

ST. KPT. DR INŻ. SZYMON PTAK
Szkoła Główna Służby Pożarniczej
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
e-mail: sptak@sgsp.edu.pl
ORCID 0000-0002-8700-6805

INŻ. KONRAD PŁACHETKO
absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarniczej
e-mail: konplac14@wp.pl

WPŁYW WILGOTNOŚCI POWIETRZA NA ZDOLNOŚĆ DO GROMADZENIA ŁADUNKU ELEKTROSTATYCZNEGO PRZEZ WYBRANE PYŁY BIOMASY

ABSTRAKT

Wyładowanie elektrostatyczne jest jednym z potencjalnych źródeł zapłonu. Zależnie od jego rodzaju, co przekłada się na wydzieloną do otoczenia energię, zdolne jest do zapalenia większości mieszanin pyłów palnych i wszystkich mieszanin gazów i par cieczy palnych z powietrzem. W ramach środków stosowanych w ochronie przed wybuchem ogranicza się możliwość powstania efektywnych źródeł zapłonu. Wpływ na to może mieć wilgotność otoczenia. Celem niniejszego artykułu jest zbadanie wpływu wilgotności otoczenia na rezystywność i czas zaniku ładunku wybranych próbek pyłów biomasy stosowanych do celów m.in. energetycznych. Zmiana parametrów wilgotności wpływać będzie znacząco na poziom zagrożenia wybuchowego.

SŁOWA KLUCZOWE

bezpieczeństwo wybuchowe, biomasa, energetyka, elektrostatyka

Przyjęty: 15.09.2021; Zrecenzowany: 23.11.2021; Zatwierdzony: 10.12.2021

INFLUENCE OF AIR HUMIDITY ON THE ELECTROSTATIC CHARGING CAPACITY OF SELECTED BIOMASS DUSTS

ABSTRACT

Electrostatic discharge is one of the potential sources of ignition. Depending on its type, which translates into the energy emitted to the environment, it is capable of igniting most mixtures of combustible dust with air and all mixtures of gases and vapours of combustible liquids with air. As part of the measures used in the protection against explosion, attempts are undertaken to limit the possibility of creating effective ignition sources. This may depend on ambient humidity. The aim of this study is to investigate the effect of ambient humidity on the resistivity and charge decay time of selected biomass dust samples used among others for purposes of related to energy. Changing the humidity parameters can significantly affect the level of explosion hazard.

KEYWORDS

explosion safety, biomass, power engineering, electrostatics

Received: 15.09.2021; Reviewed: 23.11.2021; Accepted: 10.12.2021

1. WPROWADZENIE

Na mocy międzynarodowych postanowień rządy krajów na całym świecie zobowiązują się do ograniczania emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Rozwijane są technologie energetyczne bazujące na odnawialnych źródłach,

przede wszystkim energetyka wiatrowa oraz słoneczna, zarówno w obszarze prosumenckich instalacji fotowoltaicznych, jak również instalacji o znacznych mocach, gdzie inwestorem jest sektor energetyki zawodowej. Bardzo ważnym, polskim akcentem w rozwoju tej technologii są prace zespołu badawczego nad ogniwami perowskitowymi, które w łatwy sposób będzie można tworzyć na elastycznym podłożu [1]. Jednocześnie forsowane jest odchodzenie od paliw kopalnych, w tym węgla kamiennego i brunatnego. Przyjęte polityki transformacji energetycznej, jak również wysokie opłaty na emisję dwutlenku węgla skłaniają do poszukiwania alternatywnego paliwa, m.in. biomasy, czyli, w pewnym uogólnieniu, różnego rodzaju odpadów organicznych przystosowanych do spalania w kotle energetycznym.

2. BIOMASA

2.1. Wykorzystanie biomasy do celów energetycznych

Na świecie stosuje się biomasę pochodzenia leśnego (np. pellet drewniany), rolniczego (np. słomę), z przetwórstwa owoców (wytłoki), wysuszony osad kanalizacyjny itp. Mimo iż spalanie biomasy prowadzi do emisji dwutlenku węgla, zakłada się, że gaz ten zostanie pobrany z atmosfery i przetworzony na tlen w bieżącym cyklu życia biomasy roślinnej, np. drzewa, które po kilkudziesięciu latach może zostać „ponownie” spalane w celu energetycznym. Tego typu obieg nie jest możliwy dla węgla, którego złoża, w perspektywie istnienia ludzkiej cywilizacji, nie odnowią się.

Spalanie biomasy cechuje wiele pozytywnych aspektów. Niewykorzystana słoma i siano, które, pomijając względy żywienia zwierząt hodowlanych, stanowią odpad, może zostać przetworzona i spalona w kotle. Drewno czy gałęzie pochodzące z wycinki, z pomocą rębaków i rozdrabniarek, również mogą zostać przystosowane do spalania do celów energetycznych. Popularne są uprawy roślin energetycznych, które w cyklach jedno- lub dwuletnich rosną i są spalane jako domieszka do węgla [2].

