

Michael T. Jobczyk

Explosion & Process Safety Manager

CORONA Serwis sp. z o.o. sp. k-

Katowice, ul. J. Bałdona 16/27

BEZPIECZEŃSTWO WYBUCHOWE W ZAKŁADACH PRZEMYSŁOWYCH – KIEDY DOCHODZI DO SYTUACJI NIEBEZPIECZNYCH I JAK SIĘ PRZED NIMI USTRZEC

**Explosion safety in industrial plants – when dangerous situations
occur and how to prevent them**

Streszczenie

Materiał porusza tematykę bezpieczeństwa wybuchowego w zakładach przemysłowych. Przedstawia, jakie pyły przemysłowe mogą być powodem incydentów wybuchowych w zakładach i w jakich branżach dochodzi do nich najczęściej. Porusza również kwestię konieczności stosowania systemów ochronnych, a także omawia ich rodzaje (m.in. tłumienie wybuchu, odsprzęganie wybuchu, izolację wybuchu). Omawia także krótko kwestię zagrożenia dla sektora energetycznego wynikającego z eksplozji transformatorów olejowych i konsekwencji tego dla branży przemysłowej.

Słowa kluczowe: *bezpieczeństwo wybuchowe, zagrożenia wybuchowe, strefy zagrożenia, pyły przemysłowe, zabezpieczenia przed wybuchem*

Abstract

The material discusses the topic of explosion safety in industrial plants. It presents which industrial dusts can cause explosive incidents in plants and in which industries they occur most frequently. It also addresses the necessity of using protective systems and discusses their types with examples (including explosion suppression, explosion decoupling, and explosion isolation). The article also briefly discusses the issue of the threat to the energy sector resulting from the explosion of oil transformers and its consequences for the industrial sector.

Keywords: *explosions safety, explosion hazards, hazardous zones, industrial dusts, explosion protection*

1. Wprowadzenie

Bezpieczeństwo wybuchowe bez wątpienia jest kluczowym aspektem funkcjonowania zakładów przemysłowych, w których występują substancje łatwopalne pyły oraz gazy o właściwościach wybuchowych. Wybuchy w przemyśle stanowią niezaprzeczalne zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi. Co istotne, wybuchy w przemyśle bardzo często wiążą się z ogromnymi stratami materialnymi i nie-

jednokrotnie z nieodwracalnymi szkodami dla środowiska naturalnego. Z tego powodu konieczne jest dokładne rozpoznanie czynników ryzyka oraz implementacja skutecznych środków ochronnych, które pozwolą na minimalizację takiego zagrożenia, a w przypadku jego wystąpienia – maksymalnie ograniczą jego skutki.

W wielu branżach przemysłowych, takich jak przemysł chemiczny, spożywczy, farmaceutyczny, obróbki drewna, metalurgiczny czy energetyczny, występują substancje łatwopalne, gazy oraz pyły, które w odpowiednich warunkach mogą tworzyć atmosferę wybuchową. W takich środowiskach pyły oraz gazy mogą w określonych stężeniach mieszać się z powietrzem, tworząc tym samym mieszaniny wybuchowe. W połączeniu z czynnikiem powodującym zapłon, takim jak m.in. iskra, wyładowania elektrostatyczne, tarcie, wysoka temperatura czy chociażby otwarty płomień, może dojść do eksplozji, której skutki będą katastrofalne nie tylko dla ludzi, ale także dla infrastruktury i otoczenia zakładu. Stąd właśnie kluczowe jest nie tylko stosowanie systemów prewencyjnych i eliminowanie potencjalnych źródeł zapłonu, ale także wdrażanie systemów zabezpieczających, które minimalizują ryzyko wybuchu oraz ograniczają jego skutki w razie wystąpienia.

Zrozumienie mechanizmu powstawania wybuchów oraz wdrożenie skutecznych systemów ochrony i prewencji w tym zakresie jest kluczowe dla zapewnienia bezpiecznego środowiska pracy. Regulacje prawne odgrywają istotną rolę w ustalaniu standardów bezpieczeństwa. Przykładowo w Unii Europejskiej kluczowe znaczenie mają dyrektywy ATEX (ATEX 137 – 1999/92/WE oraz ATEX 114 – 2014/34/UE), które określają wymagania dotyczące ochrony przeciwwybuchowej w miejscach pracy oraz dla urządzeń przeznaczonych do pracy w atmosferach wybuchowych. W Stanach Zjednoczonych odpowiednie normy opracowuje National Fire Protection Association (NFPA). Ponadto normy ISO, IEC oraz inne krajowe regulacje także stanowią istotny fundament w kształtowaniu bezpieczeństwa w przemyśle.

Odpowiedzialne podejście do bezpieczeństwa wybuchowego wynika nie tylko z przestrzegania norm i regulacji, ale także wdrażania odpowiednio nowoczesnej technologii, która pozwoli walczyć lub odpowiednio ograniczyć skutki eksplozji. Bardzo ważnym aspektem jest również zapewnienie odpowiedniego poziomu świadomości w tym zakresie, poprzez m.in. regularne szkolenia dla pracowników. To ich świadomość zagrożeń, umiejętność ich rozpoznawania, a także wiedza, jak się zachować w określonych sytuacjach jest niejednokrotnie najważniejszym czynnikiem przeważającym w temacie bezpieczeństwa. Skuteczna strategia ochrony przeciwwybuchowej powinna opierać się na kompleksowym podejściu, które będzie łączyło w sobie wszystkie aspekty: techniczne, organizacyjne oraz prawne.

