

dr inż. MACIEJ CELIŃSKI

dr AGNIESZKA GAJEK

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

dr inż. MICHAŁ GLOC

Politechnika Warszawska – Wydział Inżynierii Materiałowej

Kontakt: macel@ciop.pl

DOI: 10.5604/01.3001.0013.1051

Właściwości pożarowe i wybuchowe surowców roślinnych stosowanych w produkcji mieszanek paszowych

Fot. R.Gtimeline/Bigstockphoto



Niezwykle duża skala przetwórstwa zboża powoduje, że ryzyko wystąpienia incydentów związanych z zapłonem oraz wybuchem pyłu jest bardzo duże. Tylko w 2018 roku doszło do wielu wybuchów związanych z magazynowaniem i transportem roślinnych materiałów sypkich, z których największy miał miejsce w maju w miejscowości South Sioux City w stanie Nebraska (USA). Polska jest jednym z największych producentów zbóż w Europie i jednym z większych w skali światowej. Roczna produkcja zboża w Polsce to ok. 35 mln ton, w tym ok. 10 mln ton pszenicy, 5 mln ton pszenżyta, 4 mln ton jęczmienia i 1,5 mln ton owsa. Taka ilość materiału zbożowego powoduje, że istnieje duże prawdopodobieństwo awarii w trakcie procesu magazynowania, transportu i przetwarzania.

Spośród wszystkich wybuchów pyłów blisko 25% stanowią eksplozje pyłów w przemyśle spożywczo-rolniczym i paszowym, przy czym najbardziej narażone na eksplozje są silosy, systemy odpylające i wentylacyjne (w tym suszarnie i magazyny przeznaczone do suszenia zbóż). W październiku 2013 r. doszło w Terminalu Masowym w Gdańsku do wybuchu i pożaru w silosie zbożowym. Akcja ratownicza trwała blisko 4 godziny, spaleni uległo ok. 10 ton zboża (20% całkowitej ilości składowanego materiału zbożowego). W artykule opisano wyniki badań dotyczących zjawiska palności i wybuchowości pyłów przemysłowych dotyczących czterech najpopularniejszych w Polsce ziaren zbóż.

Słowa kluczowe: zboża, pył, silos, wybuchowość, minimalna energia zapłonu, ładunek elektrostatyczny

Fire and explosive properties of plant materials used in the production of compound feed

Extremely large scale of grain processing leads to a very high risk of incidents related to fire or dust explosion. Only in 2018 there were several outbreaks associated with the storage and transport of grain materials, the largest of which took place in May in South Sioux City, Nebraska.

Poland is one of the largest grain producers in Europe and in the world. The annual grain production in Poland is about 35 million tons, including about 10 million tons of wheat, 5 million tons of triticale, 4 million tons of barley and 1.5 million tons of oats. Such an amount of grain material means that there is a high probability of failure during the storage processes (i.e. drying, pouring), transport and processing. Current research shows that of all dust explosions, those related to the food-agricultural and fodder industry account for nearly 25%. The most vulnerable are silos, dedusting and ventilation systems (including dryers and warehouses for drying grains). In October 2013, in the BulkTerminal in Gdańsk, there was an explosion and fire in a grain silo. The rescue operation lasted nearly 4 hours and about 10 tons of grain have burned (20% of the total stored grain material). The purpose of this article is to describe the results of research on the phenomenon of flammability and explosibility of industrial dusts on the four most popular grains in Poland.