Na świecie, jak i w Polsce buduje się kotły przeznaczone do spalania biomasy. Przykładem może być kocioł pracujący w elektrociepłowni Siekierki w Warszawie o wydajności 185 ton pary wodnej na godzinę [3].

2.2. Zagrożenia wybuchowe związane z wykorzystaniem biomasy

Wprowadzanie biomasy jako suplementarnej paliwa (domieszka) czy wyłączone spalanie biomasy na potrzeby energetyczne wiąże się z koniecznością rewizji stosowanych środków ochronnych, często ze zmianą technologii samej produkcji energii. Zwykle od strony technicznej, ale także od strony bezpieczeństwa pożarowego i wybuchowego użytkowanie biomasy stanowi wyzwanie, co wynika z daleko idących różnic w charakterystyce obydwóch paliw: węgla i biomasy [4].

Różnice widoczne są w składzie elementarnym biomasy, co wynika ze struktury związków chemicznych tworzących ten materiał, np. obecności ligniny, celulozy i hemicelulozy w biomase drzewnej, w odniesieniu do wysokiej zawartości pierwiastkowego węgla w próbce węgla kamiennego. Jednocześnie rozkład termiczny węgla będzie rozpoczynał się w znacznie wyższej temperaturze niż w przypadku biomasy.

Badane pyły biomasy, domieszkowane np. w proporcji 1:1, będą wpływać na obniżenie wartości minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu, jednocześnie podnosząc minimalną temperaturę zapłonu warstwy pyłu, przy czym może to zależeć także od różnic w rozkładzie granulometrycznym poszczególnych próbek i wpływie tych różnic na skuteczność przekazywania ciepła do otoczenia. Zatem, co do zasady, wpływ dodatku biomasy na bezpieczeństwo wybuchowe i pożarowe jest niejednoznaczny i zawsze wymaga szczegółowej analizy i oznaczenia wskaźników wybuchowości dla danej mieszaniny pyłowo-powietrznej.

3. ELEKTRYCZNOŚĆ STATYCZNA

3.1. Zjawisko elektryczności statycznej

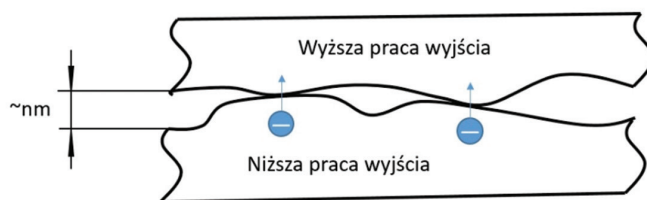
Co do zasady, zjawiska w przyrodzie dążą do stanu równowagi, który można w wielu przypadkach zdefiniować warunkiem najmniejszej energii całkowitej obiektu, jaka w danych warunkach jest możliwa. W kontekście zjawisk elektrostatycznych, na skutek określonych procesów, dochodzić będzie do akumulacji ładunku elektrycznego na powierzchni obiektu. Ów potencjał elektryczny, wytworzony względem ziemi, będzie dążył do neutralizacji, ilekroć w otoczeniu pojawi się obiekt o innym potencjale czy też uziemiony

obiekt przewodzący. W codziennym życiu ładunek elektrostatyczny zgromadzony na ciele człowieka zostanie odprowadzony do uziemienia ilekroć kończyna (zwykle ręka) zbliży się do metalowego, często dobrze uziemionego elementu. Wówczas, tuż przed dotknięciem owego obiektu, nastąpi wyładowanie elektrostatyczne, a więc przepływ prądu przez powietrze. Wyładowanie będzie zawsze objawiało się emisją promieniowania elektromagnetycznego do otoczenia, wydzielaniem ciepła i charakterystycznym trzaskiem wynikającym z gwałtownego rozprężenia się powietrza w miejscu powstałego kanału plazmowego, co z kolei wynika z wysokiej temperatury, w której powietrze ulega jonizacji i możliwy jest przepływ prądu [5].

Literatura zwykle wyróżnia dwa mechanizmy generacji ładunku elektrostatycznego [6]:

1. Elektryzacja przez kontakt

W tym mechanizmie dwa obiekty stykają się ze sobą. W ten sposób powstaje interfejs umożliwiający przemieszczanie się elektronów. Ich ruch może wynikać np. z różnic w pracach wyjścia elektronów z dwóch różnych materiałów, przez co po ich zetknięciu ładunki (elektrony) przesuną się w stronę ciała o wyższej pracy wyjścia (rys. 1), co jest parametrem materiałowym wynikającym ze struktury chemicznej. W przypadku bardzo powolnego rozdzielania tychże materiałów teoretycznie elektrony miałyby czas, aby wrócić na swoje pierwotne miejsce. W praktyce rozdzielanie materiałów powoduje jednak uwięzienie tych nośników ładunku, które zdołały przedostać się na drugą stronę interfejsu. W związku z tym na obydwóch rozdzielanych materiałach powstaje różnica potencjałów. Mechanizm ten często błędnie utożsamiany jest z tarcieniem. Przykładem mechanizmów, w których dochodzi do tego zjawiska, jest rozwijanie folii z rolki, kalandrowanie, ruch pasa klinowego po kole napędowym itp.