2. Nagromadzenie pyłu w zakładzie – kiedy stwarza zagrożenie?

Właściwości wybuchowe pyłów/mieszanin pyłu z powietrzem a także czynniki na to wpływające są znacznie bardziej złożone niż mieszanin gazowych. Mieszaniny gazu z powietrzem zwykle posiadają właściwości zapalne oraz wybuchowe jasno zdeterminowane przez rodzaj gazu. W przypadku pyłów istotną kwestią jest nie tylko sama właściwość pyłu, ale także jego rozdrobnienie czy wilgotność, które znacząco mogą wpłynąć na określenie parametrów wybuchowości danego pyłu. Dlatego niniejszy artykuł dotyczy zagrożeń wynikających z wybuchów pyłowych.

Jednym z najistotniejszych parametrów wpływających na to czy konkretny pył będzie wybuchowy i w jakim zakresie, jest stopień jego rozdrobnienia – im drobniejsze cząstki, tym większa ich powierzchnia właściwa, co może prowadzić do łatwiejszego zapłonu i szybszego rozprzestrzeniania się reakcji spalania. Dodatkowo, istotną rolę odgrywa wilgotność, która może wpływać zarówno na zmniejszenie jego wybuchowości (poprzez zwiększenie masy cząstek i ich tendencji do aglomeracji), ale także, w pewnych przypadkach, sprzyjać powstawaniu wybuchu poprzez generowanie elektryczności statycznej [1].

Ponadto, na możliwość wystąpienia zagrożenia wybuchowego i jego zasięg wpływa również sposób, w jaki pył gromadzi się w zakładzie przemysłowym czy na danej instalacji. Bardzo często przyczyną jest osadzanie się warstw pyłu na powierzchniach, co może prowadzić do powstania wtórnych wybuchów, które są szczególnie niebezpieczne. Występuje tutaj wtedy tzw. efekt domina – wzbijanie się dodatkowych ilości pyłu w wyniku pierwszej eksplozji może prowadzić do lawinowego rozprzestrzeniania się zjawiska [1].

Aby doszło do wybuchu pyłu literatura fachowa wskazuje, że musi zostać spełnionych pięć podstawowych warunków, które składają się na tzw. pięciokąt wybuchowości pyłu [2]. Są to:

- 1. Obecność palnego pyłu** – materiały o właściwościach palnych, takie jak m.in. pyły organiczne (np. mąka, cukier, drewno), metaliczne (np. aluminium, magnez) czy syntetyczne (np. tworzywa sztuczne), muszą być obecne w środowisku pracy.
- 2. Dostateczna koncentracja pyłu w powietrzu** – pył musi być zawieszony w powietrzu w odpowiednim stężeniu.
- 3. Dostęp do utleniacza (zazwyczaj tlenu z powietrza)** – tlen jest niezbędny do procesu spalania.
- 4. Źródło zapłonu** – konieczne jest wystąpienie czynnika inicjującego, który dostarczy energię wystarczającą do zapłonu mieszaniny pyłowo-powietrznej. Może to być na przykład:
 - iskra elektryczna (np. z elementu instalacji elektrycznej);
 - gorąca powierzchnia maszyny;
 - otwarty płomień;
 - tarcie lub uderzenie mechaniczne;
 - elektryczność statyczna itp.

5. Zamknięta lub częściowo zamknięta przestrzeń – choć wybuchy pyłu mogą wystąpić także w otwartych przestrzeniach, to zamknięcie w obrębie instalacji produkcyjnych, silosów, filtrów czy kanałów wentylacyjnych powoduje nagromadzenie ciśnienia i znacznie potęguje siłę eksplozji.

W związku z powyższym, ocena zagrożenia wybuchowego w zakładach przemysłowych wymaga kompleksowego podejścia, uwzględniającego zarówno charakterystykę samego pyłu, jak i warunki panujące w danym środowisku pracy. Kluczowe jest monitorowanie parametrów pyłu powstającego/zalegającego w zakładzie, kontrolowanie jego akumulacji oraz wdrażanie odpowiednich środków prewencyjnych, aby minimalizować ryzyko wystąpienia eksplozji.

Nagromadzenie się warstw palnego pyłu w zakładzie może prowadzić to powstania atmosfery wybuchowej. Określenie miejsc, w których zagrożenie wybuchowe istnieje dokonywane jest poprzez wyznaczenie stref zagrożenia wybuchem. Strefy takie są wyznaczane w zakładach produkcyjnych, przemysłowych i chemicznych, zarówno w obiektach już funkcjonujących, jak i tych poddawanych modernizacji czy rozbudowie. Konieczne jest także uwzględnienie stref wybuchowych na etapie projektowania nowych obiektów, co pozwala na wdrożenie odpowiednich środków bezpieczeństwa już w fazie koncepcyjnej.