Keywords: grain, dust, silo, explosibility, lowest explosion limit, electrostatic discharge

Wstęp

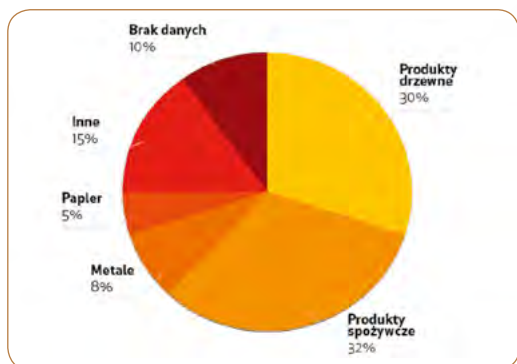
Niezwykle duża skala przetwórstwa zboża powoduje, że ryzyko wystąpienia incydentów związanych z zapłonem oraz wybuchem pyłu jest bardzo duże. Tylko w 2018 r. doszło do szeregu wybuchów związanych z magazynowaniem i transportem roślinnych materiałów sypkich, z których największy miał miejsce w maju w miejscowości South Sioux City w USA [1].

Polska jest jednym z największych producentów zbóż w Europie i jednym z większych na świecie. Zgodnie z wstępnymi danymi GUS za 2018 r.¹ roczna produkcja zboża wynosi w naszym kraju ok. 27 mln ton, w tym ok. 10 mln ton pszenicy i 4 mln ton pszenżyta. Powoduje to, że istnieje duże prawdopodobieństwo awarii w trakcie procesu magazynowania (podczas suszenia, przesypywania), transportu i przetwarzania.

Z dotychczasowych badań wynika, że spośród wszystkich wybuchów pyłów blisko 25% stanowią eksplozje pyłów w przemyśle spożywczo-rolniczym i paszowym, przy czym najbardziej narażone na eksplozje są silosy, systemy odpylające i wentylacyjne (w tym suszarnie i magazyny przeznaczone do suszenia zbóż), [2]. W październiku 2013 r. doszło w Gdańskim Terminalu Masowym do wybuchu i pożaru w silosie zbożowym. Akcja ratownicza trwała blisko 4 godziny, spaleni uległo ok. 10 ton zboża (20% całkowitej składowanej ilości).

W artykule przedstawiono opis wyników badań dotyczących zjawiska palności i wybuchowości pyłów przemysłowych dotyczących czterech najpopularniejszych w Polsce ziaren zbóż.

¹ <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/rolnictwo-lesnictwo/uprawy-rolne-i-ogrodnicze/wstepny-szacunek-glownych-ziemniopodow-rolnych-i-ogrodniczych-w-2018-roku,3,12.html>



Rys. 1. Procentowy rozkład pyłów biorących udział w wybuchach [3]
Fig. 1. Percentage distribution of dusts involved in explosions [3]

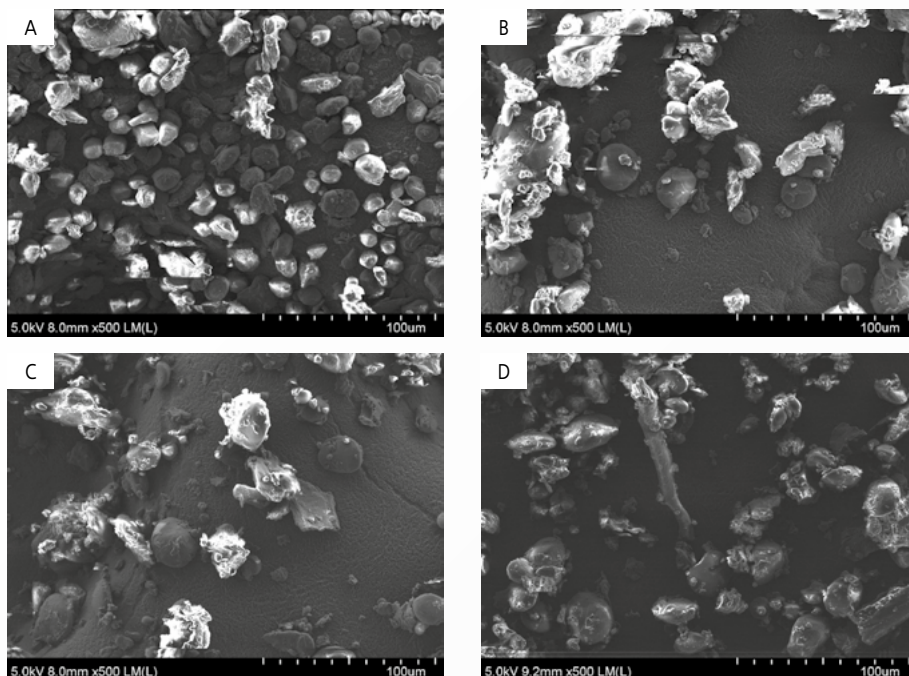
Wybuchowość i palność pyłów przemysłowych

