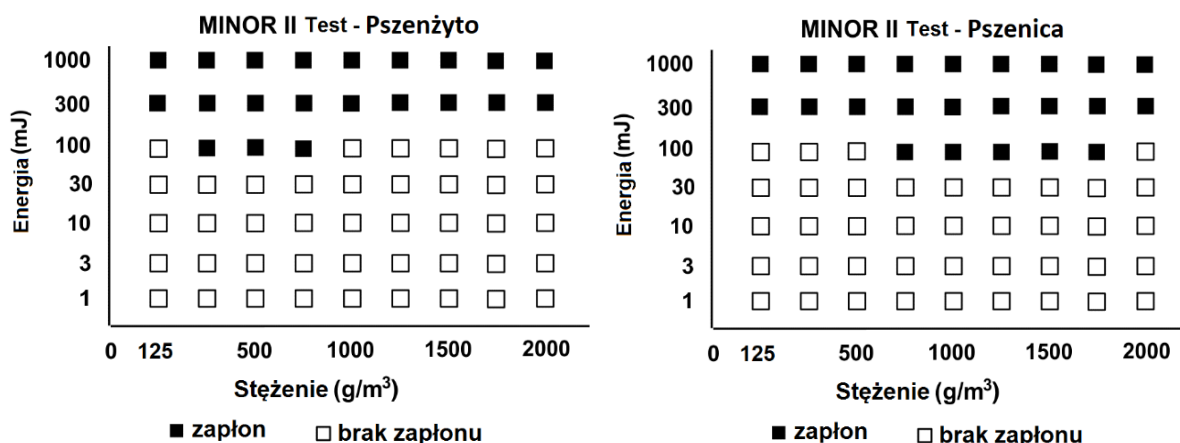
Mieszanka	K _{ST}	GST
	bar · m/s	%
Mieszanka I	5	16
Mieszanka II	4	15
Mieszanka III	4	14
Mieszanka IV	5	14

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/wybuchu. Z tej właśnie przyczyny bardzo ważne staje się obniżenie zawartości tlenu w mieszaninie z tego względu, że poniżej granicznego stężenia tlenu mieszanina substancji palnej z powietrzem nie generuje takiej ilości ciepła, która 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 11.