Obowiązek taki wynika z przepisów prawa, w szczególności z Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 8 lipca 2010 r. (Dz.U. 2010 nr 138 poz. 931), a jego realizacja spoczywa na inwestorach, projektantach oraz przyszłych użytkowników instalacji technologicznych.

3. Klasyfikacja stref zagrożenia wybuchem

Strefy zagrożenia wybuchem wyznacza się na podstawie prawdopodobieństwa, częstotliwości pojawiania się i czasu występowania atmosfery wybuchowej. Klasyfikacja stref, zgodnie z przepisami, wygląda następująco [3]: trzy strefy dla gazów, par, mgieł (strefa 0, 1 lub 2) oraz trzy strefy dla pyłów (strefa 20, 21 lub 22). Odnosząc się do stref wybuchowych dla pyłów przepisy określają je następująco:

- Strefa zagrożenia wybuchem 20

Jako Strefę 20 wyznacza się miejsce, w którym atmosfera wybuchowa w formie chmury palnego pyłu w powietrzu występuje ciągle, często lub przez długi okres.

- Strefa zagrożenia wybuchem 21

Przestrzeń, gdzie czasami podczas normalnego działania może występować atmosfera wybuchowa w formie chmury palnego pyłu w powietrzu, oznaczana jest jako Strefa 21.

- Strefa zagrożenia wybuchem 22

Jeśli podczas normalnego działania nie tworzy się atmosfera wybuchowa w formie chmury palnego pyłu w powietrzu, a w przypadku wystąpienia, utrzymuje się tylko przez krótki czas, wtedy wyznaczana jest Strefa 22.

Pierwszym krokiem w określaniu stref zagrożenia wybuchem jest identyfikacja rodzaju potencjalnego zagrożenia, co umożliwia przypisanie go do odpowiedniej kategorii. Następnie konieczne jest określenie zasięgu tej strefy, który zależy od wielu czynników, takich jak charakter powstającej atmosfery wybuchowej, warunki otoczenia, typ instalacji oraz inne specyficzne parametry wpływające na ryzyko wybuchu. Wyznaczanie stref zagrożenia wybuchem jest nie tylko częścią dokumentacji zakładowej, w tym Dokumentu Zabezpieczenia Przed Wybuchem (DZPW), ale również wynika z obowiązujących przepisów prawa.

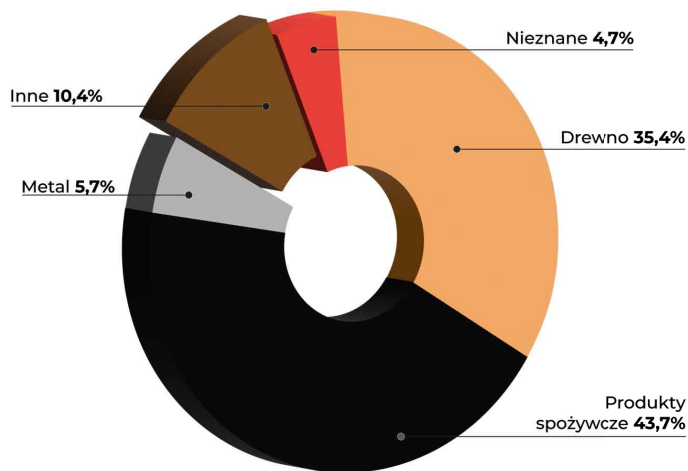
4. Pyły przemysłowe, które stwarzają największe zagrożenie wybuchowe

W wielu zakładach produkcyjnych procesy technologiczne mogą prowadzić do emisji pyłów, które powstają w wyniku takich działań jak szlifowanie, mienienie czy przesiewanie. Pyły te, unosząc się w powietrzu lub osiadając na powierzchniach maszyn, mogą znacząco zwiększać ryzyko wystąpienia wybuchu. Pomimo rosnącej świadomości w zakresie zagrożeń związanych z obecnością palnych i wybuchowych pyłów, statystyki wciąż pokazują, że każdego roku dochodzi do licznych incydentów, w wyniku których życie traci wiele osób. W ramach projektu Dust Safety Science, od 2018 roku, co roku publikowane są kompleksowe raporty zawierające dane statystyczne dotyczące incydentów pożarowych i wybuchowych związanych z pyłami [4].

Z raportu za 2023 r. wynika, że w ujęciu globalnym doszło w tym okresie do 263 odnotowanych pożarów i aż 53 eksplozji w zakładach przemysłowych, gdzie przyczyną były pyły. W efekcie tych zdarzeń śmierć poniosły 62 osoby, a 94 zostały ranne. Z raportu wynika, że w porównaniu z pożarami to jednak wybuchy pyłów odpowiadają za 66% przypadków śmiertelnych i za aż 86% przypadków, kiedy ktoś odniósł obrażenia. Za najpoważniejsze, odnotowane, incydenty uznaje się:

- 20 rannych i zabitych w wybuchu pyłu zbożowego (Parana, Brazylia);
- 8 rannych w eksplozji podczas przetwarzania ziarna (Decatur, IL);
- 1 osoba w stanie krytycznym w wyniku wybuchu pyłu stalowego (Muncie, IN);
- 21 zabitych w wybuchu w kopalni węgla (Sutatausa, Kolumbia).

Z przedstawionych danych wynika również, że to z pyłami spożywczymi (mąka, skrobia itd.) i pyłami drzewnymi związanych było łącznie prawie 80% (243) przypadków pożarów i eksplozji. To w wyniku pożaru lub eksplozji tych pyłów odnotowano 70 sytuacji, kiedy ktoś poniósł obrażenia i 15, kiedy ktoś poniósł śmierć.



Rys 1. Procentowy podział materiałów biorących udział w zdarzeniach

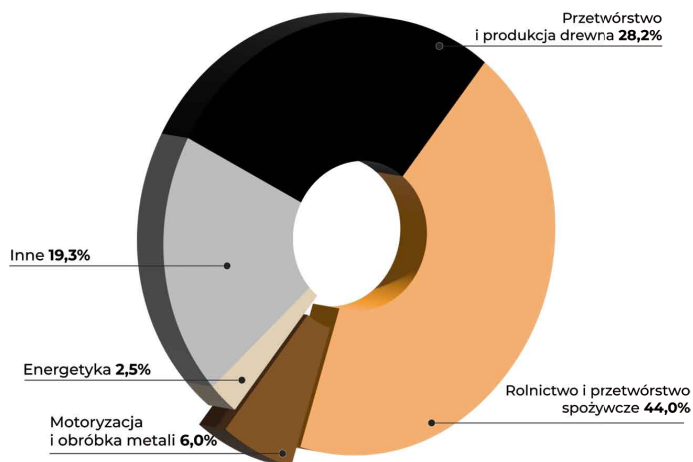
Fig. 1. Percentage distribution of materials involved in incidents

Źródło: Wykres własny na podstawie Raportu Dust Safety Science '23.

Source: Own chart based on the Dust Safety Science Report '23.

Co bardzo istotne, surowcem, który statystycznie okazał się najbardziej śmiertelny, jeśli chodzi o jego eksplozję lub pożar w 2023 roku był pył węglowy. Tylko w ciągu tych 12 miesięcy w efekcie pożaru lub eksplozji tego pyłu śmierć poniosły aż 42 osoby.

Jak pokazują statystyki z poprzednich lat, niezmiennie branżami, które najbardziej narażone są na incydenty pożarowe i wybuchowe związane z pyłami są branża spożywcza oraz branża produkcji/obróbki drewna. W przypadku branży spożywczej do incydentów częściej dochodzi przykładowo w zakładach produkcji cukru, przetwórnich mleka w proszku oraz magazynach zbóż. Z kolei w branży obróbki drewna do incydentów dochodzi w tartakach, zakładach produkcji płyt wiórowych i MDF, papierniach czy stolarniach.



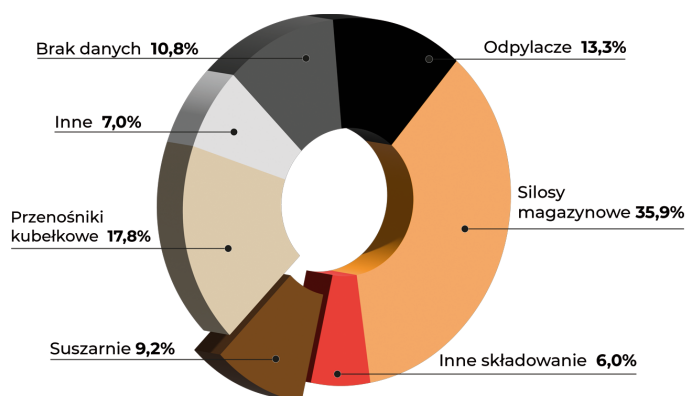
Rys 2. Procentowy podział branż, w których doszło do zdarzeń

Fig. 2. Percentage distribution of industries where incidents occurred

Źródło: Wykres własny na podstawie Raportu Dust Safety Science '23.

Source: Own chart based on the Dust Safety Science Report '23.

W 2023 r. silosy magazynowe były urządzeniami, które wykazały najwyższy odsetek udziału w incydentach z pyłem palnym – odnotowano 93 pożary i 20 eksplozji. Przenośniki kubelkowe i odpylacze stanowiły kolejno drugi i trzeci najwyższy odsetek. W 2023 roku odnotowano tylko 3 eksplozje w systemach odpylania, co w porównaniu do 2022 roku (10 eksplozji) daje o wiele lepszy wynik. Spośród incydentów, w przypadku których rozpoznano urządzenie, 21 osób poniosło śmierć w wyniku eksplozji przenośników kubelkowych, 10 silosów magazynowych, 2 odpylaczy.



Rys 3. Procentowy podział urządzeń, które brały udział w zdarzeniach

Fig. 3. Percentage distribution of equipment involved in incidents

Źródło: Wykres własny na podstawie Raportu Dust Safety Science '23.

Source: Own chart based on the Dust Safety Science Report '23.

Cząstki pyłu unoszące się w powietrzu lub osadzające się na powierzchniach maszyn mogą znacząco zwiększać ryzyko wybuchu w środowisku przemysłowym. Dlatego kluczowym aspektem zapewnienia bezpieczeństwa procesów technologicznych jest dokładne określenie właściwości wybuchowych tych pyłów. Dysponując precyzyjnymi danymi na temat ich parametrów, można znacznie łatwiej dobrać skuteczne środki ochronne, które zminimalizują ryzyko wybuchu i zabezpieczą instalacje przed potencjalnymi incydentami. Aby to zrobić najlepiej poddać próbkę materiału pyłu odpowiednim badaniom laboratoryjnym, które określą takie parametry, jak m.in. ciśnienia wybuchu P_{max} , stałą wybuchowości K_{st} , minimalną energię zapłonu, czy granicę wybuchowości pyłu [5].

5. Zabezpieczenia przed wybuchem – praktyczne rozwiązania

Systemy przeciwwybuchowe stosuje się w zakładach przemysłowych, w celu minimalizowania ryzyka eksplozji, ograniczania jej skutków oraz ochrony życia pracowników. W wielu gałęziach przemysłu występują łatwopalne pyły, gazy lub pary, które w odpowiednich warunkach mogą tworzyć atmosferę wybuchową. Brak odpowiednich zabezpieczeń może prowadzić do katastrofalnych skutków, takich jak pożary, eksplozje wtórne, uszkodzenia urządzeń, przestoje w produkcji, a nawet ofiary śmiertelne. Dlatego stosowanie odpowiednich zabezpieczeń jest tak ważne?

- 1. Ochrona zdrowia i życia pracowników** – bezpieczeństwo pracowników to absolutna podstawa odpowiedzialnego podejścia do prowadzenia biznesu. Pracodawca ma nie tylko prawny, ale także moralny obowiązek dolażenia wszelkich starań, aby podczas wykonywania obowiązków pracownicy mogli czuć się w pełni bezpiecznie. Incydenty pożarowe i wybuchowe narażają pracowników na zagrożenie dla ich życia czy zdrowia.
- 2. Zapobieganie uszkodzeniom infrastruktury przemysłowej** – wszelkiego rodzaju incydenty wybuchowe, bez odpowiedniego zabezpieczenia urządzeń mogą powodować znaczne szkody materialne w infrastrukturze zakładu. Wielokrotnie straty wynikające z tego typu zdarzeń liczy się w milionach złotych.
- 3. Spełnienie wymagań prawnych i norm bezpieczeństwa** [6] [7] – każdy pracodawca, a także użytkownik instalacji przemysłowej, której działanie może stwarzać zagrożenie wybuchowe jest zobligowany do wypełniania ścisłych wymogów określonych w normach prawnych i ustawach. Przykładowo w Unii Europejskiej obowiązują dyrektywy ATEX 2014/34/UE i 1999/92/WE, które nakładają obowiązek wdrażania odpowiednich środków ochronnych. W Stanach Zjednoczonych normy NFPA regulują sposoby zabezpieczenia instalacji. Niespełnienie wymogów prawnych może prowadzić do kar finansowych, zamknięcia zakładu oraz odpowiedzialności karnej.
- 4. Ochrona środowiska** – w wyniku eksplozji mogą zostać uwolnione toksyczne substancje chemiczne, które zanieczyszczają powietrze, wodę i glebę. Stosowanie odpowiednich systemów zapobiegania wybuchom redukuje ryzyko skażenia i negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

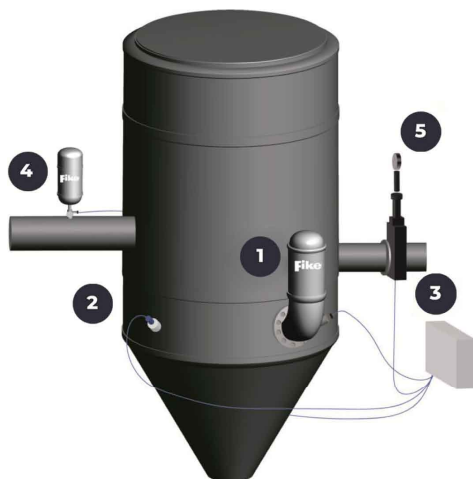
Przedstawione w niniejszej pracy zabezpieczenia to tylko przykładowe rozwiązania. Rynek zabezpieczeń przeciwwybuchowych nieustannie się rozwija, wymuszają to nie tylko przepisy prawa, ale przede wszystkim ciągły postęp przemysłowy, który niejako stawia coraz to nowsze wyzwania technologiczne. Dlatego też nie ma jednego idealnego rozwiązania, a każde zabezpieczenie musi być dobrane pod konkretną instalację, którą będzie chronić. Wszystko poprzedzone musi być dokładnymi analizami, opartymi na konkretnych wyliczeniach. Standardem jest też, że dla zwiększenia bezpieczeństwa instalacji stosuje się kombinację kilku rozwiązań technologicznych.

6. Na czym polega tłumienie wybuchów?

Tłumienie wybuchów to jedna z najskuteczniejszych metod ochrony przeciwwybuchowej, która polega na błyskawicznym wykryciu i stłumieniu eksplozji we wczesnej fazie jej rozwoju, zanim osiągnie pełną moc. Czas zadziałania takich urządzeń mierzy się zwykle w milisekundach. Tłumienie wybuchów jest szczególnie skuteczne w instalacjach, gdzie gromadzi się palny pył, np. w silosach, filtrach odpylających, młynach przemysłowych, cyklonach czy zbiornikach technologicznych [8].

System tłumienia wybuchów składa się z trzech kluczowych elementów:

- **Czujniki ciśnienia i/lub czujniki optyczne** – to urządzenia, których zadaniem jest monitorowanie przestrzeni chronionego urządzenia i natychmiastowa reakcja w przypadku wykrycia gwałtownego wzrostu ciśnienia czy pojawienia się płomienia/iskry.
- **Sterownik systemu tłumienia** – specjalne urządzenia sterujące, które analizują sygnały dostarczane przez czujnik. To ich zadaniem jest natychmiastowa aktywacja systemu gaszącego w przypadku wykrycia zagrożenia przez czujnik.
- **Butle ze środkiem tłumiącym (HRD – High Rate Discharge)** – zawierają substancje tłumiące, które wprowadzane są do wnętrza zagrożonej przestrzeni w ułamku sekundy, gasząc płomień i redukując ciśnienie.



Rys 4. Przykład silosa zabezpieczonego systemami ochronnymi – tłumienia oraz izolacji wybuchu

Fig. 4. Example of a silo protected by safety systems – explosion suppression and isolation

Źródło: Materiały własne.

Source: Own materials.

W trakcie wybuchu w zamkniętej przestrzeni przez butlę HRD jest podawany pod ciśnieniem środek, który tłumi wybuch w jego wnętrzu. Co ważne bardzo często dla lepszego efektu i zabezpieczenia instalacji przed propagacją wybuchu stosuje się kombinację różnych metod ochrony przeciwwybuchowej. Rysunek 4. prezentuje silos zabezpieczony systemami tłumienia wybuchu, odpowiadającymi za ugaszenie powstałego zagrożenia oraz izolacji wybuchu, odpowiadający za niedopuszczenie do propagacji wybuchu na inne części instalacji przemysłowej. Składają się na niego następujące elementy:

1. System HRD (1) – butla ze środkiem tłumiącym, który jest emitowany do środka instalacji w celu ugaszenia płomienia.
2. Czujnik (2) – daje sygnał do sterownika, w celu aktywacji butli.
3. Szafa sterująca (3) – kluczowy pośrednik między detektorem a urządzeniem tłumiącym HRD. W momencie otrzymania sygnału z detektora o zagrożeniu aktywuje butlę HRD.
4. Butla SRD (4) – system izolacji chemicznej SRD jest montowany zwykle na połączeniach między procesami, gdzie środek gaśniczy jest wstrzeliwany do rurociągu. Po otrzymaniu sygnału z systemu, butla odsprężająca SRD zostaje aktywowana i wprowadza proszek do chronionej części instalacji.
5. Zawór szybkozamykający (5) – jest kluczowym elementem w mechanicznej izolacji wybuchów. Natychmiastowe zamknięcie, czyni go fizyczną barierą, przez którą nie może przejść ogień. Innymi słowy w przypadku aktywacji, zawór zamyka się tworząc nieprzepuszczalną zaporę dla ewentualnego płomienia.

7. Na czym polega odciążanie wybuchów?

Odciążanie wybuchów to metoda ochrony przeciwwybuchowej, która ma na celu kontrolowane uwolnienie energii powstałej w wyniku eksplozji, aby zapobiec nadmiernemu wzrostowi ciśnienia i uszkodzeniom instalacji. Polega na zastosowaniu specjalnych urządzeń zabezpieczających, które otwierają się w momencie wybuchu, umożliwiając bezpieczne odprowadzenie gazów, płomieni oraz fali ciśnienia poza chronioną przestrzeń.

Systemy odciążania wybuchów nie zapobiegają eksplozji, ale minimalizują jej skutki, kierując energię w wyznaczony, bezpieczny obszar, co pozwala ochronić infrastrukturę zakładu i zmniejszyć zagrożenie dla ludzi. Są stosowane w silosach, filtrach odpylających, cyklonach, młynach przemysłowych i zbiornikach technologicznych.



Rys 5. Przykład silosa zabezpieczonego systemami ochronnymi – płytami bezpieczeństwa i zaworami na rurociągach

Fig. 5. Example of a silo protected by safety systems – rupture discs and pipeline valves

Źródło: Materiały własne.

Source: Own materials.

Na rysunku 5. przedstawiono przykład zastosowania urządzeń odciążających wybuch przy wykorzystaniu płyt bezpieczeństwa oraz zabezpieczeniu przed rurociągów przed propagacją wybuchu na inne części instalacji za pomocą zaworów przeciwwybuchowych.

Płyty bezpieczeństwa są nazywane także panelami dekompresyjnymi czy klapami przeciwybuchowymi. Jest to rodzaj pasywnego urządzenia. Instalowane na urządzeniach takich jak zbiorniki magazynowe czy zbiorniki procesowe lub filtry. Panele są zaprojektowane tak, aby otwarły się przy wcześniej określonym ciśnieniu, uwalniając bezpiecznie energię wybuchu do atmosfery i zmniejszając ryzyko uszkodzenia otaczających urządzeń.

Płyty można dobrać na wiele sposobów – ze względu na materiał wykonania, rozmiar czy kształt. Producenci zabezpieczeń wybuchowych niejednokrotnie oferują płyty dedykowane do montażu w konkretnej branży np. przemysłowej, farmaceutycznej czy spożywczej. Co ważne, aby zastosować zabezpieczenie w postaci samodzielnych płyt należy upewnić się, że płomień/energia wybuchu, zostaną przy pomocy płyty skierowane w przestrzeń otwartą, gdzie zagrożenie wybuchów wtórnych czy pożarów będzie niemożliwe. W innym przypadku bardzo częstym rozwiązaniem stosowanym w praktyce jest montaż płyt bezpieczeństwa w kombinacji z przerywaczami płomieni.

Przerywacz płomieni składa się z wielu warstw plecionej stali nierdzewnej, które pochłaniają ciepło generowane podczas reakcji utleniania. Dzięki temu możliwe jest bezpieczne odprowadzanie skutków wybuchu wewnątrz pomieszczeń, eliminując ryzyko przedostania się płomieni oraz gwałtownej fali ciśnienia.

Zawór przeciwybuchowy to z kolei element systemu bezpieczeństwa zapobiegający rozprzestrzenianiu się ognia i wybuchu. Montowany w rurociągach, kanałach oraz innych systemach, działa automatycznie, zamykając się w przypadku wybuchu, co skutecznie blokuje przedostanie się źródła zapłonu do kolejnych sekcji instalacji. Takie zawory znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle chemicznym, petrochemicznym i farmaceutycznym, gdzie odgrywają kluczową rolę w bezpiecznym przechowywaniu, obsłudze i transporcie substancji łatwopalnych.

8. Eksplozja transformatora olejowego – jakie niesie zagrożenia

Proces wytwarzania i dystrybucji energii elektrycznej jest złożony i dość skomplikowany. Bierze w nim udział wiele połączonych ze sobą urządzeń i poprawne działanie każdego z nich znacząco wpływa na przebieg całego procesu. Kluczowym elementem jest transformator odpowiadający za przekształcenie napięcia prądu przemiennego i dostosowanie go do wymagań sieci energetycznej lub urządzeń odbiorczych. Jego awaria lub niepoprawne działanie może mieć poważne konsekwencje. Jeśli wziąć pod uwagę transformatory będące częścią infrastruktury krytycznej w kraju będzie to miało ogromny wpływ na funkcjonowanie całej sieci energetycznej. Średnia wieku transformatorów zlokalizowanych na całym świecie stale rośnie. I prawdopodobnie w najbliższym czasie niewiele w tym zakresie się zmieni. Nowe jednostki transformatorowe nie są produkowane i dostarczane w wystarczającym tempie, zatem światowy system energetyczny, w wielu przypadkach, opiera się na wysłużonych, wieloletnich urządzeniach. Kluczem jest zatem zabezpieczenie ich w taki sposób, żeby ich niezakłócona praca mogła trwać jak najdłużej.

Eksplozja lub pożar transformatora mogą być spowodowane wieloma czynnikami m.in. defektami konstrukcyjnymi, uszkodzoną izolacją, nagłymi zmianami napięcia, wyladowaniami atmosferycznymi, zaniedbaniami w konserwacji czy nieprawidłowościami w eksploatacji. Bardzo poważnym zagrożeniem, na które narażony jest współczesny świat są także cyberataki na stacje transformatorowe. Cyberatak na transformator polega na infekowaniu systemów odpowiedzialnych za jego zarządzanie złośliwym oprogramowaniem, umożliwiającym przestępcom manipulowanie przekaźnikami bezpieczeństwa i celowe uszkodzanie urządzeń. Dobrze zaplanowany atak może prowadzić do przeciążenia transformatorów, skutkując ich eksplozją. Każda podstacja pozbawiona odpowiednich zabezpieczeń jest potencjalnie narażona na takie zagrożenie.

Gdyby jednoczesny atak objął kluczowe transformatory w strategicznych lokalizacjach, skutki mogłyby być katastrofalne dla całej sieci energetycznej kraju. Oprócz ogromnych strat finansowych, taki incydent stanowiłby poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa narodowego, powodując paraliż kluczowych sektorów, takich jak służba zdrowia i infrastruktura krytyczna. Jak pokazują statystyki w ostatnich latach ataki cybernetyczne na elektrownie jądrowe, farmy fotowoltaiczne, elektrownie wodne nieustannie przybierają na sile.

Innym bardzo istotnym aspektem wartym poruszenia, jest wpływ eksplozji transformatora na środowisko naturalne. Wybuch takiej jednostki wiąże się najczęściej z rozerwaniem kadzi i wydostaniem się przepiecznionego oleju na zewnątrz. Skład substancji jest wysoce chemiczny, zatem zagrożenie dla środowiska naturalnego jest bardzo duże. Okoliczna flora i fauna mają niewielkie szanse przetrwania po bezpośrednim kontakcie z olejem transformatorowym. Dla przykładu warto przytoczyć zdarzenie z 2009 roku na tamie Sayano–Shushenskaya w Rosji [13]. W wyniku eksplozji transformatora zginęło 75 osób, a co najmniej 40 ton oleju transformatorowego rozlało się na terenach o długości 80 km prowadzących w dół rzeki Jenisej. Doprowadziło to do skażenia, które m.in. zabiło wtedy 400 ton pstrągów hodowlanych w dwóch tamtejszych nadrzecznych łowiskach.

