

Szymon Płak

OPTYMALIZACJA WARUNKÓW OTOCZENIA
I DOBÓR TWORZYW SZTUCZNYCH
W KONTEKŚCIE SKŁONNOŚCI
DO AKUMULACJI
ŁADUNKU ELEKTROSTATYCZNEGO



Szymon Płak

**Optymalizacja warunków otoczenia
i dobór tworzyw sztucznych
w kontekście skłonności
do akumulacji
ładunku elektrostatycznego**

CIOP  PIB

Warszawa 2022

Opracowano i wydano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac 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

Autor: dr inż. Szymon Ptak

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Opracowanie redakcyjne: Kamil Jach

Projekt okładki i opracowanie graficzne: Anna Borkowska

Okładka: [stocksnap.com/](https://www.stocksnap.com/), [bigstockphoto.com/](https://www.bigstockphoto.com/), [rawpixel.com/](https://www.rawpixel.com/), [freepik.com](https://www.freepik.com/)

© Copyright by Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2022

ISBN: 978-83-7373-407-4

CIOP  **PIB**

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa

tel. (48-22) 623 46 50, fax (48-22) 623 36 93, www.ciop.pl

Spis treści

Wstęp	5
Wybrane definicje	6
Elektryzacja materiałów	8
Podstawy zjawiska	8
Elektryzacja przez kontakt	9
Elektryzacja przez wpływ (indukcję)	11
Elektryzacja tworzyw sztucznych	12
Wpływ temperatury i wilgotności	14
Algorytm postępowania – obniżenie ryzyka	16
Algorytm postępowania – tworzywo rozdrobnione (pył)	18
Algorytm postępowania – tworzywo nierozdrobnione	21
Definicja przypadku	21
Zmiana wilgotności przy tej samej temperaturze	24
Zmiana temperatury przy tej samej wilgotności	28
Zmiana wilgotności i temperatury	31
Podsumowanie	34
Literatura	36



Wstęp

Zjawiska elektrostatyczne są przyczyną wielu zdarzeń niebezpiecznych, czy niekorzystnych z punktu widzenia interesu przedsiębiorcy. 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 nie powinno być jednak postrzegane wyłącznie w tym kontekście. Może ono bowiem wpływać na pracę urządzeń kontrolno-sterujących, w związku z faktem, że dynamicznemu zjawisku wyładowania 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.

Nieprzypadkowo wymieniono właśnie tę kategorię materiałów. 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 poniższy poradnik, który stanowi co prawda jedynie niewielki przyczynek do poprawnej realizacji opisanego powyżej procesu budowania bezpiecznego środowiska pracy w danym zakładzie produkcyjnym, jednak zawiera szereg wskazówek opartych o empiryczne wyniki badań tworzyw sztucznych

w różnych warunkach otoczenia, tj. przy zmiennej temperaturze i wilgotności względnej.

Ze względu na mnogość parametrów i uwarunkowań lokalnych, wpływających na przyczyny, przebieg i skutki wyładowań elektrostatycznych, trudne jest całkowicie ilościowe podejście do tego zagadnienia. Stąd – poradnik ten ma charakter jakościowy, pozwalający na porównanie parametrów procesowych przed, jak i po potencjalnej zmianie warunków otoczenia, czy rodzaju przetwarzanego materiału. Wskazuje zatem kierunek modyfikacji procesów, przy ostateczna decyzja musi być zawsze podejmowana przez zespół ekspertów dogłębnie znających dany proces technologiczny.

Należy także nadmienić, że poradnik ten dotyczy zjawisk elektrostatycznych rozumianych od strony skłonności materiału do gromadzenia ładunku elektrycznego. Poradnik nie koncentruje się na określaniu warunków potrzebnych do powstania wyładowania określonego typu. Informacje nt. zjawiska niezupełnego wyładowania elektrostatycznego, wraz z zasadami przeciwdziałania i oceny ryzyka wystąpienia, opracowane zostały w CIOP-PIB w roku 2019 [1].

Podstawą do analizy ryzyka powstania porażenia, pożaru, czy wybuchu spowodowanego wyładowaniem elektrostatycznym jest skłonność materiału do akumulacji ładunku elektrycznego. Ograniczając prawdopodobieństwo krytycznej elektryzacji tworzywa sztucznego, ogranicza się ryzyko powstania zjawisk niekorzystnych, w szczególności porażenia, czy wybuchu

Wybrane definicje

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 pracy¹, 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 rozdrobnionych do postaci pyłu lub cząstek lotnych, mających zdolność do wytworzenia wybuchowej mieszanki z powietrzem). Dokument zawiera analizę ryzyka wystąpienia wybuchu, określa warunki bezpieczeństwa (techniczne i organizacyjne), itd.

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 elektromagnetycznych (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

¹ §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).

(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.

Elektryzacja materiałów

Podstawy zjawiska

Zagadnienia związane z elektrycznością statyczną były dostrzegane przez ludzkość już w starożytności. W ostatnich stuleciach, dzięki rozkwitowi nauki, zjawiska te poznane zostały bliżej. W ślad za rozwojem technologii półprzewodnikowej, powstała wreszcie powszechnie akceptowana teoria, tłumacząca zjawisko generacji ładunku elektrostatycznego.

Teoria bazuje na założeniu, że elektrony są emitowane z powierzchni ciała stałego, jeżeli jego temperatura jest wystarczająco wysoka. Przykładem tego typu zjawiska jest emisja termoelektronowa, która wykorzystywana jest np. w lampach elektronowych. Zjawisko opisuje prawo Richardsona [2]:

$$J = AT^2 e^{-W/kT} \quad (1)$$

gdzie: J – gęstość prądu emisji $\left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2}\right]$; $A = \frac{4\pi m k^2 e}{h^3} = 1,20173 \cdot 10^6$ – stała Richardsona $\left[\frac{\text{A}}{\text{m}^2 \text{K}^2}\right]$; T – temperatura $[\text{K}]$; W – praca wyjścia elektronu z materiału $[\text{J}]$; $k = 1,38064852(79) \cdot 10^{-23}$ – stała Boltzmannna $\left[\frac{\text{J}}{\text{K}}\right]$; m – masa elektronu $[\text{kg}]$; e – ładunek elektronu $[\text{C}]$; $h = 6,26607015 \cdot 10^{-34}$ – stała Plancka $\left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}\right]$.

Pracą wyjścia elektronu nazywa się energię niezbędną do przesunięcia elektronu z materiału do nieskończoności. Wartość ta jest indywidualna w odniesieniu do danego materiału i maleje wraz ze wzrostem temperatury ciała. Materiały nieprzewodzące, jak np. tworzywa sztuczne, cechuje wysoka wartość pracy wyjścia elektronu, z kolei w przypadku przewodników, energia ta nie jest wysoka, co wynika z dużej dostępności elektronów w paśmie przewodzenia, w porównaniu do materiałów nieprzewodzących. Bez energii dostarczonej z zewnątrz, elektron pozostaje w swoim paśmie za sprawą siły Coulomba. Zauważmy, że doprowadzenie do emisji elektronu z powierzchni materiału zaburza równowagę ładunków, co powszechnie rozumie się jako *elektryzację*.