Większość pyłów przemysłowych przy odpowiednim rozdrobnieniu i stężeniu w powietrzu oraz źródle zapłonu może tworzyć atmosfery palne i wybuchowe. Dotyczy to również pyłów powstałych w procesach otrzymywania i obróbki ziaren zbóż i pasz rolniczych. Do pyłów przemysłowych palnych zalicza się m.in. pyły pochodzenia organicznego, np. pyły drewna, węgla, produktów żywnościowych (mąki, cukru). Procentowy udział poszczególnych pyłów palnych, najczęściej ulegających zapaleniu w praktyce przemysłowej przedstawiono na rys. 1.

Wiele materiałów, które powszechnie uważane są za trudno palne, w przypadku rozdrobnienia tworzy z powietrzem groźne mieszaniny, które mogą ulec zapłonowi i wybuchowi. Za palny pył uważa się ziarna materiału palnego lub trudno palnego o wymiarze równym lub mniejszym 500 μm, który 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 potencjalne zagrożenie, lecz ich podatność na gwałtowną reakcję spalania jest mniejsza i uzależniona od rozmiaru ziarna [4,5].

W Polsce i na świecie od wielu lat notuje się przypadki zniszczeń, wywołanych nagłym zapłonem pyłów, powstających w trakcie otrzymywania i obróbki zbóż. Poznanie właściwości wybuchowych mieszanin pyłów ziaren zbóż z powietrzem ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia właściwego poziomu bezpieczeństwa w procesach mielenia, zasypywania i opróżniania silosów magazynujących.

Proces mieszania pasz decyduje – obok dozowania – o wartości ich mieszanek. Proces mieszania materiałów ziarnistych i sypkich jest relatywnie łatwy, a na końcowy produkt i jego jakość ma wpływ wiele zmiennych czynników: gęstość, stopień rozdrobnienia, naturalny kąt usypu, wilgotność mieszanych komponentów. Stosowanie silosów do magazynowania oraz procesów mieszania sypkich zbóż może powodować zagrożenia pożarowe i wybuchowe,



Rys. 2. Fotografie SEM ziaren po procesie mielenia: A-kukurydza; B-owies; C-pszenica; D-pszenżyto
Fig. 2. SEM graphic representation of grains after the grinding process: A-corn; B-oats; C-wheat; D-triticale

wynikające z dużej podatności rozdrobnionej masy organicznej na zapłon.

Wyniki badań własnych

Zbadanie charakterystyk wybuchowości mieszanin pyłowo-powietrznych stanowi podstawowe kryterium w projektowaniu oraz prawidłowym doborze systemów zabezpieczeń przed wybuchem, w tym przede wszystkim takich metod zapobiegania, jak odciążanie, tłumienie czy izolacja wybuchów [6]. Do prawidłowego doboru tych metod zapobiegania konieczne jest poznanie najważniejszych właściwości wybuchowych pyłów przemysłowych palnych, w tym przede wszystkim określenie klasy wybuchowości pyłu na podstawie indeksu deflagacyjnego K_{st} .

Klasyfikację pyłów, określającą stopień zagrożenia wybuchem, przedstawiono w tab. 1. Opiera się ona na indeksie deflagacyjnym K_{st} [7].

Tabela 1. Klasy wybuchowości na podstawie parametru KST
Table 1. Explosibility classes based on KST parameter

Klasa zagrożenia	K_{st} (m ² bar/s)	Zagrożenie
ST0	0	niewybuchowy
ST1	1-200	słabo wybuchowy
ST2	201-300	silnie wybuchowy
ST3	>300	bardzo silnie wybuchowy

Materiały

Do badań wykorzystano cztery rodzaje najpopularniejszych ziaren zbóż, czyli łuskane ziarna owsa, pszenżyta, pszenicy i kukurydzy, które zmielono przy użyciu młynka sitowego, w wyniku czego uzyskano frakcję około 200 μm.

Zainstalowane łatwo wymienne sito wokół wirnika pozwalało ujednorodnić przemiał i uzyskać odpowiedni stopień rozdrobnienia. Następnie wykonano frakcjonowanie ziaren na sitach wibracyjnych w celu odseparowania drobnego pyłu. Do badania wybrano pyły o wielkości ziaren mniejszych niż 72 μm. Taka wielkość ziarna odpowiada pyłom unoszącym się podczas przeróbki mechanicznej ziaren oraz pyłom, które osadzają się na powierzchniach i mogą stanowić potencjalne zagrożenie pożarowe lub powodować powstawanie atmosfery wybuchowej.

Zmielony pył poddany został obserwacji z wykorzystaniem wysoko rozdzielczego, skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Obserwacje prowadzono na próbkach zmielnego i przesianego pyłu. Przykładowe fotografie obserwowanych ziaren przedstawiono na rys. 2.

Z analizy fotografii SEM zmielonych ziaren kukurydzy, owsa, pszenicy i pszenżyta wynika, że cząstki mają w zdecydowanej przewadze kształt globularny oraz włóknisty. Pomimo zastosowania sita o otworach 200 μm obserwowane były wydłużone ziarna włókniste powyżej wartości 200 μm.

Badanie palności

W wyniku pomiarów uzyskano wartości wyznaczonych wielkości charakteryzujących zachowanie się materiałów pod wpływem intensywnego promieniowania cieplnego. Szybkość wydzielania ciepła (HRR) jest kluczowym parametrem, potrzebnym do oceny zagrożenia pożarowego, które stanowią badane materiały i produkty ich rozkładu. Parametr ten pozwala ustalić wielkość pożaru, tempo jego wzrostu oraz, w konsekwencji, ilość i jakość uwalnianego dymu.

Tabela 2. Zestawienie parametrów kalorymetrycznych badanych zbóż
Table 2. Comparison of calorimetric parameters of the investigated cereals

Próbka	czas zapłonu	średnia HRR	maksymalna HRR	całkowita ilość wydzielonego ciepła	całkowita ilość wydzielonego dymu
	s	kW/m ²	kW/m ²	MJ/m ²	m ² /m ²
Pszenica	106	92,9	245	24,6	27,9
Pszennyto	41	86,3	174	22,3	31,2
Kukurydza	48	129	260	60	88,5
Owies	28	94,7	219	26,9	64,1

Tabela 3. Charakterystyka wybuchu
Table 3. Explosion characteristics

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

Średnie wartości wyznaczonych parametrów kalorymetrycznych, opisujących zachowanie się pyłów składników mieszanej paszowych pod wpływem oddziaływania strumienia ciepła (35 kW/m²), o czterech gęstościach zostały zestawione w tab. 2.

Zbożem o najkrótszym czasie zapłonu (28 sekund), jest owies. Na czas zapłonu może mieć wpływ m.in. wilgotność materiału, zawartość tłuszczu. Z kolei największą energetyczność podczas spalania, obliczaną na podstawie całkowitego wydzielonego ciepła wykazuje kukurydza, która jednocześnie osiąga najwyższe wartości parametrów związanych z szybkością wydzielania ciepła i wytwarzania największej ilości dymów. Kukurydza zawiera dużą ilość tłuszczów roślinnych, co ma wpływ zarówno na ilość ciepła, jak i na ilość dymów wydzielanych podczas spalania. Ilość ciepła wydzielonego w trakcie spalania kukurydzy niemal trzykrotnie przekracza wartości uzyskane w odniesieniu do pszenicy oraz pszenżyta. Podobna sytuacja ma miejsce jeśli chodzi o ilość wydzielanych dymów (rys. 3.).

Badania charakterystyki wybuchu i minimalnej energii zapłonu

Przebieg eksplozji charakteryzują dwa parametry: maksymalne ciśnienie wybuchu oraz maksymalna szybkość narastania wybuchu. Opisują one przebieg wybuchu pyłowej atmosfery wybuchowej, natomiast parametr K_{ST} jest podstawą do klasyfikacji pyłu w odniesieniu do jego wybuchowości.

W celu uzyskania porównywalnych wyników badań opracowano znormalizowane metody pomiarów oraz wymagania konstrukcyjne odnoszące się do urządzeń służących do prowadzenia pomiarów. W serii norm PN-EN 14034 przedstawiono założenia do budowy komory badawczej oraz opis metody i kryteria wykonania pomiaru [8]. Założenia do budowy aparatu badawczego MINOR 2, służącego do pomiaru minimalnej energii zapłonu, a także metody i kryteria wykonania

tęgo pomiaru, zawarte są w PN-EN 13821 [9]. Schemat komory i aparatu pokazano na rys. 4.

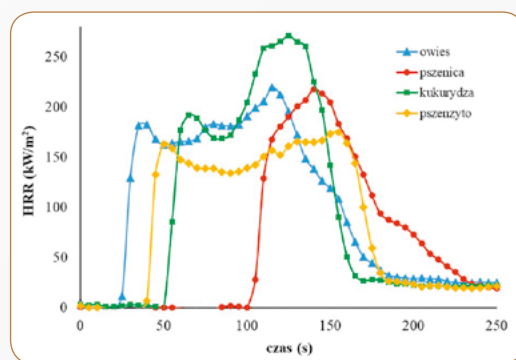
W trakcie badań z wykorzystaniem komory sferycznej o objętości 20 litrów oznaczono następujące parametry:

- maksymalne ciśnienie wybuchu – P_{max} (bar)
- indeks deflagacyjny – K_{ST} (bar · m/s)
- dolna granica wybuchowości pyłu – DGW (g/m³).

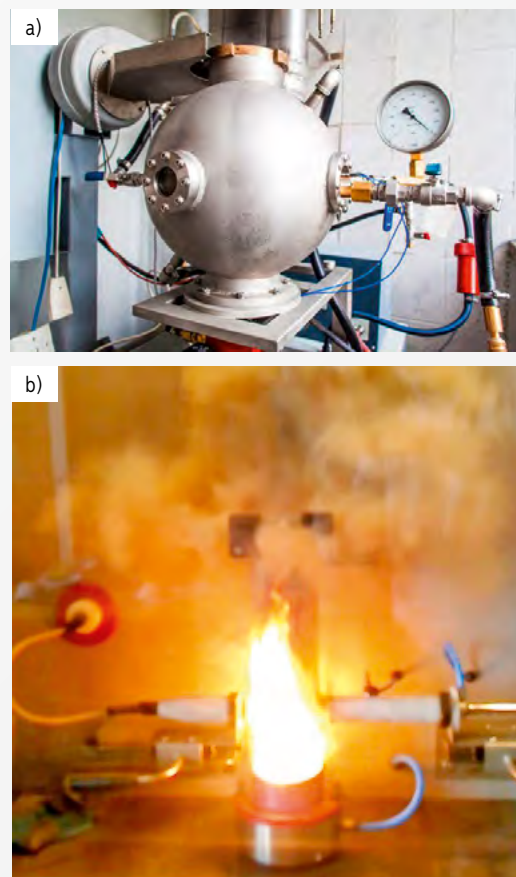
Na podstawie uzyskanych wyników przydzielono poszczególne pyły do klas wybuchowości ST i zestawiono je w tab. 3.