Od lat istnieją różne możliwości zabezpieczeń, jednak większość z nich okazuje się niewystarczająca. Na przykład przekątnik Buchholza, choć często stosowany, charakteryzuje się dość wolnym czasem działania. Wykorzystywany jest także zawór upustowy bezpieczeństwa. Niestety, funkcjonuje on wyłącznie przy niskim wzroście ciśnienia, a ponadto nie ma odpowiedniej wydajności przy zwarcu łukowym. Przedsiębiorcy często zabudowują transformatory murem, jednak to jedynie zapobiega rozprzestrzenianiu się ognia, a nie jego powstawaniu. W przypadku morskiej stacji transformatorowej możliwości jest jeszcze mniej. Jednym z rozwiązań, którego skuteczność została potwierdzona m.in. przez pozytywną ocenę Electricite de France (EDF) oraz renomowany certyfikat od niezależnego, akredytowanego laboratorium wysokiego napięcia CEPEL, czy pozytywną opinię wydaną w 2020 roku przez Oddział Zagłębia Węglowego Stowarzyszenia Elektryków Polskich, jest urządzenie znane jako Transformer Protector [14]. Pasywny mechaniczny system Transformer Protector reaguje na ciśnienie dynamiczne wewnątrz kadzi spowodowane powstałym łukiem elektrycznym. System aktywuje się w momencie pierwszego piku ciśnienia. Dzięki temu reakcja następuje zanim powstanie wysokie ciśnienie statyczne, które mogłoby rozerwać kadrę. Rozprężenie ciśnienia w kadzi jest możliwe dzięki zastosowaniu w komorze dekompresji membran bezpieczeństwa. Czas reakcji systemu na niebezpieczeństwo jest niezwykle szybki – od 0,5 do 20 milisekund. Ponadto, panel kontrolny zaraz po otrzymaniu dwóch niezależnych sygnałów z systemu inicjuje wtrysk azotu do wnętrza kadzi. Przepływ azotu wyprowadza wybuchowe gazy uniemożliwiając ich kontakt z tlenem, jednocześnie chłodząc transformator. Po usunięciu gazów wybuchowych transformator jest bezpieczny i gotowy do przekazania serwisantom.

9. Podsumowanie

Bezpieczeństwo wybuchowe w zakładach przemysłowych jest zagadnieniem bardzo obszernym. Na pełny zakres bezpieczeństwa zawsze wpływa wiele, ściśle powiązanych ze sobą czynników. Począwszy od regulacji prawnych, które określone są nie tylko prawodawstwem krajowym, ale także unijnym. Tutaj zarówno zarządzający obiektami, jak i ich projektanci czy inwestorzy zobligowa-

ni są do wdrażania odpowiednich środków bezpieczeństwa. Dobór środków bezpieczeństwa musi być zawsze poprzedzony dokładnymi analizami, gdyż potrzeby poszczególnych zakładów będą w tym zakresie różne, w zależności od przetwarzanego surowca, specyfikacji urządzeń, planu budynku itd. Nie mniej istotnym czynnikiem jest również odpowiednie przeszkolenie personelu, który będzie w danym zakładzie pracował. Statystyki jasno pokazują, że choć świadomość z zakresu bezpieczeństwa wybuchowego jest coraz wyższa, śmiertelne wypadki dalej się zdarzają i nie można tego bagatelizować. Bezpieczeństwo nie jest kwestią, która powinna pozostawać kwestią przypadku, a odpowiedzialne i rzetelne podejście do tematu może uratować niejedno życie.

References

- [1] Dyduch Z.: *Właściwości wybuchowe pyłów przemysłowych*, [w:] *Bezpieczeństwo przeciwybuchowe – wybrane zagadnienia*, praca zbiorowa, GIG, Katowice 2013.
- [2] Kordylewski W.: *Spalanie i paliwa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, wyd. V, 2008.
- [3] 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
- [4] Cloney C.: „2023 Combustible Dust Incident Report – Version #1” DustE-xResearch Ltd. / <http://dustsafetyscience.com/2023-Report>
- [5] Porowski R., D. Małocić D.: *Zagrożenia wybuchem pyłów palnych oraz metody zapobiegania*, BITP, Vol. 28, Issue 4, 2012.
- [6] Dyrektywa 1999/92/WE Parlamentu Europejskiego I Rady z dnia 16 grudnia 1999 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników zatrudnionych na stanowiskach pracy, na których może wystąpić atmosfera wybuchowa (piętnasta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG).
- [7] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego I Rady 2014/34/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej.
- [8] <https://corona1.eu/hrd/>
- [9] <https://corona1.eu/przerywacze-ognia-bezplomieniowe-odciazanie/>
- [10] <https://bezpieczenstwo40.pl/>
- [11] Glinka T., Szymaniec S.: *Eksploatacja i diagnostyka maszyn elektrycznych i transformatorów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019.
- [12] Buchacz J. (red.): *Ramona Instrukcja Eksploatacji Transformatorów*, ZPBE Energo pomiar-Elektryka, Gliwice 2022.
- [13] <https://www.powermag.com/investigating-the-sayano-shushenskaya-hydro-power-plant-disaster/>
- [14] <https://corona1.eu/transformer-protector/>