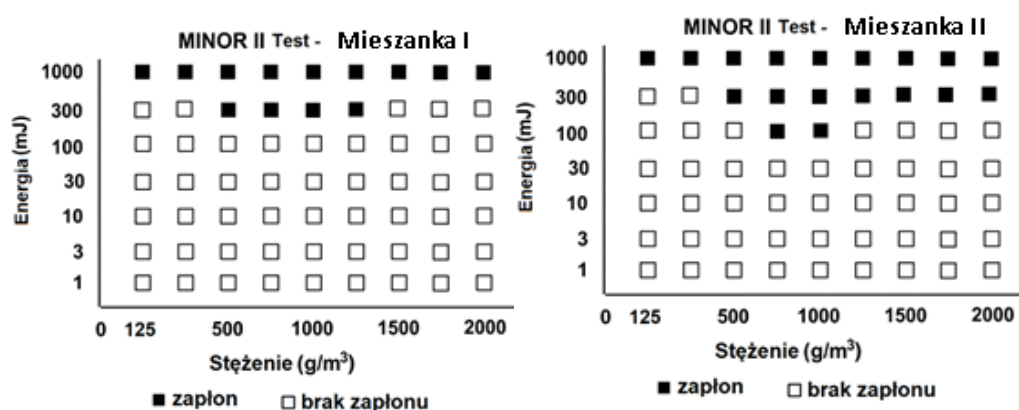


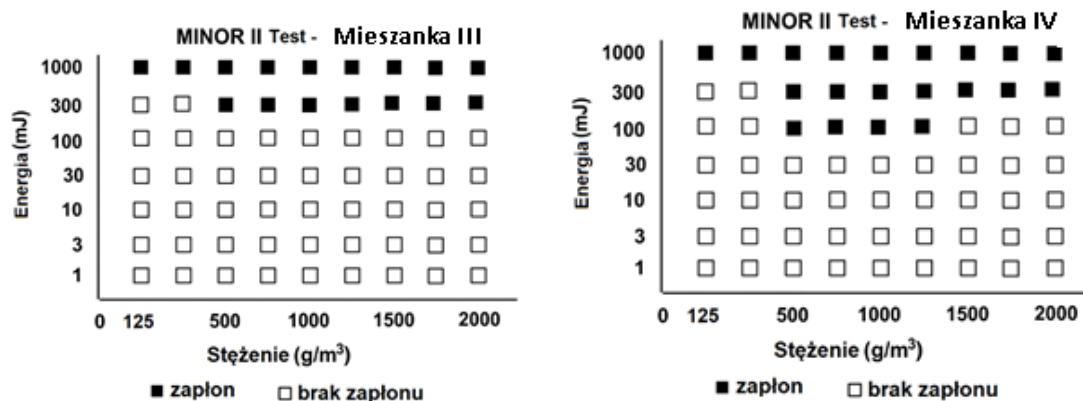


Rys. 11. Wyniki pomiarów minimalnej energii zapłonu (MEZ) badanych pyłów

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 rys 12.





Rys.12. Wyniki pomiarów minimalnej energii zapłonu (MEZ) badanych mieszanek

Minimalna energia zapłonu, dla mieszanek II i IV, 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 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 w skutek mielenia ziaren owsa, pszenicy, pszenżyta i kukurydzy i stworzonych później mieszanek, wykorzystano do analizy skaningowy mikroskop elektronowy (SEM). Pod wpływem wiązki elektronów 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.

Zgodnie z ogólnie przyjętymi kryteriami wszystkie badane pyły oraz mieszanki wykazują tożsame charakterystyki wybuchu, klasa 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 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 I, II oraz III (60g/m³) oraz 125g/m³ dla mieszanki IV.

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 II i IV, 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, Chris 2018 “2017 Combustible Dust Incident Report – Version #1”
- [2] Klemens R.H., Mechanizm propagacji i struktura płomienia w mieszaninach pyłowo-powietrznych i hybrydowych, Warszawa, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1993.
- [3] Veyssiere B., Development and propagation regimes of dust explosions, Powder Technology, Vol. 71, 1992, s. 171.
- [4] Ochrona przeciwpożarowa CNBOP-PIB-BW02P:2016 „Pyły palne przegląd podstawowych parametrów wybuchowości i zapalności oraz metod badawczych „
- [5] Klemens R.H., Mechanizm propagacji i struktura płomienia w mieszaninach pyłowo-powietrznych i hybrydowych, Warszawa, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1993.
- [6] Veyssiere B., Development and propagation regimes of dust explosions, Powder Technology, Vol. 71, 1992, s. 171.
- [7] A. Prusiel, A. Łapko „Przeciwdziałanie wybuchom pyłów materiałów sypkich składowanych w silosach”, Inżynier budownictwa, 2012.
- [8] 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 (Dziennik Ustaw z 2010 r. Nr 138 poz. 931)
- [9] W. Toman „Parametry palności i wybuchowości pyłów biomasy stosowanej w elektrowniach ciepłych” Zeszyty naukowe wyższej szkoły zarządzania ochroną pracy w Katowicach, nr 1, 2013 r.
- [10] Waclaw Romaniuk, Marcin Majchrzak, „Przygotowanie i zadawanie pasz treściwych i objętościowych oraz sposoby ich magazynowania w gospodarstwach rodzinnych i farmerskich”
- [11] Dustex Research, LTD. “2018 mid-year Combustible Dust Incident Report”
- [12] U.S chemical safety and hazard investigation board investigation report report no. 2008-05-i-gaseptember 2009 sugar dust explosion and fire „Report No. 2008-05-I-GA September 2009”
- [13] 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

[14] PN-EN 14034-1+A1:2011, Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu --
Część 1: Oznaczanie maksymalnego ciśnienia wybuchu p_{max} obłoków pyłu

[15] PN-EN 13821:2004 Przestrzenie zagrożone wybuchem -- Zapobieganie wybuchowi i
ochrona przed wybuchem -- Oznaczanie minimalnej energii zapłonu mieszanin pyłowo-
powietrznych

[16] T.Piotrowski C. Gałęziewski „Pomiary minimalnej energii zapłonu mieszanin pyłowo-
powietrznych za pomocą aparatu Mike 3” Przemysł chemiczny vol.79/7, 2000r.

[17] PN-E-05201:1992 Ochrona przed Elektrycznością Statyczną. Metody oceny zagrożeń
wywołanych elektryzacją materiałów dielektrycznych stałych. Metody oceny zagrożenia
pożarowego i/lub wybuchowego

[18] M. de Graef “Introduction to conventional transmission electron microscopy” Cambridge
University Press 2003 r.

[19] D.B. Williams, C.B. Carter “The Transmission Electron Microscope: A Textbook for
Materials Science”, Springer 2009 r.

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

Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy