

Zdolność do akumulacji ładunku elektrostatycznego wybranych tworzyw sztucznych

Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2020-2022, w zakresie projektów badawczych i rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

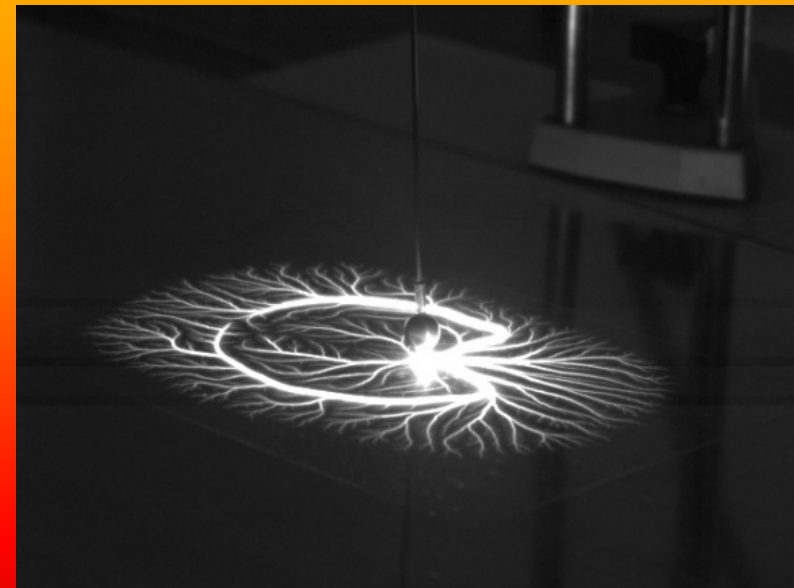
Projekt nr II.PB.23

pt. *Badania ładunku elektrostatycznego akumulowanego w objętości materiału nieprzewodzącego*

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Wprowadzenie

- Zjawiska elektrostatyczne są przyczyną wielu zdarzeń niebezpiecznych. W świadomości społecznej głęboko zakorzeniony jest wybuch, jako jeden z możliwych skutków wyładowania elektrostatycznego, co jest jak najbardziej słusznym podejściem. Typowa energia, która jest wydzielana do otoczenia w momencie powstania wyładowania elektrostatycznego jest na tyle duża, że z wysokim prawdopodobieństwem doprowadzi do zapłonu mieszaniny wybuchowej.
- Wyładowanie elektrostatyczne może bowiem wpływać na pracę urządzeń kontrolno-sterujących, w związku z faktem, że temu dynamicznemu zjawisku towarzyszy powstanie impulsu elektromagnetycznego.
- Jednocześnie przepływ prądu wyładowania będzie nierozłącznie wiązał się z wydzielaniem ciepła, a to z kolei często prowadzi do mikrouszkodzeń przetwarzanych ciał, ulegających elektryzacji.
- Wreszcie ładunek elektrostatyczny może spowodować trudności w realizacji danego procesu technologicznego, np. utrudniać nadruk na powierzchni tworzyw sztucznych.



- Tworzywa sztuczne, ze względu na swoją budowę chemiczną, cechuje szereg wyróżników, jak np. niska przewodność cieplna, możliwość formowania w określonej temperaturze, dość dobra odporność chemiczna, ale także niska przewodność elektryczna, co determinuje skłonność tych materiałów do akumulacji ładunku elektrostatycznego.
- Uzyskanie pożądanego poziomu bezpieczeństwa w przedsiębiorstwie jest procesem długotrwałym, wymagającym wieloaspektowego podejścia osób kompetentnych, tj. zarówno technologów, inżynierów utrzymania ruchu, dyżurnych służb technicznych, wreszcie specjalistów z zakresu ochrony przeciwpożarowej, przeciwwybuchowej, jak również w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy. Jeżeli jednym z obszarów wymagających uwagi jest zjawisko elektryczności statycznej, z pomocą przychodzi niniejszy zestaw wskaźników, który w prawdzie stanowi jedynie niewielki przyczynek do poprawnej realizacji opisanego powyżej procesu budowania bezpiecznego środowiska pracy w danym zakładzie produkcyjnym, jednak stanowi szereg wskaźników opartych o empiryczne wyniki badań tworzyw sztucznych w różnych warunkach otoczenia, tj. przy zmiennej temperaturze i wilgotności względnej.



Podstawowe pojęcia



- **Atmosfera wybuchowa** – mieszanina materiału palnego z powietrzem atmosferycznym, która na skutek oddziaływania bodźca energetycznego może ulec zapłonowi, a spalanie rozprzestrzeni się na całą niespaloną mieszaninę. Materiał palny ma postać gazu, par cieczy palnych lub pyłu (ewentualnie ich mieszaniny). Każdą mieszaninę wybuchową charakteryzują granice wybuchowości, tj. granice stężeń, w których wybuch jest możliwy.
- **Dokument Zabezpieczenia Przed Wybuchem (DZPW)** – operat, którego przygotowanie jest konieczne przed udostępnieniem miejsca pracy*, na którym może występować zagrożenie wybuchem. Podstawą do stwierdzenia konieczności opracowania DZPW jest występowanie potencjalnego źródła emisji substancji palnej (gazowej, par cieczy palnej, ciał stałych rozdrobionych do postaci pyłu lub cząstek lotnych, mających zdolność do wytworzenia wybuchowej mieszaniny z powietrzem). Dokument zawiera analizę ryzyka wystąpienia wybuchu, określa warunki bezpieczeństwa (techniczne i organizacyjne), itd.