W efekcie analizy uzyskanych parametrów, opisujących charakterystykę wybuchu mieszanin pyłowo-powietrznych pyłów mieszanek zbożowych, można wywnioskować, że zgodnie z ogólnie przyjętymi kryteriami, wszystkie badane pyły wykazują podobne (lub identyczne) charakterystyki wybuchu: klasa ST1. Warto jednak zauważyć, że wybuch kukurydzy charakteryzuje się znacznie mniejszą szybkością przyrostu ciśnienia wybuchu w jednostce czasu niż w pozostałych przypadkach. Parametr K_{ST} na poziomie 56 bar·m/s oznacza, że szybkość propagacji 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 badając owies (7,6 bara). Wysoka wartość ciśnienia wybuchu, podobnie jak duży skok ciśnienia, sugerują możliwość wystąpienia większych szkód w wyniku ewentualnego zdarzenia na terenie zakładu, w szczególności wewnątrz pomieszczeń zamkniętych.

Wartości tzw. minimalnej energii zapłonu, uzyskane w efekcie badań prowadzonych z wykorzystaniem aparatu MINOR 2, dla pszenicy, pszenżyta i owsa mieszczą się w zakresie 30-100 mJ, a dalsze obniżanie energii niezbędnej do zapłonu – szczególnie w zakresach stężeń

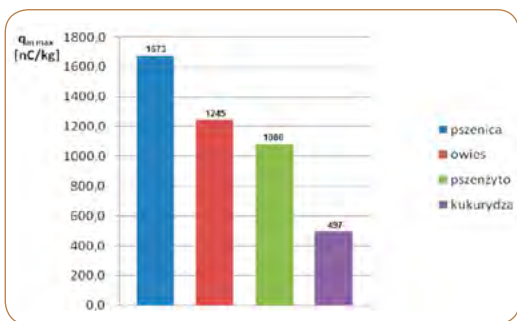


Rys. 3. Zależność szybkości wydzielania ciepła w czasie (HRR) w odniesieniu do badanych składników paszowych
Fig. 3. Dependence of heat release rate in time (HRR) in relation to the tested feed components



Rys. 4. Komora sferyczna (a) i aparat MINOR 2 (b) wykorzystywane podczas badań
Fig. 4. The spherical chamber (a) and the MINOR 2 apparatus (b) used during the tests

pyłu 250-1000 g/m³ – nie spowodowało zapłonu w trakcie dziesięciu następujących po sobie prób badawczych. Wyjątek stanowi pył kukurydzy, którego minimalna energia zapłonu wyniosła 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.



Rys. 5. Maksymalna wartość ładunku elektrostatycznego powstającego podczas zsypania pyłów zbóż po podłożu stalowym (w odniesieniu do masy 1 kg materiału zsypanego)

Fig. 5. Maximum value of the electrostatic discharge generated during the pouring process of grain dust on the steel substrate (in relation to the mass of 1 kg of the chute material)

Przeprowadzono ponadto pomiary stopnia naelektryzowania pyłu na rynnie zsypanej (wg PN-92/E-05201:1992), [10]. Stopień naelektryzowania pozwala określić ilość ładunku elektrycznego, gromadzonego w pyłach zboża w trakcie procesu przesypania. Jest to jedna z najbardziej newralgicznych czynności, w trakcie której bardzo często dochodzi do zapłonu i wybuchu materiału organicznego. Im większa energia jest zgromadzona w pyłach zbożowych, tym większa energia iskry może powstać w wyniku kontaktu pyłu z metalowymi elementami silosa.

Wszystkie pyły zbóż w kontakcie z uziomioną rynną stalową wykazują dodatnią wartość ładunku elektrostatycznego („+”). Wyniki badań pokazano na rys. 5.

Uzyskane wyniki korelują z wynikami uzyskanymi w trakcie badania minimalnej energii zapłonu. Pyły, które są w stanie zgromadzić większą ilość ładunku, zapalały się pod wpływem iskry o niższej energii. Co więcej, w przypadku pszenicy, pyłu o najwyższej wartości rezystywności elektrycznej skośnej oraz najwyższym ładunku generowanym w procesie przesypania, zakres stężeń, w których występuje zapłon, jest dostrzegalnie szerszy, niż w przypadku pozostałych pyłów. Z kolei pył o najniższej rezystywności elektrycznej skośnej (kukurydza), nie uległ zapłonowi podczas badania minimalnej energii zapłonu nawet przy najwyższej energii iskry.

Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań wskazują, że pszenicę można zaliczyć do najmniejbezpieczniejszych zbóż w kontekście transportu i magazynowania. Charakteryzuje się ona przeszło trzykrotnie wyższą wartością ładunku elektrycznego, zgromadzonego podczas procesu przesypania, w porównaniu z kukurydzą. Charakterystyka wybuchu jej pyłu wskazuje, że w przypadku zapłonu mieszaniny pyłowo-powietrznej szybkość rozwoju procesu spalania przekracza 80 km/h i choć wciąż jest klasyfikowana jako pył klasy ST1, gwałtowny wzrost ciśnienia w przypadku zamkniętego pomieszczenia (silos, magazyn) może spowodować katastrofalne szkody i obrażenia u ludzi.

W związku z takim rozwojem procesu spalania i dużą zdolnością gromadzenia ładunku elektrycznego zaleca się zachowanie szczególnej ostrożności podczas transportu i przetwarzania pszenicy, stosowanie zabezpieczeń odprowadzających nadmiar gromadzonego ładunku elektrostatycznego podczas prac związanych z przesypaniem i kondycjonowaniem ziarna oraz dbanie o zachowanie czystości w miejscach, gdzie pył zbożowy może powstawać i gromadzić się w sposób samoistny tak, aby stężenie dolnej granicy wybuchowości pyłu DGW nie zostało przekroczone. Proponuje się ponadto stosowanie atmosfery o obniżonej zawartości tlenu w trakcie przechowywania pszenicy w magazynach typu silos. Zapalność materiału organicznego jest bardzo wrażliwa na stężenie tlenu. Takie zabezpieczenie – ograniczające zagrożenie wystąpienia samoistnego zapłonu czy wybuchu pyłu, pozwala bezpiecznie magazynować ziarno.

Opisane działania mają za zadanie zapobiegać tworzeniu się atmosfery wybuchowej. Istnieją również działania, pozwalające minimalizować straty związane z wystąpieniem wybuchu pyłu. Do tej grupy możemy zaliczyć stosowanie ochronnych środków konstrukcyjnych, tj. lekkich dachów, klap i płytek przeciwwybuchowych – w wyniku wybuchu pyłu dach zostaje uniesiony, dochodzi do otwarcia klap – co pozwala na ujęcie fali nadciśnienia, jednocześnie chroni strukturę silosy. Inne metody to wprowadzenie barier/przegród/zasuw, uniemożliwiających rozprzestrzenianie się wybuchu do pozostałych części obiektu oraz stosowanie tłumików płomienia. Użycie tych zabezpieczeń jest jak najbardziej wskazane, jednak w pierwszej kolejności należy zwrócić uwagę na prewencję przeciwwybuchową.

Owies i pszenżyto również należą do zbóż, których pyły mogą powodować duże uszkodzenia lub zniszczenia mienia jeśli powstaną warunki mogące doprowadzić do ich zapłonu. Owies w badaniach kalorymetrycznych charakteryzuje się najkrótszym czasem zapłonu, natomiast wybuch z udziałem pyłu owsa osiągnął najwyższą wartość ciśnienia spośród wszystkich badanych pyłów. Z kolei pszenżyto charakteryzuje się stosunkowo wysoką (drugą po pszenicy) wartością parametru K_{St} , a ciśnienie wybuchu jest tylko nieznacznie mniejsze od ciśnienia uzyskanego dla pyłu owsa. Oba pyły charakteryzują się zbliżoną ilością ładunku elektrostatycznego, powstającego podczas procesu przesypania, a minimalna energia ich zapłonu znajduje się w tym samym zakresie, co pyłu pszenicy. Z tego powodu pyły zarówno owsa, jak i pszenżyta należy traktować tak, jak pył pszenicy – w celu zachowania pełni bezpieczeństwa procesów przemysłowych.

Do stosunkowo bezpiecznych zbóż należy kukurydza, w przypadku której należy zwrócić uwagę przede wszystkim na zagrożenie związane z wpływem zewnętrznego źródła ciepła. W badaniach palności kukurydza wykazuje umiarkowany czas do zapłonu, jednak ilość ciepła wydzielonego w trakcie jej spalania niemal trzykrotnie przekracza wartości uzyskane w przypadku pszenicy

oraz pszenżyta. Wybuch kukurydzy cechuje się znacznie mniejszą szybkością przyrostu ciśnienia w jednostce czasu niż pozostałe pyły, co przekłada się na znacznie niższą siłę wybuchu pyłu tego zboża. Niemniej, dolna granica wybuchowości jest taka sama, jak pozostałych pyłów, co oznacza potrzebę częstego usuwania nagromadzonego materiału pylistego z miejsc newralgicznych, tj. podajników materiału zmielonego, powierzchni płaskich, na których zalega pył.

W trakcie przesypania kukurydza gromadzi stosunkowo niewielką ilość ładunku elektrostatycznego, a wartość minimalnej energii zapłonu sugeruje względne bezpieczeństwo takiego procesu. Pozostaje jednak jeszcze kwestia warunków jego przeprowadzania, czystości urządzenia, jak i samego materiału zbożowego.

Warto dodać, że badania przeprowadzone w dużej skali przez zespół prof. Lebeckiego wykazały zapłon mieszanin pyłowo-powietrznych pyłów zbożowych już przy stężeniu 50g/m³ (DGW – przeszło połowę niższa od wartości uzyskanej w badaniach laboratoryjnych dla czystych materiałów), [11]. Różnice zależą w dużej mierze od warunków prowadzonego pomiaru, wielkości ziarna pyłu, stopnia jego przetworzenia oraz metodyki badania.

BIBLIOGRAFIA

- [1] 2018 mid-year Combustible Dust Incident Report. Dustex Research, LTD 2018
- [2] <https://www.agrofakt.pl/produkcja-zboz-w-polsce-swiecie>
- [3] Cloney Ch. 2017 Combustible Dust Incident Report – Version #1, 2018
- [4] Klemens R.H. Mechanizm propagacji i struktura płomienia w mieszaninach pyłowo-powietrznych i hybrydowych. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993
- [5] Veysiere B. Development and propagation regimes of dust explosions. Powder Technology, 1992, 71, 2:171-180
- [6] CNBOP-PIB-BW02P: 2016 Pyły palne przegląd podstawowych parametrów wybuchowości i zapalności oraz metod badawczych
- [7] OSHA, Hazard Communication Guidance for Combustible Dusts, 2009
- [8] PN-EN 14034-1+A1:2011 Oznaczenie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu – Część 1: Oznaczenie maksymalnego ciśnienia wybuchu p_{max} obłoków pyłu
- [9] PN-EN 13821:2004 Przestrzenie zagrożone wybuchem – Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem – Oznaczenie minimalnej energii zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych
- [10] PN-E-05201:1992 Ochrona przed elektrycznością statyczną. Metody oceny zagrożeń wywołanych elektryzacją materiałów dielektrycznych stałych. Metody oceny zagrożenia pożarowego i/lub wybuchowego
- [11] Lebecki K., Cybulski K., Śliż J., Dyduch Z., Wolański P. Large scale grain dust explosions-research in Poland. Shock Waves 1995, 5, 1-2:109:114

Publikacja przygotowana w ramach IV etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” finansowanego w latach 2017-2019 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.