Fot. klyaksun/Bigstockphoto

Elektryzacja przez kontakt

Jeden z mechanizmów elektryzacji rozpoczyna się w momencie, kiedy dwie powierzchnie, umownie w o tej samej temperaturze, stykają się ze sobą, tj. przyjmując się, że odległość między nimi jest rzędu nanometrów. Tworzy się wówczas *interfejs* pomiędzy dwoma ciałami i rozpoczyna się ruch elektronów w ilości zależnej od różnicy wartości pracy wyjścia obydwóch materiałów. Zgodnie z fundamentalnym założeniem Helmholtza, na styku materiałów tworzy się lustrzana warstwa ładunku. Elektrony migrują do materiału o wyższej pracy wyjścia, tworząc na nim warstwę ładunku ujemnego, i analogicznie utworzona zostaje warstwa ładunku dodatniego na powierzchni materiału, z którego nastąpiła migracja elektronów. Stan równowagi jest osiągniany, jeżeli różnica potencjałów,

odpowiadająca różnicy prac wyjścia elektronów z dwóch materiałów, będzie równa wytworzonej różnicy potencjałów w obrębie interfejsu. Zjawisko to zwane jest *elektryzacją kontaktową*.

Interfejs pomiędzy dwoma ciałami tworzy zatem obiekt fizyczny o cechach kondensatora. Jego pojemność określa się wg zależności:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (2)$$

gdzie: C – pojemność kondensatora [F]; $\epsilon_0 = 8,8541878 \cdot 10^{-12}$ – przenikalność dielektryczna próżni [$\frac{F}{m}$]; ϵ_r – względna przenikalność elektryczna ośrodka [–]; S – powierzchnia okładek kondensatora [m^2]; d – odległość między okładkami kondensatora [m].

W obrębie interfejsu pomiędzy dwoma ciałami wytwarzana różnica potencjałów jest zwykle rzędu miliwoltów, co wynika z relatywnie niewielkich różnic pracy wyjścia elektronu. Jednak ze względu na fakt, że odległość pomiędzy ciałami jest rzędu nanometrów, pojemność układu jest wysoka i zależy wyłącznie od powierzchni styczności obydwóch ciał (odpowiadającej powierzchni okładek kondensatora S), niezależnie czy układ jest w ruchu, czy pozostaje w spoczynku.

W literaturze światowej pojawia się pojęcie elektryzacji poprzez tarcie, które w domyśle sugeruje odmienny mechanizm do elektryzacji przez kontakt, opisaną powyżej. Zgodnie z aktualnym stanem wiedzy, tarcie jako proces nie wpływa na poziom elektryzacji materiałów. Jednak interakcja między dwoma ciałami, która wpływa na powierzchnię ich kontaktu (w tym wzajemne tarcie) będzie miała znaczenie dla wyniku w postaci gromadzenia ładunku elektrostatycznego, zgodnie z opisanym mechanizmem elektryzacji poprzez kontakt.

W momencie rozdzielenia dwóch obiektów, gwałtownie rośnie odległość d , a w ślad za nią gwałtownie maleje pojemność C układu. Zgromadzony ładunek elektryczny powoduje zatem wzrost różnicy potencjału elektrycznego pomiędzy powierzchniami rozdzielanego materiału. Zwiększeniu ulega także energia zgromadzona na powierzchni materiału. Pochodzi ona z siły mechanicznej przyłożonej

w celu rozdzielenia obiektów, przeciwdziałającej siłą Coulomba oddziaływania pomiędzy różnoimiennymi ładunkami zgromadzonymi na obydwóch rozdzielanych obiektach.

Elektryzacja przez wpływ (indukcję)

W kontekście zjawisk elektrostatycznych, istotne jest również zjawisko elektryzacji poprzez indukcję. W przeciwieństwie do elektryzacji przez kontakt, zjawisko to nie wymaga bezpośredniej styczności dwóch ciał. Poniżej opisano przykładowy schemat elektryzacji poprzez wpływ (indukcję), dla dwóch ciał przewodzących, z których jedno jest źródłem elektryzacji.

- 1) 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).
- 2) 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.
- 3) 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 przez pole elektryczne, 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.

W przypadku, jeżeli obiekt poddawany elektryzacji poprzez wpływ jest nieprzewodzący, mechanizm jest zbliżony, jednak ze względu na wysoką wartość rezystywności materiału, przegrupowanie ładunków elektrycznych w objętości materiału będzie powolne i ograniczone niską przenikalnością elektryczną tego typu materiałów.

Powstawanie zjawisk elektrostatycznych, jak również kilka przykładów zdarzeń rzeczywistych, opisano w artykule o charakterze naukowo-technicznym [3].

Elektryzacja tworzyw sztucznych

Pośród sposobów ograniczania elektryzacji materiałów nie można pominąć redukcji rezystancji powierzchniowej. Czym niższa rezystywność powierzchniowa, tym większe prawdopodobieństwo wyrównania potencjałów w punktach ostatniego kontaktu, przy rozdzielaniu materiałów. Można zatem domniemać wpływu prędkości rozdzielania materiałów na zdolność do elektryfikacji. Przyjmuje się, że w przypadku wartości rezystywności powierzchniowej powyżej 10^{12} Ωm gwałtownie przyrasta generowane przez zgromadzone na powierzchni materiału ładunki natężenie pola elektrycznego, przy założeniu stałej prędkości rozdzielania materiałów, czyli np. prędkości obrotowej połączenia pasowego, prędkości rozwijania roli papieru w drukarni, czy prędkości kalandrów.

Należy zauważyć, że typowa rezystancja powierzchniowa tworzyw sztucznych jest wyższa nawet o kilka rzędów wielkości od wartości podanej powyżej

Podczas elektryzacji kontaktowej, dochodzi właśnie do migracji elektronów, co wynika z różnic pomiędzy wartościami prac wyjścia dla poszczególnych materiałów. W celu ograniczenia tego zjawiska wprowadza się pojęcie szeregow trybo-elektrycznych. 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 [4]:

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

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

UWAGA:

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

W literaturze można znaleźć szeregi tryboelektryczne obejmujące także inne niż tworzywa sztuczne materiały [5,6]:

Mechanizm elektryzacji materiałów wykonanych z tworzyw sztucznych jest odmienny w przypadku wzajemnego tarcia dwóch materiałów. Zjawisko to opisał Burgo et al. [7]. Tarcie powoduje niejednakowe nagrzewanie stykających się powierzchni (np. polietylenu poruszającego się po politetrafluoroetylenie, PTFE), co doprowadza do powstawania tzw. gorących punktów (ang. *hot spot*). Dochodzi do tego na skutek nierównoległości i chropowatości obydwóch powierzchni. Przy odpowiednio wysokiej temperaturze, może dojść do plastyfikacji a także płynięcia tworzyw sztucznych, co wiąże się z pękaniem łańcuchów polimerowych. Pęknięcie wiązań chemicznych może prowadzić do produkcji wolnych rodników z wyraźnie odstającą elektroujemnością, co powoduje wytwarzanie anionów fluorowodorowych i kationów węglowodorowych (poprzez transfer elektronów). Jony ulegają uporządkowaniu według długości łańcuchów węglowodorowych, zgodnie z teorią Flory-Hugginsa, co w skali makroskopowej obserwowane jest jako elektryzacja.

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, polietylenu / polipropylenu 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.

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), ruch ładunków elektrycznych jest więc obustronny.

Należy podkreślić, że powyższej przytoczona reguła, mówiąca o tym, że materiał elektryzuje się dodatnio po kontakcie z ciałem umieszczonym niżej w szeregu tryboelektrycznym, obowiązuje w przypadku 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.

Algorytm postępowania

- obniżenie ryzyka

Poniższy poradnik prezentuje dwa algorytmy postępowania:

Algorytm nr 1 dotyczy przetwarzania tworzyw sztucznych, które rozdrobnione zostają do postaci pyłu (zgodnie z PN-EN 1127, rozmiar cząstek pyłu nie przekracza 500 μm).

Pośród typowych procesów technologicznych, podczas których dochodzi do rozdrobnienia tworzyw sztucznych należy zaliczyć:

- Mielenie, np. wytwarzanie regranulatu.
- Tarcie elementów z tworzywa sztucznego o siebie lub o inne (przede wszystkich twardsze) przedmioty.
- Cięcie tworzyw sztucznych, np. w celu dostosowania wymiarów produkowanego materiału do potrzeb klienta.
- Obrabianie, w tym skrawanie, np. kształtowanie wyrobów docelowych.
- Szlifowanie, np. ostateczna obróbka podzespołów branży motoryzacyjnej.

Treść poradnika obejmuje swoim zakresem wyłącznie temperaturę 20°C, tj. typową temperaturę otoczenia. Jak wykazują liczne badania naukowe, wpływ temperatury na przewodność pyłów tworzyw sztucznych jest ograniczona. Najważniejszym elementem jest w tym przypadku wilgotność względna powietrza, ponieważ na powierzchni tworzyw sztucznych dochodzi do intensywnej adsorpcji jonów OH^- / desorpcji jonów H^+ z grup karboksylowych polimeru (utlenianie powierzchni), co zaobserwowano np. dla próbek polietylenu [7]. Warto zauważyć, że w opisywanym artykule uzyskano stan równowagi materiału tworzywa sztucznego przy potencjale powierzchniowym ok. $-4,6 \pm 0,7$ V, co oznacza, że w warunkach przechowywania badany polietylen nie pozostawał obojętny elektrostatycznie.

Należy podkreślić, że prezentowany w poradniku algorytm postępowania stanowi całościowe podejście do kwestii bezpieczeństwa w zakładzie, gdzie dochodzi do przetwarzania tworzyw sztucznych. Oznacza to, że modyfikacja wilgotności względnej powietrza jest końcowym krokiem, który może doprowadzić do poprawy warunków bezpieczeństwa. Konieczne jest jednak potraktowanie algorytmu jako wskazówek (kolejności!) postępowania. Wyłącznie takie podejście jest w stanie zapewnić pożądane rezultaty, w szczególności akceptowalny poziom ochrony przed wybuchem (w tym wymuszenie stosowania zintegrowanych zasad bezpieczeństwa przeciwwybuchowego, wynikających z dyrektywy ATEX USER [8]), zapewnienia bezpiecznych warunków pracy i niezawodności urządzeń kontrolno-sterujących, itd.

Algorytm nr 2 dotyczy tworzyw sztucznych przetwarzanych bez rozdrobnienia.

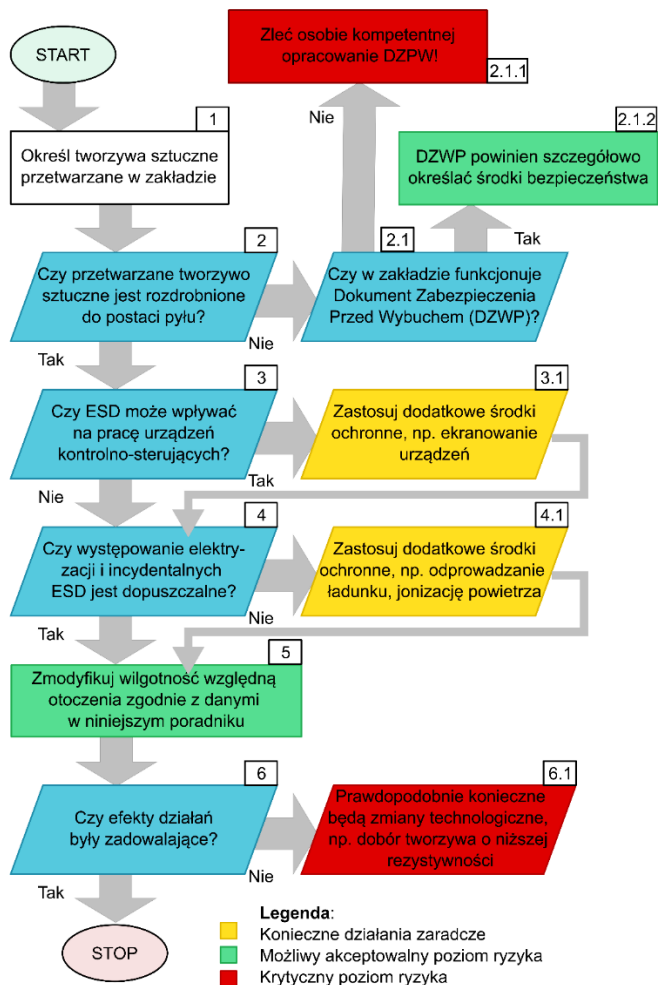
W tym przypadku sugeruje się kolejność postępowania w przypadku obrabiania tworzyw sztucznych w postaci nierozdrobnionej, tj. w formie płyt, rolek, detali z tworzyw sztucznych, itp. Wszędzie tam, gdzie pojawia się zjawisko elektryzacji, należy dokonać szczegółowej analizy przyczyn lokalnych zjawiska, jego skali, możliwego wpływu na procesy technologiczne i ogólnie pojmowane bezpieczeństwo.

UWAGA:

Tego typu badania cechuje stosunkowo duża niepewność pomiaru, co wynika z ich natury. Prezentowane algorytmy należy traktować jako wskazanie kierunków optymalizacji zjawisk elektrostatycznych w danych procesie technologicznym / produkcyjnym

Warto nadmienić, że zakres poradnika zawężony jest do tworzyw sztucznych. Właściwa ocena ryzyka wybuchu, ale także komplementarna ocena rzeczywistego poziomu zagrożeń związanych z wyładowaniami elektrostatycznymi wymaga znacznie szerszego podejścia i nie jest objęta w treści tej publikacji.

Algorytm postępowania - tworzywo rozdrobnione (pył)



Rysunek 1. Algorytm (1) postępowania w przypadku przetwarzania w zakładzie przemysłowym rozdrobnionych tworzyw sztucznych

Poniżej zamieszczono objaśnienia do wybranych kroków, opisanych w algorytmie (rys. 1).

1. Czy w rozpatrywanym zakładzie / procesie technologicznym przetwarza się tworzywa sztuczne, jeżeli tak – jakie?
2. Czy zidentyfikowane tworzywa sztuczne rozdrobione są do postaci pyłu?
 - 2.1. 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.
 - 2.1.1. Jeżeli w zakładzie (mimo występowania rozdrobionych tworzyw sztucznych, które mogą ulegać elektryzacji) nie funkcjonuje DZPW **należy bezwzględnie zlecić osobie kompetentnej jego przygotowanie**. **UWAGA: Działanie o znaczeniu krytycznym**.
 - 2.1.2. 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.
3. 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.
 - 3.1. Zalecane jest zastosowanie innych rozwiązań (nieobjętych niniejszym poradnikiem) mających na celu ochronę urządzeń przed wpływami elektromagnetycznymi.
4. 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 tym poradniku.

- 4.1. Jeżeli konieczne jest całkowite wyeliminowanie wyładowań elektrostatycznych, należy dokonać daleko idących zmian technologicznych lub wdrożyć dodatkowe środki zaradcze, mające na celu minimalizację zjawisk elektrostatycznych.
5. 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. Na rys. 2 przedstawiono grafikę podsumowującą wyniki badań empirycznych. Uwaga: wyniki dotyczą temperatury 20°C.

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

Rysunek 2. Graficzne przedstawienie zakresów stosowalności pyłów wybranych tworzyw sztucznych w temperaturze $T = 20^{\circ}\text{C}$ w różnych wilgotnościach względnych powietrza

6. 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.

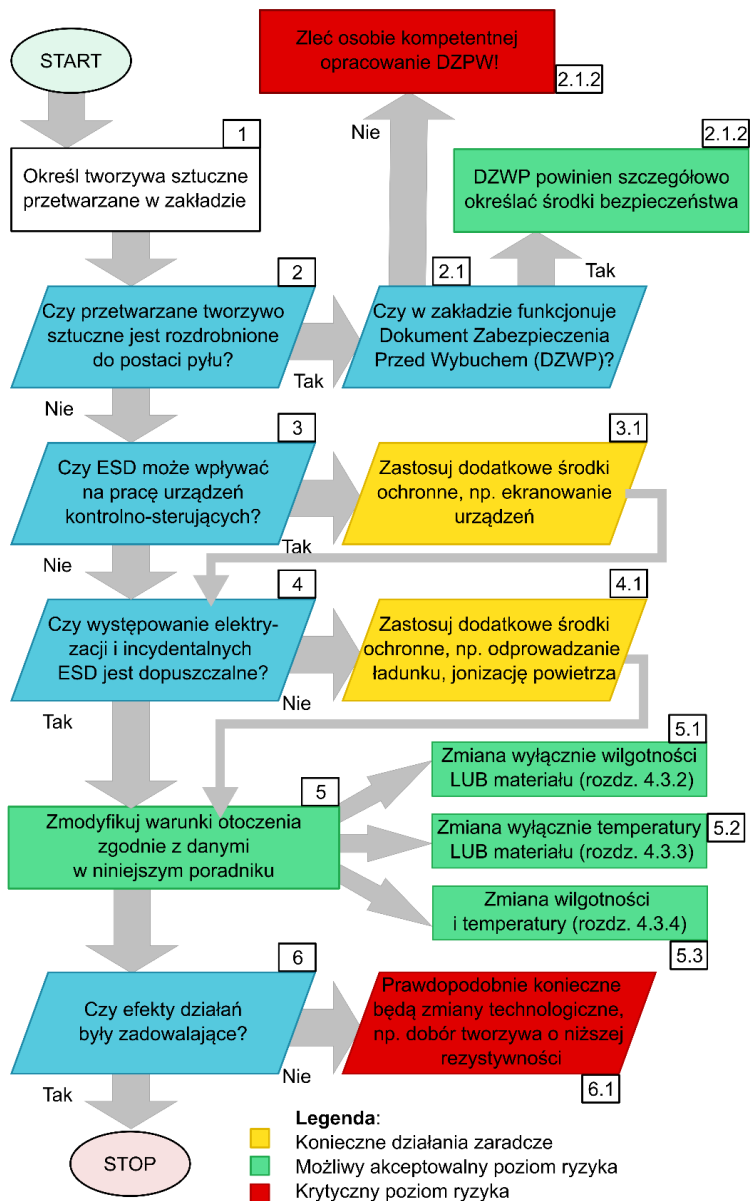
- 6.1. Jeżeli NIE, konieczne będą daleko idące zmiany technologiczne lub zmiana przetwarzanego tworzywa. Sama zmiana warunków otoczenia w tym wypadku nie jest zadowalająca.

Algorytm postępowania – tworzywo nierozdrobnione

Definicja przypadku

W pierwszej kolejności należy dokonać analizy warunków zastanych w przedsiębiorstwie. Do tego celu przygotowano graficzny algorytm postępowania przedstawiony na rys. 3. Poradnik swoim zakresem obejmuje następujące przypadki:

- 1) Możliwa jest **zmiana wilgotności** przy zachowaniu tej samej temperatury LUB możliwa jest **zmiana przetwarzanego tworzywa sztucznego w tych samych warunkach otoczenia**.
- 2) Możliwa jest **zmiana temperatury**, jednak wilgotność musi być zachowana LUB możliwa jest **zmiana tworzywa sztucznego w tych samych warunkach otoczenia**.
- 3) Możliwa jest **zmiana wilgotności i temperatury** przy jednoczesnym **braku możliwości zmiany przetwarzanego tworzywa sztucznego**.



Rysunek 3. Algorytm (2) postępowania w przypadku przetwarzania w zakładzie przemysłowym nierozdrobnionych tworzyw sztucznych

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

1. Czy w rozpatrywanym zakładzie / procesie technologicznym przetwarzają się tworzywa sztuczne, jeżeli tak – jakie?
2. Czy zidentyfikowane tworzywa sztuczne rozdrobione są do postaci pyłu?
 - 2.1. 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.
 - 2.1.1. Jeżeli w zakładzie (mimo występowania rozdrobionych tworzyw sztucznych, które mogą ulegać elektryzacji) nie funkcjonuje DZPW **należy bezwzględnie zlecić osobie kompetentnej jego przygotowanie**. **UWAGA: Działanie o znaczeniu krytycznym**.
 - 2.1.2. 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.
3. 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.
 - 3.1. Zalecane jest zastosowanie innych rozwiązań (nieobjętych niniejszym poradnikiem) mających na celu ochronę urządzeń przed wpływami elektromagnetycznymi.
4. 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 tym poradniku.

- 4.1. Jeżeli konieczne jest całkowite wyeliminowanie wyładowań elektrostatycznych, należy dokonać daleko idących zmian technologicznych lub wdrożyć dodatkowe środki zaradcze, mające na celu minimalizację zjawisk elektrostatycznych.
5. Należy ustalić, czy zmiana warunków otoczenia jest możliwa i w jakim zakresie. Algorytm dopuszcza także możliwość zmiany przetwarzanego tworzywa sztucznego.
 - 5.1.1. Stosowny rozdział poradnika traktuje o możliwości zmiany wilgotności powietrza LUB zmianie tworzywa sztucznego.
 - 5.1.2. Stosowny rozdział poradnika traktuje o możliwości zmiany temperatury powietrza LUB zmianie tworzywa sztucznego.
 - 5.1.3. Stosowny rozdział poradnika traktuje o kierunku zmiany wilgotności i temperatury powietrza BEZ możliwości zmiany przetwarzanego tworzywa sztucznego.
6. 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.
 - 6.1. Jeżeli NIE, konieczne będą daleko idące zmiany technologiczne lub zmiana przetwarzanego tworzywa. Sama zmiana warunków otoczenia w tym wypadku nie jest zadowalająca.

Zmiana wilgotności przy tej samej temperaturze

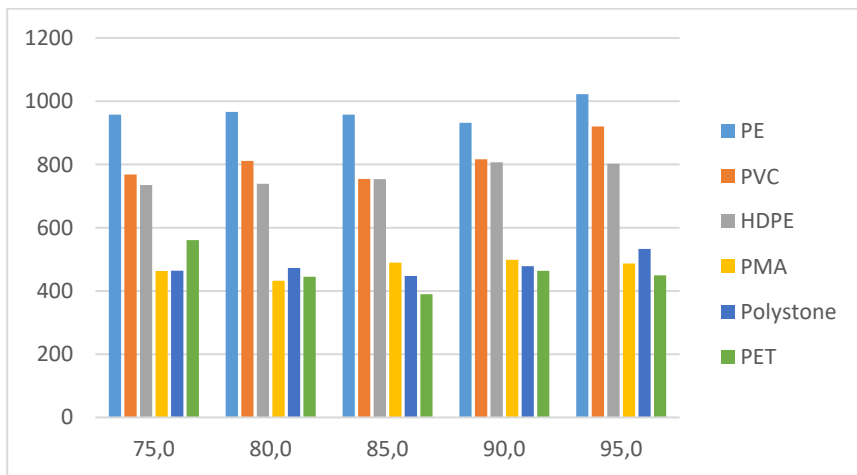
Jak nadmieniono wcześniej, ze względu na mnogość czynników wpływających na zmiany warunków elektryzacji, kolejne podrozdziały mają charakter wskazówek, aniżeli jednoznacznych i definitywnych zasad postępowania i mają stanowić wsparcie procesu decyzyjnego, a nie jego podstawę.

Kolejne wykresy przedstawiają uzyskane wyniki współczynnika empirycznego w zależności od temperatury i wilgotności względnej. Im niższy współczynnik, tym niższa skłonność materiału do elektryzacji.

Przykład zastosowania algorytmu:

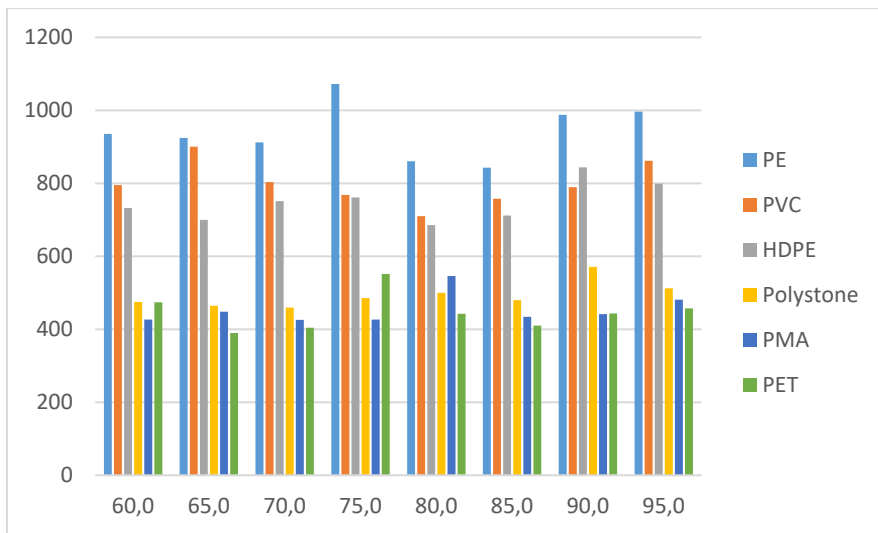
W zakładzie wykorzystuje się polietylenowe (PE) detale w procesie technologicznym nadruku. Temperatura otoczenia utrzymywana jest na poziomie 20°C, a wilgotność otoczenia waha się w zakresie 50-65 %RH w zależności od pory roku. Zgodnie z rys. 5 zmiana wilgotności względnej nie przyniesie zauważalnych skutków. Na tej podstawie podjęto decyzję o zmianie materiału detali produkowanych metodą wydmuchu z PE na PET.

Rysunek 4. prezentuje wyniki badań empirycznych w odniesieniu do temperatury otoczenia $T = 10^{\circ}\text{C}$.



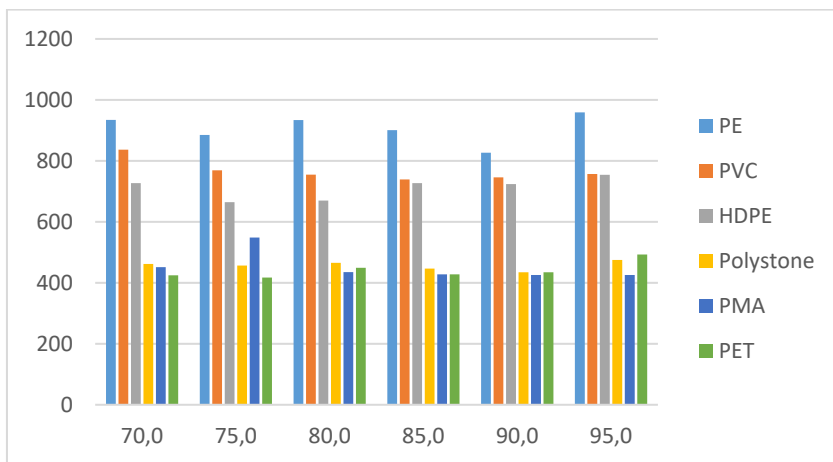
Rysunek 4. Dobór materiału ze względu na wilgotność powietrza ($T = 10^{\circ}\text{C}$)

Rysunek 5. prezentuje wyniki badań empirycznych w odniesieniu do temperatury otoczenia $T = 20^{\circ}\text{C}$.



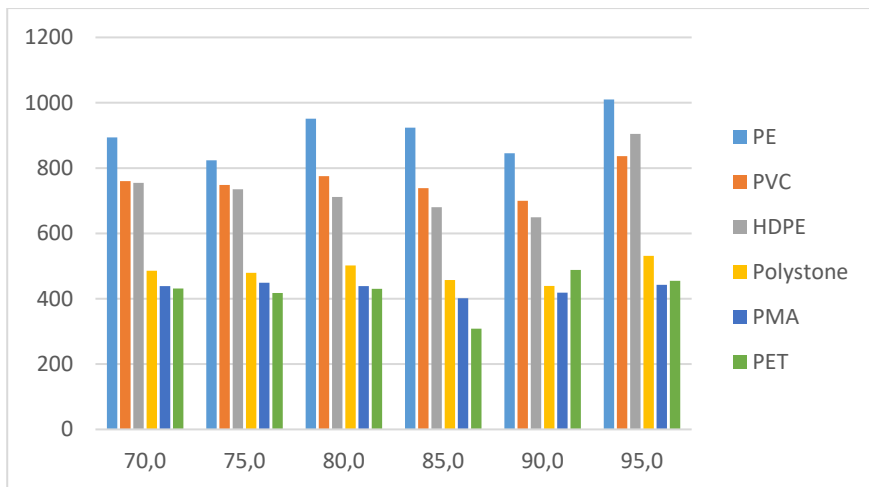
Rysunek 5. Dobór materiału ze względu na wilgotność powietrza ($T = 20^{\circ}\text{C}$)

Rysunek 6. prezentuje wyniki badań empirycznych w odniesieniu do temperatury otoczenia $T = 40^{\circ}\text{C}$.



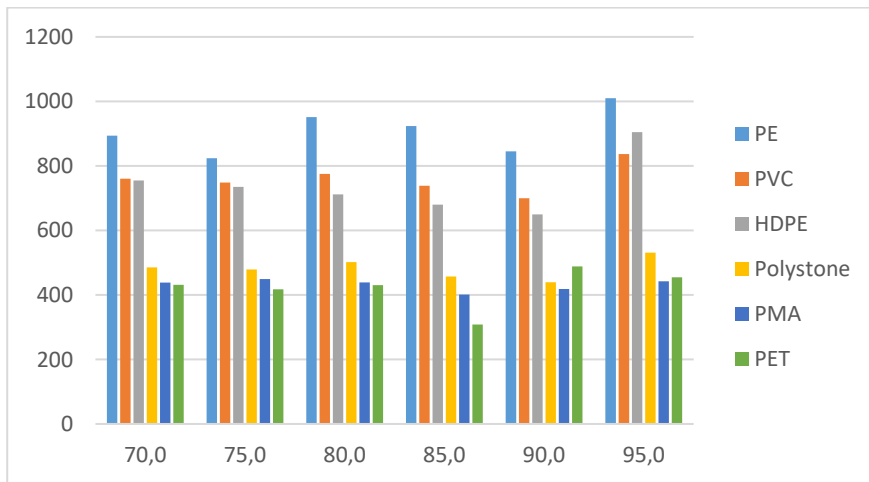
Rysunek 6. Dobór materiału ze względu na wilgotność powietrza ($T = 30^{\circ}\text{C}$)

Rysunek 7. prezentuje wyniki badań empirycznych w odniesieniu do temperatury otoczenia $T = 40^{\circ}\text{C}$.



Rysunek 7. Dobór materiału ze względu na wilgotność powietrza ($T = 40^{\circ}\text{C}$)

Rysunek 8. prezentuje wyniki badań empirycznych w odniesieniu do temperatury otoczenia $T = 50^{\circ}\text{C}$.



Rysunek 8. Dobór materiału ze względu na wilgotność powietrza ($T = 50^{\circ}\text{C}$)

Zmiana temperatury przy tej samej wilgotności

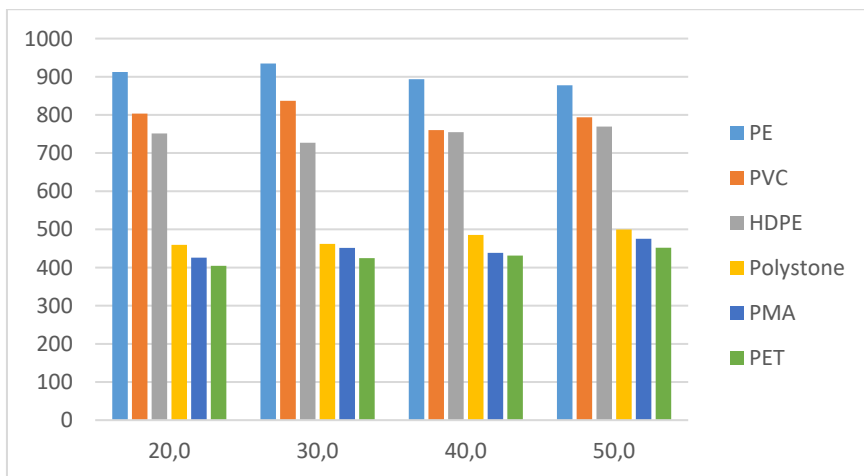
Jak nadmieniono wcześniej, ze względu na mnogość czynników wpływających na zmiany warunków elektryzacji, kolejne podrozdziały mają charakter wskazówek, a nie jednoznacznych i definitywnych zasad postępowania i mają stanowić wsparcie procesu decyzyjnego, a nie jego podstawę.

Kolejne wykresy przedstawiają uzyskane wyniki współczynnika empirycznego w zależności od temperatury i wilgotności względnej. Im niższy współczynnik, tym niższa skłonność materiału do elektryzacji.

Przykład zastosowania algorytmu:

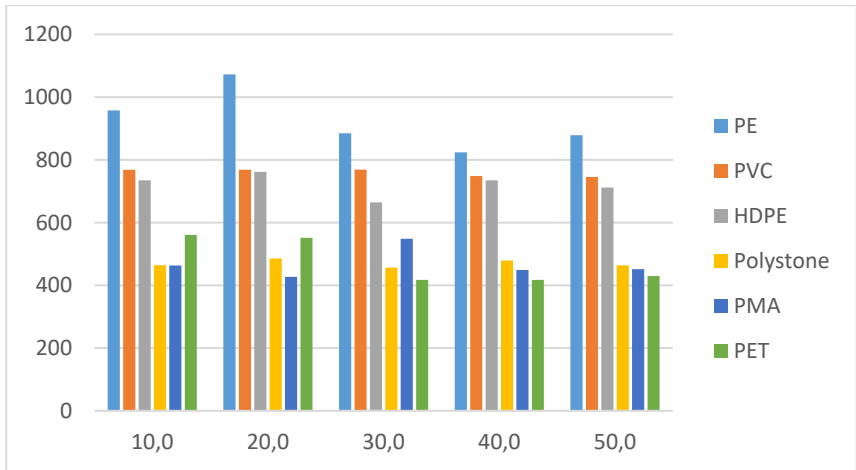
W zakładzie wykorzystuje się polietylenowe (PE) detale w procesie technologicznym nadruku. Temperatura otoczenia utrzymywana jest na poziomie 20°C, a wilgotność otoczenia ok. 75 %RH. Zgodnie z rys. 10 wzrost temperatury otoczenia może przynieść efekt w postaci redukcji gromadzonego na materiale ładunku elektrostatycznego. Niezależnie od tego, zmiana rodzaju przetwarzanego tworzywa sztucznego także powinna dać pozytywny efekt.

Rysunek 9. prezentuje wyniki badań empirycznych w odniesieniu do wilgotności względnej otoczenia %RH = 70.



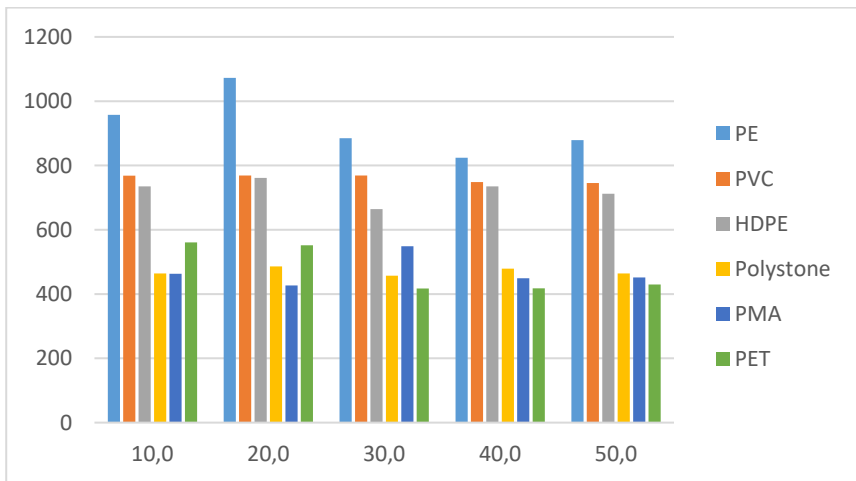
Rysunek 9. Dobór materiału ze względu na temperaturę powietrza (%RH = 70)

Rysunek 10. prezentuje wyniki badań empirycznych w odniesieniu do wilgotności względnej otoczenia $\%RH = 75$.



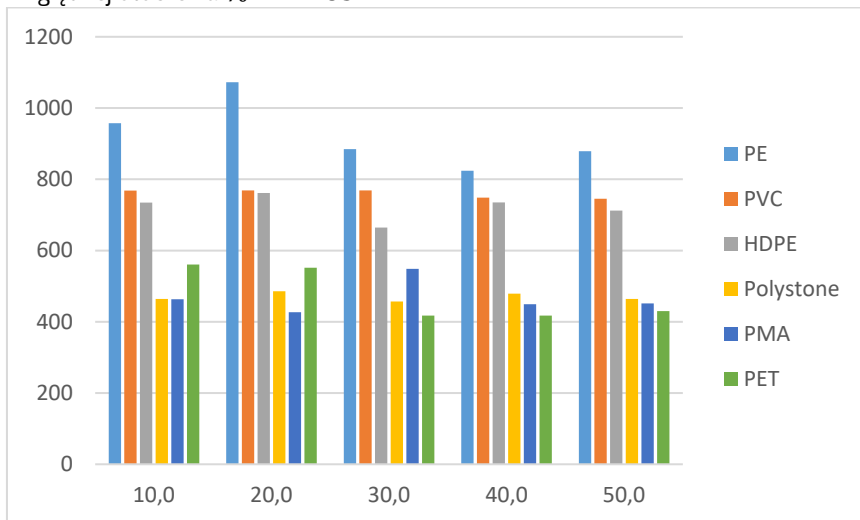
Rysunek 10. Dobór materiału ze względu na temperaturę powietrza ($\%RH = 75$)

Rysunek 11. prezentuje wyniki badań empirycznych w odniesieniu do wilgotności względnej otoczenia $\%RH = 80$.



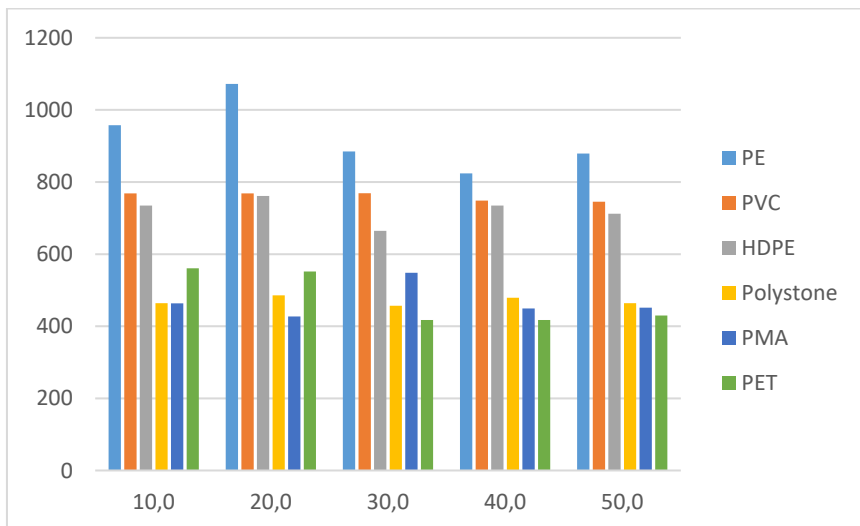
Rysunek 11. Dobór materiału ze względu na temperaturę powietrza ($\%RH = 80$)

Rysunek 12. prezentuje wyniki badań empirycznych w odniesieniu do wilgotności względnej otoczenia $\%RH = 85$.



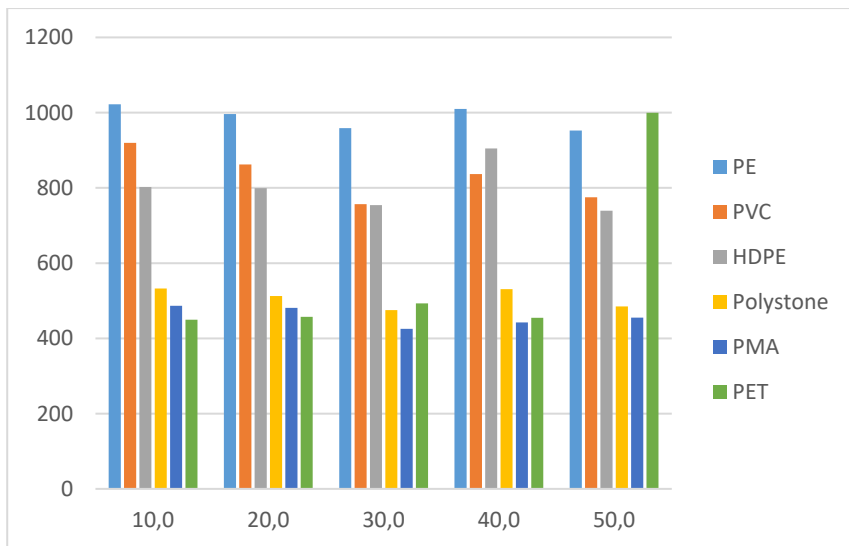
Rysunek 12. Dobór materiału ze względu na temperaturę powietrza ($\%RH = 85$)

Rysunek 13. prezentuje wyniki badań empirycznych w odniesieniu do wilgotności względnej otoczenia $\%RH = 90$.



Rysunek 13. Dobór materiału ze względu na temperaturę powietrza ($\%RH = 90$)

Rysunek 14. prezentuje wyniki badań empirycznych w odniesieniu do wilgotności względnej otoczenia $\%RH = 95$.



Rysunek 14. Dobór materiału ze względu na temperaturę powietrza ($\%RH = 95$)

Zmiana wilgotności i temperatury

Jak dowodzą badania empiryczne, istnieją pewne optymalne wartości temperatury otoczenia oraz wilgotności względnej, w których dany materiał jest najmniej podatny na akumulację ładunku elektrostatycznego. Niestety, jak wspomiano powyżej, nie są to działania wystarczające, zapewniające bezwzględnie akceptowalny poziom bezpieczeństwa. Jak wynika z literatury, rezystancja powierzchniowa tworzyw sztucznych jest na tyle wysoka, że zmiana warunków otoczenia może jedynie w pewnym stopniu wpłynąć na skłonność do akumulacji ładunku elektrostatycznego.

Charakter opisywanych zjawisk pozwolił na wykonanie badań empirycznych, które pozwoliły zdefiniować warunki najbardziej optymalne i warunki maksymalnych wartości ładunku gromadzonego na powierzchni tworzyw sztucznych. Poniższe wykresy należy odczytywać w ten sposób, że wartość 0% (i zbliżone do nich) oznaczają w przybliżeniu największe wartości ładunku elektrostatycznego zgromadzonego na powierzchni danego materiału. Natomiast warunki, w których

występują wartości rzędu 100% (i zbliżonych) odpowiadają seriom pomiarowym, dla których uzyskane wartości ładunku elektrycznego zgromadzonego na próbce były najmniejsze.

Przedstawione na grafikach wartości procentowe są zatem wartościami względnymi. Czym wartość docelowa bliższa jest 100%, tym korzystniejsze efekty zostaną uzyskane.

Przykład zastosowania algorytmu:

W zakładzie wykorzystuje się polietylenowe (PE) detale w procesie technologicznym nadruku. Temperatura otoczenia spada w sezonie grzewczym do ok. 10°C. Zgodnie z rys. 17, wzrost temperatury otoczenia do 20°C może przynieść efekt w postaci redukcji gromadzonego na materiale ładunku elektrostatycznego. Z rysunku można także odczytać zalecany zakres wilgotności powietrza, dodatkowo wpływający pozytywnie na redukcję zagrożenia.

Uwaga: wartość 0% odpowiada najwyższej wartości ładunku elektrostatycznego zmierzonego dla danego materiału w określonych warunkach otoczenia ($T, \%RH$) przy jednakowych warunkach elektryzacji. Analogicznie wartość 100% odpowiada najniższej wartości ładunku elektrostatycznego. Wartości te są względne i nie uwzględniają ilościowej różnicy pomiędzy maksymalną i minimalną wartością ładunku zmierzoną dla danego materiału.

Rysunek 15. przedstawia wyniki uzyskane w odniesieniu do tworzywa Polystone.

		Temperatura otoczenia, °C				
		10	20	30	40	50
Wilgotność względna, %RH	60		33%			
	65		94%			
	70		100%	79%	29%	
	75	39%	52%	69%	49%	21%
	80	30%	67%	64%	57%	44%
	85	70%	80%	86%	89%	25%
	90	15%	15%	86%	96%	31%
	95	0%	1%	26%	7%	82%

Rysunek 15. Dobór warunków otoczenia dla tworzywa Polystone

Rysunek 16. przedstawia wyniki uzyskane w odniesieniu do tworzywa PET.

		Temperatura otoczenia, °C				
		10	20	30	40	50
Wilgotność względna, %RH	60		5%			
	65		77%			
	70		100%	54%	43%	
	75	1%	40%	62%	59%	11%
	80	6%	53%	50%	49%	37%
	85	44%	65%	56%	73%	13%
	90	67%	14%	60%	54%	17%
	95	4%	7%	11%	14%	0%

Rysunek 16. Dobór warunków otoczenia dla tworzywa PET

Rysunek 17. przedstawia wyniki uzyskane w odniesieniu do tworzywa PE.

		Temperatura otoczenia, °C				
		10	20	30	40	50
Wilgotność względna, %RH	60		36%			
	65		63%			
	70		58%	53%	52%	
	75	8%	100%	54%	63%	17%
	80	18%	53%	53%	43%	35%
	85	24%	58%	55%	64%	27%
	90	5%	3%	62%	66%	25%
	95	0%	4%	37%	15%	60%

Rysunek 17. Dobór warunków otoczenia dla tworzywa PE

Rysunek 18. przedstawia wyniki uzyskane w odniesieniu do tworzywa PMMA.

		Temperatura otoczenia, °C				
		10	20	30	40	50
Wilgotność względna, %RH	60		67%			
	65		89%			
	70		86%	65%	68%	
	75	23%	81%	53%	76%	13%
	80	19%	64%	67%	63%	57%
	85	34%	84%	85%	98%	57%
	90	4%	23%	81%	91%	37%
	95	0%	73%	37%	39%	100%

Rysunek 18. Dobór warunków otoczenia dla tworzywa PMMA

Rysunek 19. przedstawia wyniki uzyskane w odniesieniu do tworzywa PVC.

		Temperatura otoczenia, °C				
		10	20	30	40	50
Wilgotność względna, %RH	60		62%			
	65		97%			
	70		88%	74%	81%	
	75	28%	80%	81%	88%	30%
	80	33%	95%	79%	80%	67%
	85	48%	93%	90%	100%	31%
	90	13%	27%	89%	98%	41%
	95	0%	78%	39%	35%	99%

Rysunek 19. Dobór warunków otoczenia dla tworzywa PVC

Rysunek 20. przedstawia wyniki uzyskane w odniesieniu do tworzywa HDPE.

		Temperatura otoczenia, °C				
		10	20	30	40	50
Wilgotność względna, %RH	60		43%			
	65		69%			
	70		61%	53%	50%	
	75	12%	59%	57%	91%	15%
	80	19%	62%	59%	74%	46%
	85	23%	57%	57%	66%	30%
	90	5%	11%	56%	99%	66%
	95	41%	0%	20%	100%	49%

Rysunek 20. Dobór warunków otoczenia dla tworzywa HDPE

Podsumowanie

W poradniku zaprezentowano metodę optymalizacji zjawiska powstawania wyładowań elektrostatycznych w stosunku do określonych warunków procesu technologicznego. Poradnik wskazuje kierunek postępowania, tj. prezentuje wyniki badań różnych materiałów w wytypowanym zakresie warunków otoczenia.

Stosowanie tworzyw sztucznych przy niskich wilgotnościach jest problematyczne i zawsze prowadzić będzie do elektryzacji materiału, chyba, że zastosowane zostaną dodatkowe środki zaradcze. W pewnych sytuacjach jednak charakter procesu technologicznego pozwala na modyfikację warunków otoczenia, tj. wilgotności względnej (%RH), temperatury lub obydwóch ww. czynników. W tego typu sytuacjach z pomocą przychodzą zaprezentowane algorytmy postępowania.

Należy podkreślić, że zbiór czynników, od których zależą rzeczywiste warunki i skala elektryzacji materiałów z tworzyw sztucznych, jest bardzo szeroki. W związku z tym, z natury zjawisk elektrostatycznych wynika, że niemożliwe jest uogólnienie zasad postępowania dla każdego z procesów technologicznych, gdzie materiały polimerowe są problematyczne ze względu na skłonność do akumulacji ładunku elektrostatycznego. W konsekwencji uniemożliwia to w pełni ilościowe podejście.

Wykonane w odniesieniu do wytypowanych rodzajów tworzyw sztucznych badania eksperymentalne pozwalają jednak na wskazanie optymalnego kierunku zmiany warunków otoczenia. Postępowanie opisane w poradniku ma charakter jakościowy i odnosi się do konkretnych warunków otoczenia. Tym samym, poradnik ten stanowi zbiór wskazówek dla technologów, mogących wpłynąć na poprawę warunków bezpieczeństwa związanego z wyładowaniami elektrostatycznymi, jednak nie powinien być traktowany jako jedyny środek zaradczy.

Rezystywność tworzyw sztucznych jest typowa dla izolatorów, a zmiana tej rezystywności w zależności od warunków otoczenia zwykle nie przekracza 2-3 rzędów wielkości. Skłonność do akumulacji ładunku elektrostatycznego zależna jest w tym wypadku od przebiegu procesu adsorpcji/desorpcji jonów pary wodnej (H^+ oraz OH^-) na powierzchni materiałów. Wzrost temperatury otoczenia wpływać w pewnym stopniu na pracę wyjścia elektronów, co ma jednak znaczenie głównie dla przebiegu elektryzacji kontaktowej, a nie dla samej skłonności materiału do gromadzenia ładunku elektrostatycznego. Mimo tego, poradnik może przysłużyć się w procesie decyzyjnym, tj. poszukiwaniu pożądanego kierunku zmian warunków otoczenia i/lub zmian przetwarzanego tworzywa sztucznego, mającego na celu minimalizację zagrożeń związanych ze elektrostatyką.

Literatura

1. Ptak S., Smalcerz A., Ostrowski P.: Ocena ryzyka zapłonu atmosfer wybuchowych przez niezupełne wyładowania elektrostatyczne z naelektryzowanych dielektryków, CIOP-PIB, Warszawa 2019.
2. Kirkman T.: Advanced Physics Laboratory, College of Saint Benedict, Saint John's University, Collegeville, Minnesota, 2015.
3. Ptak S, Ostrowski P.: Zjawiska elektrostatyczne w środowisku pracy – analiza zagrożeń i studium przypadku, Bezpieczeństwo Pracy 9/2020, s. 18-21.
4. Park CH., Park JK., Jeon HS., Chun BC.: Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger, Journal of Electrostatics Volume 66, Issues 11–12, November 2008, Pages 578-583.
5. Grabarczyk Z., Kurczewska A.: Zagrożenia elektrostatyczne w strefach zagrożonych wybuchem, CIOP-PIB, Warszawa 2008.
6. Lüttgens G., Wilson N.: Electrostatic Hazards, Elsevier, 1997.
7. Burgo TAL., Ducati TRD et al.: Triboelectricity: macroscopic charge patterns formed by self-arraying ions on polymer surfaces. Langmuir 28/2012, s. 7407–7416
8. 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).