**§7 ust. 1 Rozporządzenia Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej 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. 2010 r. Nr 138, poz. 931).*

- **Dyrektywa ATEX** – 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 (Dz. Urz. UE L 94/65). Jest jednym z najważniejszych dokumentów warunkujących podejście do ochrony przed wybuchem, wprowadzona do polskiego porządku prawnego poprzez Rozporządzenie Ministra Rozwoju z dnia 6 czerwca 2016 r. w sprawie wymagań dla urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej (Dz.U. 2016 poz. 817).
- **Dyrektywa ATEX USER** – 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) (Dz.U. L 023, 28.1.2000, p.57), określająca wymogi BHP w kontekście zagrożenia wybuchem występującego w przedsiębiorstwie. Wprowadzona do polskiego porządku prawnego poprzez 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. 2010 nr 138 poz. 931).

- **Ekranowanie urządzeń** – ograniczanie wpływu zewnętrznych pól EM na pracę urządzeń (i analogicznie wpływu urządzenia na otoczenie) poprzez stosowanie uziemionych przewodzących ekranów, obudów czy też tzw. *klatki Faradaya*.
- **Jonizacja powietrza** – sposób przeciwdziałania elektryzacji materiałów poprzez poddawanie oddziaływaniu strumienia powietrza naelektryzowanego przeciwnie (względem materiału). Jonizacji dokonuje się zwykle poprzez wyładowanie koronowe, powstające na specjalnie zaostzonych elektrodach. Jest to jedna z aktywnych metod przeciwdziałania wyładowaniom ESD.

- **Pył palny** – rozdrobniony materiał palny, którego rozmiar nie przekracza 500 μm . Typowymi przedstawicielami grupy pyłów palnych są: pyły tworzyw sztucznych, pyły pochodzenia organicznego (biomasa, mąka, cukier), pyły pochodzące ze szlifowania, itp.
- **Wyładowanie elektrostatyczne (ESD)** – zjawisko polegające na przepływie ładunku elektrycznego przez kanał zjonizowanego gazu (typowo: powietrza), powodujący wydzielenie do otoczenia energii w postaci ciśnienia akustycznego (dźwięku), promieniowania elektromagnetycznego oraz ciepła.

Mechanizm elektryzacji

Elektryzacja poprzez wpływ

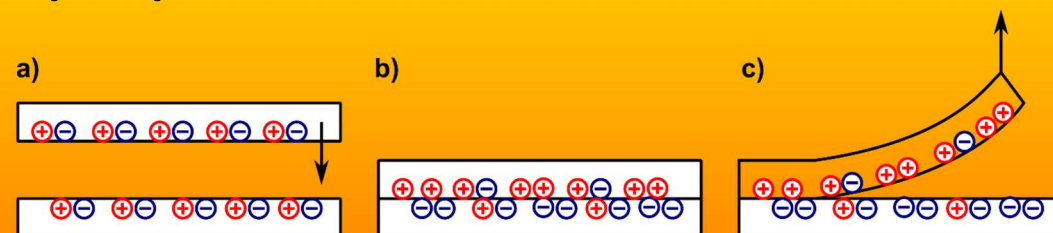
W obecności pola elektrycznego będzie dochodzić do przemieszczania się ładunków elektrycznych w obiektach eksponowanych na to pole (np. przybliżanie innego naelektryzowanego obiektu). Od takich parametrów, jak rezystywność powierzchniowa i skrośna czy przenikalność elektryczna zależą skuteczność elektryzacji.

Obiekt (zwany dalej: obiektem przewodzącym) odizolowany jest od potencjału ziemi, wykonany z przewodzącego materiału. W sąsiedztwie pojawia się drugi obiekt (zwany dalej: obiektem źródłowym), również pozbawiony kontaktu z uziemieniem, będący źródłem pola elektrycznego (aktywnym, np. jest podłączony do źródła napięcia, lub pasywnym, np. jest naelektryzowanym materiałem nieprzewodzącym).

Oddziaływanie pola elektrycznego źródła powoduje migrację nośników ładunku ujemnego oraz dodatniego w przeciwne strony, odpowiednio od źródła i do źródła. Zatem na przeciwległych ścianach obiektu przewodzącego wytworzony został ładunek o przeciwnych znakach, o wartości wynikającej z napięcia elektrostatycznego źródła, pomniejszonego w związku ze skończoną przenikalnością dielektryczną ośrodka (typowo: powietrza). Przy czym suma ładunku elektrycznego w objętości ciała pozostaje zerowa, zgodnie z zasadą zachowania ładunku.

W przypadku uziemienia obiektu, elektrony (nośniki ładunku ujemnego) spłyną do ziemi. Po odłączeniu uziemienia, w objętości materiału przewodzącego pozostanie nadmiar ładunku dodatniego. Jeżeli obiekt źródłowy zostanie usunięty poza zasięg oddziaływania wytworzonego przezzeń pola elektrycznego, pozostały na obiekcie przewodzącym ładunek dodatni rozłoży się równomiernie w jego objętości. Jeżeli jednak obiekt przewodzący pozostanie uziemiony, po usunięciu obiektu źródłowego, potencjał zostanie wyrównany względem uziemienia.

Elektryzacja poprzez kontakt



W obrębie materiału, za warunki początkowe można przyjąć sytuację, w której na jego powierzchni występuje równowaga ładunków elektrostatycznych (rys. a). Po powstaniu tzw. *interfejsu* pomiędzy dwoma obiektami, ładunki będą przemieszczać się na jego drugą stronę (rys. b). Zjawisko to jest tym intensywniejsze, im dalej od siebie w tzw. *szeregu tryboelektrycznym* będą się znajdować, znaczenie ma także rezystywność. Po ponownym rozłączeniu materiałów (rys. c), ładunki nie będą miały odpowiednio dużo czasu, aby migrować z powrotem i tym samym zapewniać lokalną równowagę. W ten sposób na jednym z materiałów powstawać będzie ładunek dodatni, na drugim ładunek ujemny. Zestawienie materiałów pod względem biegunowości i wielkości ładunku gromadzonego przez ciało podczas zetknięcia i rozdzielania dwóch ciał, wynikające z różnic prac wyjścia elektronów w tych materiałach.

*Elektryzacja poprzez zjonizowane powietrze**

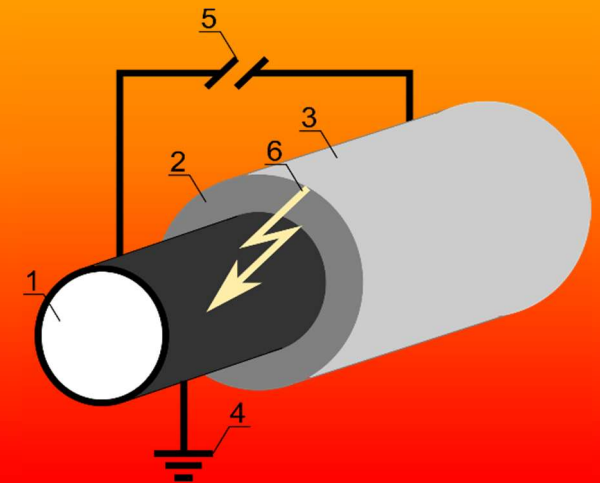
Wiąże się ze stosowaną powszechnie metodą zabezpieczania procesów technologicznych. W urządzeniu zwanym jonizatorem powietrza stosuje się wysokie napięcie, aby wywołać wyładowanie koronowe wokół elektrod ostrzowych (czyli o bardzo małym promieniu krzywizny). W ten sposób przepływające powietrze ulega jonizacji, zależnie od polaryzacji przyłożonego w jonizatorze napięcia. Tym sposobem strumień zjonizowanego powietrza, docierając do pobliskiego obiektu, przekazuje posiadany ładunek elektryczny, powodując elektryzację tego obiektu.

**W części piśmiennictwa mechanizm ten nie jest uznawany jako oddzielny w stosunku do wpływu i kontaktu, jednak ze względu na specyfikę zjawiska, wydaje się rozsądne, dla lepszego zrozumienia, traktować strumień zjonizowanego powietrza (niezależnie od przyczyny tej jonizacji) jako oddzielny mechanizm.*

Przypadki zdarzeń

Elektryzacja aerozolu

- Medium przesyłane było stalową zabezpieczoną antykorozyjnie rurą (1). Izolację termiczną stanowiła wełna szklana (2).
- Zewnętrzną warstwę stanowił płaszcz ochronny (3), wykonany z galwanizowanej blachy stalowej.
- Po zakończeniu prac montażowych w pobliżu rurociągu (budowa trasy kablowej), zauważono, że pomiędzy płaszczem ochronnym a połączeniem kołnierzowym rurociągu dochodzi do regularnych wyładowań elektrostatycznych iskrowych (6).
- Ponieważ rurociąg (1) jest uziemiony (4), pierwszym wnioskiem jest fakt, że płaszcz ochronny (3) musi gromadzić ładunek elektrostatyczny, który narastając powoduje wzrost potencjału i wyładowanie, po przekroczeniu wartości progowej, jaką jest wytrzymałość dielektryczna powietrza (ok. 3,2 MV/m).
- Jak wyjaśniono w trakcie oględzin, podczas prowadzonych prac montażowych doszło do uszkodzenia połączenia wyrównawczego pomiędzy płaszczem a rurociągiem (5).
- Pozostawało jednak pytanie, co stanowiło źródło elektryzacji. W pierwszej kolejności podejrzenia padły na nowopowstałą trasę kablową, jednak pomiary potwierdziły, że zastosowane kable nie stanowią źródła pola elektromagnetycznego, mogącego doprowadzić do elektryzacji sąsiadującego rurociągu.
- Podczas pomiarów wykryto jednak wyróżniające się spośród tła pole elektryczne, już w odległości ok. 1 m od miejsca powstawania wyładowań elektrostatycznych. W miejscu tym zidentyfikowano także nieszczelność rurociągu. Wytwarzany w ten sposób aerozol (cząsteczki wody i para wodna) stanowił źródło elektryzacji.

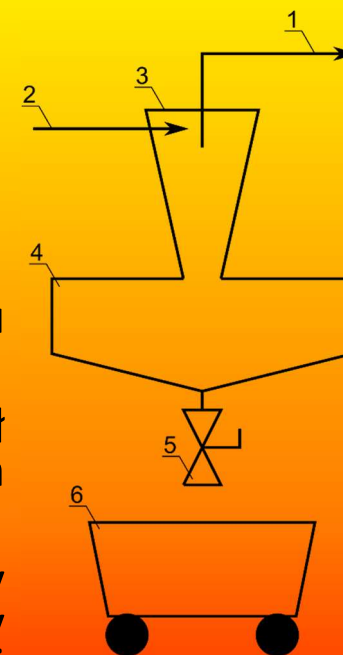


Elektryzacja aerozolu

- Mechanizm powodujący to zjawisko to elektryzacja poprzez kontakt. W trakcie wypływu medium, aerozol opuszczając rurociąg, w pewnym momencie stykał się i ponownie tracił kontakt z płaszczem ochronnym, przez co rozdzielany był ładunek. W obłoku pary, podczas kondensacji zachodziło zjawisko podobne, tj. wytwarzane cząstki cieczy rozdzielały się, generując przeciwne ładunki elektrostatyczne. Tłumaczy to obecność pola elektrycznego w obrębie wycieku pary.
- Rozwiązaniem tego problemu było przede wszystkim zatrzymanie wycieku. Jest to tylko jeden z elementów łańcucha zdarzeń, które mogły doprowadzić do wybuchu. Szczęśliwie wyładowania zostały szybko zauważone, a w ich obrębie nie pojawiła się atmosfera wybuchowa. Był to bowiem jedyny brakujący element czynników koniecznych do powstania wybuchu.
- Dokonano pomiarów rezystancji płaszcza ochronnego względem ziemi. Wynik przekraczał wartość 1 M Ω , co wobec wymogu zapewnienia połączenia z uziemieniem o rezystancji nie większej niż 10 Ω (wg PN EN 61430) stanowi oczywiste źródło problemu. Najprostsze i zarazem najskuteczniejsze w tej sytuacji jest wykonanie trwałego połączenia galwanicznego płaszcza ochronnego i rurociągu. W ramach organizacyjnych środków zaradczych, zalecane jest wyraźne oznakowanie punktów uziemiających oraz ich każdorazowa wzrokowa kontrola przez pracowników i służby utrzymaniowe.
- Podsumowując, w powyższym zdarzeniu zauważyć należy, że poza jednym, wszystkie czynniki konieczne do powstania wybuchu zostały spełnione, tak więc niewystąpienie zdarzenia było dziełem przypadku. Rurociąg technologiczny nie był właściwie zabezpieczony i/lub konserwowany, skoro tak łatwo mogło dojść do wyprowadzenia punktu pracy systemu poza bezpieczną granicę.

Elektryzacja nieprzewodzącego pyłu

- Do drugiego zdarzenia doszło podczas procesu transportu pyłu nieprzewodzącej substancji
- Pokazany na schemacie fragment procesu technologicznego obejmował przesyp grawitacyjny pyłu termoplastycznego polimeru, jakim jest octan celulozy.
- Należy zauważyć, że zagrożenie należy rozszerzyć na dowolny nieprzewodzący pył, który transportowany jest czy to pneumatycznie, czy grawitacyjnie. W tego typu sytuacjach dochodzi bowiem do elektryzacji poprzez kontakt, tj. tuż po rozdzieleniu dwóch części pojawi się nierównowaga ładunków elektrycznych (np. po zderzeniu dwóch części materiału podczas swobodnego spadania w powietrzu).
- Dzięki podciśnieniu wytwarzanemu w instalacji (1) pył transportowany jest pneumatycznie (2). W odpylaczu cyklonowym (3) pył jest separowany, po czym trafia do leja samowyladowczego (zasobnika – 4). Po otwarciu zaworu motylkowego (5), pył trafia do wózka transportowego (6).



Elektryzacja nieprzewodzącego pyłu

- W opisywanym zdarzeniu pracownik zeznawał, że po otwarciu zaworu usłyszał wybuch, zobaczył błysk płomienia, a w otoczeniu urządzenia pojawił się pył zawieszony w powietrzu. Odczuwalny był także zapach spalonej substancji. Szczęśliwie, zdarzenie nie spowodowało obrażeń pracownika ani znaczących strat finansowych, przy czym można to uznać za szczęśliwy zbieg okoliczności.
- Nie bez przyczyny do wybuchu doszło w momencie otwarcia zaworu motylkowego. Jak wspomniano powyżej, transport pneumatyczny pyłu nieprzewodzącego powoduje najczęściej jego elektryzację.
- Jeżeli transport odbywa się przewodzącym, uziemionym rurociągiem, a także obudowy zasobnika i separatora są skutecznie uziemione, cząstki pyłu zderzając się z tymi elementami oddają ładunek, przez co stopień elektryzacji jest znikomy.
- Zawór motylkowy składa się z metalowej obudowy, która stanowiąc ciąg technologiczny (także i w omawianym przypadku) jest uziemiona. Część czynną zaworu stanowi jednak dysk, obracający się wokół swojej osi. Kiedy zawór jest zamknięty, dysk dotyka metalowej obudowy. Po jego otwarciu, warunki uziemienia mogą ulegać drastycznemu pogorszeniu, zależnie od sposobu łożyskowania wału zaworu i wykorzystanych materiałów konstrukcyjnych.
- W opisywanym przypadku, w toku postępowania powypadkowego udowodniono, że dysk w zastosowanym zaworze motylkowym, po jego otwarciu, przestawał być uziemiony. Ładunek elektrostatyczny, przekazywany z poruszającego się poprzez zawór pyłu, nie miał zatem możliwości swobodnego odpłynięcia do uziemienia, przez co potencjał elektryczny dysku wzrastał znacząco. Po przekroczeniu wartości krytycznej, nastąpiło wyładowanie iskrowe pomiędzy dyskiem zaworu motylkowego a uziemioną obudową.
- Podsumowując, stosowanie skutecznego uziemienia jest zwykle podstawowym środkiem zabezpieczającym przed powstawaniem wyładowań elektrostatycznych. Przytoczony przykład dowodzi, jak ważna jest drobiazgowo weryfikacja, czy rzeczywiście zastosowane środki bezpieczeństwa są wystarczające.

Elektryzacja tworzyw sztucznych

- Podczas elektryzacji kontaktowej, dochodzi właśnie do migracji elektronów, co wynika z różnic pomiędzy wartościami prac wyjścia dla poszczególnych materiałów.
- Aby to zjawisko ograniczyć, wprowadza się pojęcie szeregów tryboelektrycznych.
- Porządkują one materiały pod względem skłonności do elektryzacji, dzieląc na donory, elektryzujące się dodatnio (zwykle materiały pochodzenia organicznego) oraz akceptory, elektryzujące się ujemnie (typowo tworzywa sztuczne).
- Klasyfikacja wynika w rzeczywistości z wartości pracy wyjścia elektronu.
- Należy ją interpretować w taki sposób, że elektryzacja dodatnia dotyczy materiału położonego wyżej w szeregu, tj. bliżej końca kontinuum oznaczonego znakiem „+”.
- Przykład szeregu tryboelektrycznego, opracowanego na podstawie badań materiałów wykonanych z tworzyw sztucznych, przedstawiono poniżej:

Przykład szeregu tryboelektrycznego

(ładunek ujemny) HPVC–SPVC–COPP–HOMOPP–LDPE–HDPE–PET–RUBBER–
-HIPS–Calibre–ABS–GPPS–PMMA (ładunek dodatni),

gdzie:

- HPVC – ang. *hard polyvinyl chloride*, polichlorek winylu.
- SPVC – ang. *soft polyvinyl chloride*, uplastyczniony polichlorek winylu.
- COPP – ang. *co-polypropylene*, kopolimer polipropylenu.
- HOMOPP – ang. *homo polypropylene*, homogeniczny polipropylen.
- LDPE – ang. *low density polyethylene*, polietylen niskiej gęstości.
- HDPE – ang. *high density polyethylene*, polietylen wysokiej gęstości.
- PET – ang. *polyethylene terephthalate*, politetraftalan etylenu.
- RUBBER – guma.
- HIPS – ang. *High impact polystyrene*, wysokoudarowy polistyren.
- Calibre – nazwa producenta poliwęglanu.
- ABS – ang. *acrylonitrile butadiene styrene*, kopolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy.
- GPPS – ang. *general purpose polystyrene*, polistyren ogólnego przeznaczenia.
- PMMA – ang. *polymethyl methacrylate*, polimetakrylan.

UWAGA:

Optymalizacja bezpieczeństwa przy pracy z polimerami wiąże się z takim doborem współpracujących materiałów, aby znajdowały się jak najbliżej siebie w szeregu tryboelektrycznym! Wówczas powstający ładunek elektrostatyczny będzie zminimalizowany.

Wpływ wilgotności i temperatury
otoczenia na elektryzację
tworzyw sztucznych

Wpływ temperatury i wilgotności

- Istotne znaczenie dla procesu elektryfikacji ma wilgotność otoczenia, zwykle podawana jako wartość wilgotności względnej (RH, ang. *relative humidity*).
- Mechanizm polega na absorpcji wilgoci przez dane ciało, co prowadzi do obniżenia jego rezystywności. Należy zaznaczyć, że nie każdy materiał będzie przejawiał tego typu skłonność.
- Polimeryczne węglowodory, czyli tworzywa sztuczne składające się z długich łańcuchów węglowych, w których podstawnikami są atomy wodoru lub proste węglowodory, np. popularnie stosowany polietylen czy polipropylen, cechuje niska skłonność do absorpcji wody z otoczenia, a zatem, w konsekwencji, niewielki jest wpływ wilgotności na obniżenie skłonności materiału do elektryzacji.
- Typowo, w temperaturze pokojowej, przy zwiększeniu wilgotności otoczenia z 20 do 80%, należy spodziewać się obniżenia rezystywności materiału politetrafluoroetyleny (PTFE, teflon) o ok. jeden rząd wielkości, polietyleny / polipropyleny o około dwa rzędy wielkości, poliamidu o ok. 6 rzędów wielkości.
- Jednocześnie polimer pochodzenia naturalnego, jakim jest celuloza, zareaguje obniżeniem rezystywności również o ok. 6 rzędów wielkości.

Wpływ temperatury i wilgotności

- Gromadzenie ładunku elektrostatycznego w objętości materiału ma także przyczyny związane z adsorpcyjnością materiałów i nieodzowną obecnością (poza pewnymi rejonami planety) pary wodnej w powietrzu atmosferycznym.
- Zachodzi w nim zjawisko powstawania jonów H^+ oraz OH^- , choć w niewielkim stopniu, sięgającym jednej parze przypadającej na ok. 10 milionów cząsteczek wody.
- Mimo wysokiej mobilności cząsteczek pary wodnej (oraz powstałych jonów), zjawisko adsorpcji ładunku elektrostatycznego jest zatem bardzo ograniczone. Jednocześnie samorzutnie zachodzi zjawisko analogiczne (desorpcji), a więc ruch ładunków elektrycznych jest obustronny.

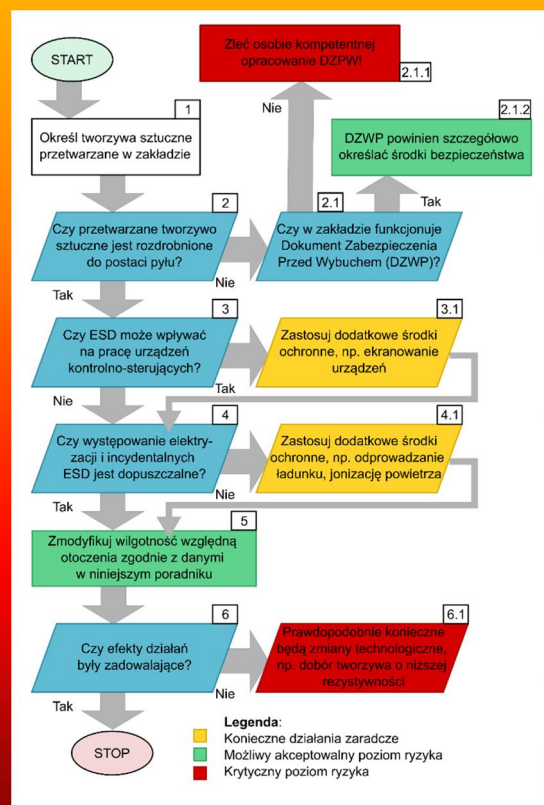
Wpływ temperatury i wilgotności

- Należy podkreślić, że powyższej przytoczona reguła, mówiąca o tym, że materiał elektryzuje się dodatnio po kontakcie z ciałem umieszczonym niżej w szeregu tryboelektrycznym, obowiązuje dla tych samych warunków otoczenia.
- Jeżeli np. powierzchnia kontaktu dwóch ciał jest różna, elektryzacja może przebiegać inaczej.
- Zjawisko to tłumaczy Henry, podając pod rozwagę przykład smyczka wykonanego z końskiego włosia, poruszającego się po strunie wiolonczeli.
- Ponieważ zasadniczo różna jest powierzchnia kontaktu tychże dwóch ciał (w przybliżeniu to samo miejsce struny, w odniesieniu do całej powierzchni smyczka), na skutek tarcia dochodzi do podniesienia temperatury struny.
- Sprawia to, że elektrony na powierzchni struny mają wyższą energię niż w temperaturze początkowej. W tej sytuacji to metalowa struna będzie elektryzować się dodatnio, podczas gdy smyczek ujemnie.

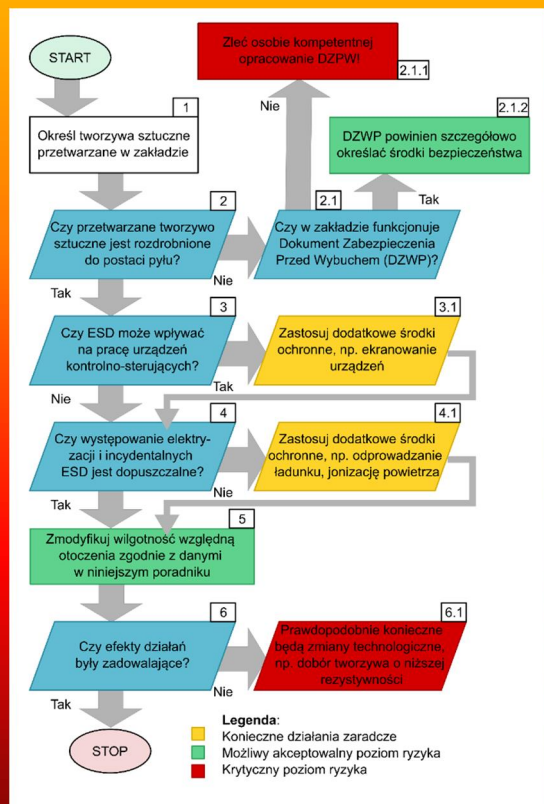
Metody przeciwdziałania

- Opracowano algorytm postępowania:
 - W odniesieniu do rozdrobionych tworzyw sztucznych
 - W odniesieniu do nierozdrobionych tworzyw sztucznych

Tworzywa rozdrobnione



- Czy w rozpatrywanym zakładzie / procesie technologicznym przetwarza się tworzywa sztuczne, jeżeli tak – jakie?
- Czy zidentyfikowane tworzywa sztuczne rozdrobnione są do postaci pyłu?
 - Dokonaj sprawdzenia, czy w Zakładzie funkcjonuje Dokument Zabezpieczenia Przed Wybuchem (DZPW), wymaganym prawem przed udostępnieniem miejsca pracy, **na którym może występować atmosfera wybuchowa** pracownikowi. Sprawdź, czy dokument jest aktualny, tj. czy nie doszło do zmian technologii / przebudowy / modernizacji lub zmiany innych uwarunkowań, mogących wpływać na treść dokumentu.
 - Jeżeli w zakładzie (mimo występowania rozdrobnionych tworzyw sztucznych, które mogą ulegać elektryzacji) nie funkcjonuje DZPW **należy bezwzględnie zlecić osobie kompetentnej jego przygotowanie**. UWAGA: Działanie o znaczeniu krytycznym.
 - Przystuduj DZPW pod kątem bezpieczeństwa stosowania pyłów palnych w przedsiębiorstwie. Zwykle DZPW powinien kompleksowo opisywać poziom zagrożeń, definiować środki zaradcze, itp. Uwaga: ten dokument stanowi jeden z elementów niezbędnych kroków w celu zapewnienia właściwego poziomu bezpieczeństwa.
- Należy określić, czy aktualny stan elektryzacji materiałów może wpływać na pracę urządzeń kontrolujących i/lub sterujących procesem technologicznym, ale także urządzeń mających kluczowy wpływ na bezpieczeństwo procesu. Zapewnienie niezawodności tego typu urządzeń ma decydujący wpływ na ogólny poziom bezpieczeństwa.
 - Zalecane jest zastosowanie innych rozwiązań (nieobjętych niniejszym poradnikiem) mających na celu ochronę urządzeń przed wpływami elektromagnetycznymi.

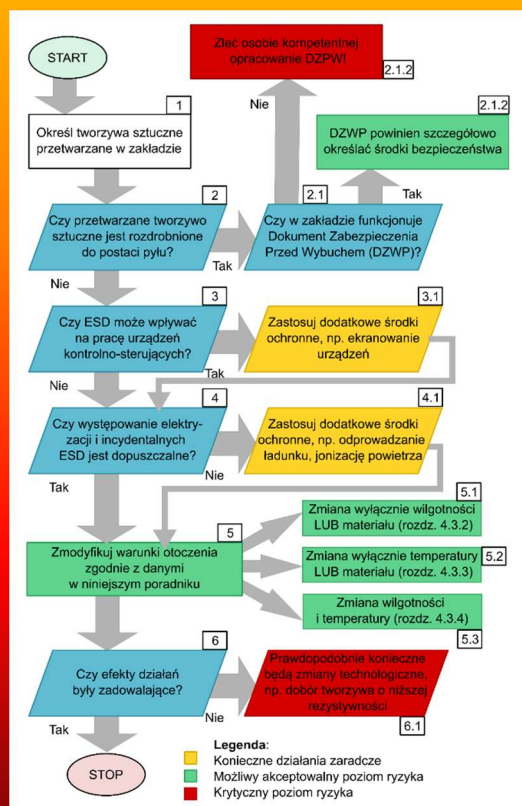


- W niektórych procesach technologicznych powstawanie pojedynczych wyładowań niewielkiej mocy jest dopuszczalne i nie wpływa negatywnie na proces technologiczny, nie prowadzi także do zagrożenia wybuchem (brak atmosfery wybuchowej w otoczeniu miejsca wyładowania). W tego typu sytuacjach zastosowanie mają dane zaprezentowane w niniejszym przewodniku.
 - Jeżeli konieczne jest całkowite wyeliminowanie wyładowań elektrostatycznych, należy dokonać dalekoidących zmian technologicznych lub wdrożyć dodatkowe środki zaradcze, mające na celu minimalizację zjawisk elektrostatycznych.
- Należy dokonać zmiany wilgotności względnej otoczenia. Badania empiryczne wykazały, że pyły wybranych tworzyw sztucznych posiadają optymalne warunki środowiskowe, w których zjawiska elektryzacji (tutaj: poprzez wyładowanie niezupełne koronowe) przebiegają mniej intensywnie

		Pył tworzywa sztucznego:					
		HDPE	PE	PC	PET	PTFE	PVC
Wilgotność względna otoczenia [%RH]	T=20°C						
	50	*	*	*	*	*	*
	55						
	60						
	65						
	70						
	75						
	80						
	85						

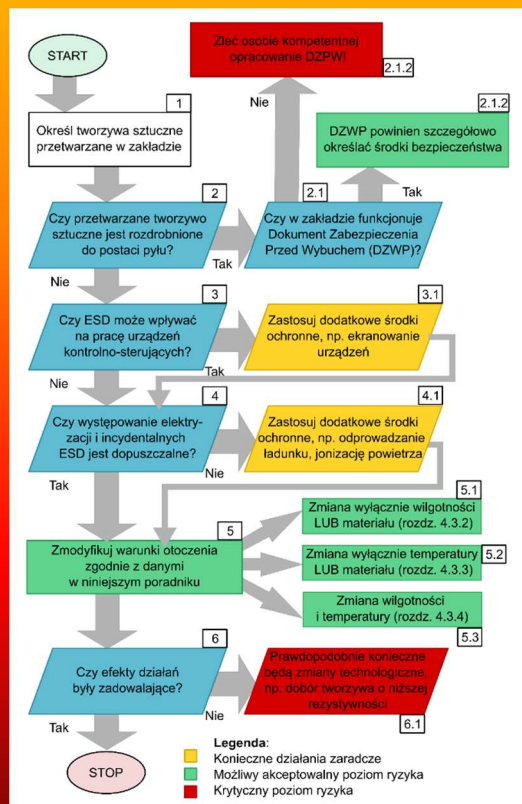
- Należy dokonać ponownej analizy, czy zmiany przyniosły pożądany skutek. W tym celu konieczna jest analiza pod kątem bezpieczeństwa wybuchowego (w tym aktualizacja DZPW), pod kątem wpływu zjawisk elektrostatycznych na pracę urządzeń kontrolno-sterujących, a także na sam proces technologiczny. W tym kroku zalecane jest wieloaspektowe podejście, wymagające zwykle pracy zespołu ekspertów.
 - Jeżeli NIE, konieczne będą daleko idące zmiany technologiczne lub zmiana przetwarzanego tworzywa. Sama zmiana warunków otoczenia w tym wypadku nie jest zadowalająca.

Tworzywa nierozdrobnione



Poniżej zamieszczono objaśnienia do wybranych kroków, opisanych w powyższym algorytmie.

- Czy w rozpatrywanym zakładzie / procesie technologicznym przetwarza się tworzywa sztuczne, jeżeli tak – jakie?
- Czy zidentyfikowane tworzywa sztuczne rozdrobnione są do postaci pyłu?
 - Dokonaj sprawdzenia, czy w Zakładzie funkcjonuje Dokument Zabezpieczenia Przed Wybuchem (DZPW), wymaganym prawem przed udostępnieniem miejsca pracy, **na którym może występować atmosfera wybuchowa** pracownikowi. Sprawdź, czy dokument jest aktualny, tj. czy nie doszło do zmian technologii / przebudowy / modernizacji lub zmiany innych uwarunkowań, mogących wpływać na treść dokumentu.
 - Jeżeli w zakładzie (mimo występowania rozdrobnionych tworzyw sztucznych, które mogą ulegać elektryzacji) nie funkcjonuje DZPW **należy bezwzględnie zlecić osobie kompetentnej jego przygotowanie**. UWAGA: Działanie o znaczeniu krytycznym.
 - Przestudiuj DZPW pod kątem bezpieczeństwa stosowania pyłów palnych w przedsiębiorstwie. Zwykle DZPW powinien kompleksowo opisywać poziom zagrożeń, definiować środki zaradcze, itp. Uwaga: ten dokument stanowi jeden z elementów niezbędnych kroków w celu zapewnienia właściwego poziomu bezpieczeństwa.
- Należy określić, czy aktualny stan elektryzacji materiałów może wpływać na pracę urządzeń kontrolujących i/lub sterujących procesem technologicznym, ale także urządzeń mających kluczowy wpływ na bezpieczeństwo procesu. Zapewnienie niezawodności tego typu urządzeń ma decydujący wpływ na ogólny poziom bezpieczeństwa.
 - Zalecane jest zastosowanie innych rozwiązań (nieobjętych niniejszym poradnikiem) mających na celu ochronę urządzeń przed wpływami elektromagnetycznymi.
- W niektórych procesach technologicznych powstawanie pojedynczych wyładowań niewielkiej mocy jest dopuszczalne i nie wpływa negatywnie na proces technologiczny, nie prowadzi także do zagrożenia wybuchem (brak atmosfery wybuchowej w otoczeniu miejsca wyładowania). W tego typu sytuacjach zastosowanie mają dane zaprezentowane w niniejszym przewodniku.
 - Jeżeli konieczne jest całkowite wyeliminowanie wyładowań elektrostatycznych, należy dokonać daleko idących zmian technologicznych lub wdrożyć dodatkowe środki zaradcze, mające na celu minimalizację zjawisk elektrostatycznych.



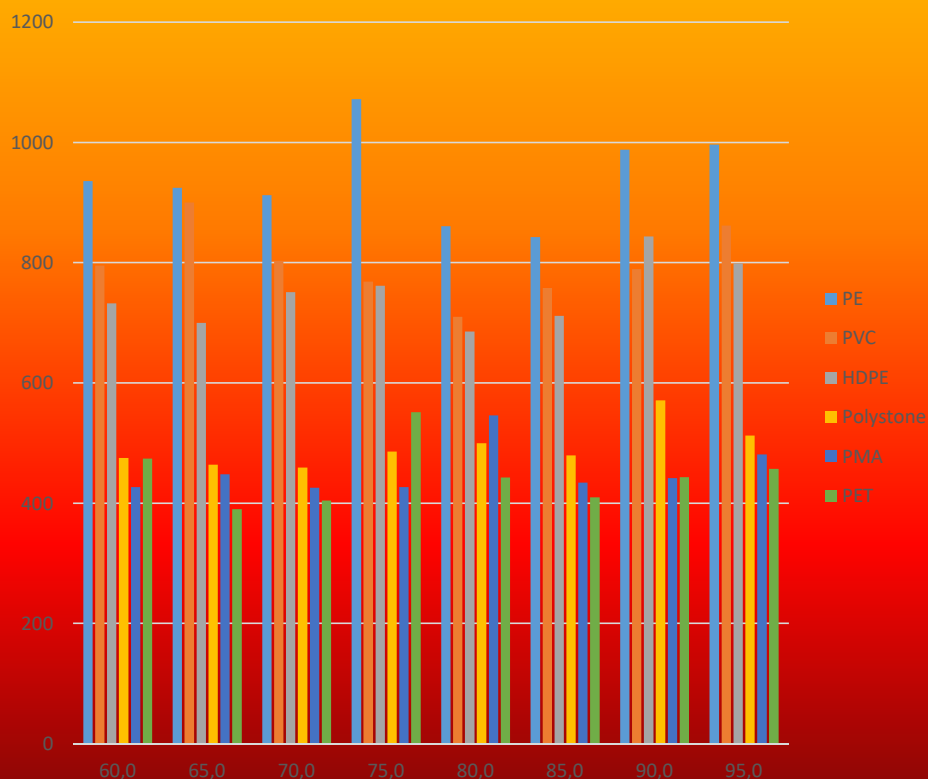
- Należy ustalić, czy zmiana warunków otoczenia jest możliwa i w jakim zakresie. Algorytm dopuszcza także możliwość zmiany przetwarzanego tworzywa sztucznego.

- Stosowny rozdział poradnika traktuje o możliwości zmiany wilgotności powietrza LUB zmianie tworzywa sztucznego.
- Stosowny rozdział poradnika traktuje o możliwości zmiany temperatury powietrza LUB zmianie tworzywa sztucznego.
- Stosowny rozdział poradnika traktuje o kierunku zmiany wilgotności i temperatury powietrza BEZ możliwości zmiany przetwarzanego tworzywa sztucznego.

- Należy dokonać ponownej analizy, czy zmiany przyniosły pożądany skutek. W tym celu konieczna jest analiza pod kątem bezpieczeństwa wybuchowego (w tym aktualizacja DZPW), pod kątem wpływu zjawisk elektrostatycznych na pracę urządzeń kontrolno-sterujących, a także na sam proces technologiczny. W tym kroku zalecane jest wieloaspektowe podejście, wymagające zwykle pracy zespołu ekspertów.

- Jeżeli NIE, konieczne będą daleko idące zmiany technologiczne lub zmiana przetwarzanego tworzywa. Sama zmiana warunków otoczenia w tym wypadku nie jest zadowalająca.

Przykład możliwości zmian parametrów procesu / zmiany materiału przetwarzanego



- Wykres prezentuje wyniki w przypadku $T = 20^{\circ}\text{C}$
- Widoczne są różnice dotyczące różnych materiałów w różnych wilgotnościach względnych.
- **Kompletne opracowanie stanowi poradnik pt. Optymalizacja warunków otoczenia i dobór tworzyw sztucznych w kontekście skłonności do akumulacji ładunku elektrostatycznego** wydany drukiem i udostępniony na stronie CIOPIB

Literatura

- Burgo TAL., Ducati TRD. et al.: Triboelectricity: macroscopic charge patterns formed by self-arraying ions on polymer surfaces. *Langmuir* 28/2012, s. 7407–7416
- Dyrektywa ATEX USER 1999/92/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z 16 grudnia 1999 r. w sprawie minimalnych wymagań dotyczących bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników zatrudnionych na stanowiskach pracy, na których może wystąpić atmosfera wybuchowa (Dz. Urz UE L 023/2000).
- Grabarczyk Z., Kurczewska A.: Zagrożenia elektrostatyczne w strefach zagrożonych wybuchem, CIOP-PIB, Warszawa, 2008.
- Kirkman T.: Advanced Physics Laboratory, College of Saint Benedict, Saint John's University, Collegeville, Minnesota, 2015.
- Lüttgens G., Wilson N.: *Electrostatic Hazards*, Elsevier, 1997.
- Park CH., Park JK., Jeon HS., Chun BC.: Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger, *Journal of Electrostatics* 2008, vol. 66, Issues 11–12, pp. 578-583.
- Ptak S., Ostrowski P.: Zjawiska elektrostatyczne w środowisku pracy – analiza zagrożeń i studium przypadku, *Bezpieczeństwo Pracy* 9/2020, s. 18-21.
- Ptak S., Smalcerz A., Ostrowski P.: Ocena ryzyka zapłonu atmosfer wybuchowych przez niezupełne wyładowania elektrostatyczne z naelektryzowanych dielektryków, CIOP-PIB, Warszawa, 2019.