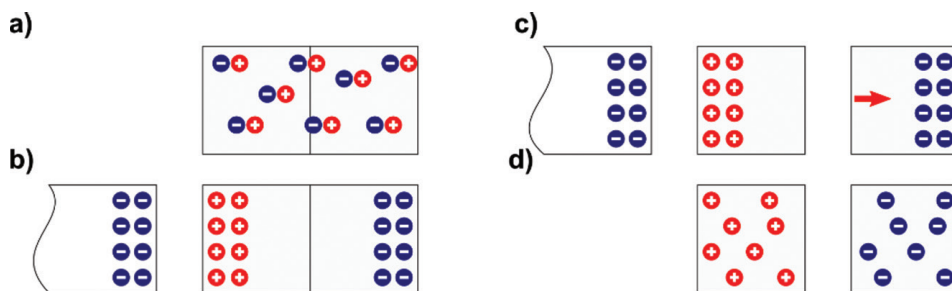


Rys. 1. Interfejs dwóch materiałów o różnych pracach wyjścia i zjawisko migracji elektronów

Źródło: opracowanie własne

2. Elektryzacja przez wpływ (indukcję)

Przykład mechanizmu elektryzacji poprzez wpływ w istotnym uproszczeniu obrazuje rysunek 2.



Rys. 2. Mechanizm elektryzacji przez wpływ
Źródło: opracowanie własne

Dwa ciała neutralne elektrycznie stykają się ze sobą. Sumaryczny ładunek elektryczny równa się zeru (rys. 2 a). Jeżeli w pobliżu pojawi się naelektryzowane ciało (rys. 2 b), na skutek założeń prawa Coulomba ładunki przesuną się (uporządkują) w objętości obiektu. Jeżeli nastąpi rozdzielenie tych ciał w obecności źródła (rys. 2 c), uzyskane zostaną dwa ciała naelektryzowane do tego samego poziomu, jednak przeciwnych polaryzacji. Stan ten utrzyma się po zniknięciu źródła zewnętrznego (rys. 2 d). Warto nadmienić, że gdyby źródło zniknęło w sytuacji przedstawionej na rys. 2 b, układ ciał wróciłby do sytuacji z rys. 2 a.

Nieco odmiennym mechanizmem, często pomijanym w literaturze, jest elektryzacja przez jonizację. Strumień zjonizowanego powietrza będzie przekazywał ładunek elektryczny ciału, na które oddziałuje ów strumień, co pokrewne jest pierwszemu z opisanych powyżej mechanizmów [7].

Wyładowanie elektrostatyczne, obok gorącej powierzchni czy iskry mechanicznej, uznawane jest za jedno z potencjalnych źródeł zapłonu, co odzwierciedlają zapisy normy [8]. Źródło to może stać się efektywnym źródłem zapłonu, jeżeli wydzielona do otoczenia energia będzie co najmniej równa energii zapłonu mieszaniny wybuchowej, która wytworzyła się w tymże otoczeniu. Naelektryzowane ciało, które oddaje ładunek czy poprzez wyładowanie, czy też do uziemienia, odpowiada modelowi fizycznemu rozładowania kondensatora, co opisuje równanie (1):

$$q(t) = q_0 \cdot e^{-t/RC} \quad (1)$$

gdzie:

q – ładunek elektryczny – wartość chwilowa, C; t – czas, s; q_0 – ładunek elektryczny – wartość maksymalna, C; R – rezystancja obwodu rozładowania, Ω ; C – pojemność elektryczna rozładowywanego obiektu, F.

Należy zauważyć, że zgodnie z zależnością (1) rozładowanie obiektu zawsze następuje zgodnie z krzywą wykładniczą (eksponenta), przy czym dynamika procesu zależy wyłącznie od iloczynu RC , czyli charakterystyki obwodu. Iloczyn ten oznaczany jest często jako $\tau = \epsilon/\sigma_1$, zwany czasem relaksacji ładunku, gdzie: ϵ – przenikalność dielektryczna, F/m; σ_1 – przewodność, S/m.

3.2. Zapobieganie powstaniu efektywnego źródła zapłonu

W praktyce, zapewniając akceptowalny poziom ryzyka wybuchu, podejmuje się organizacyjne i techniczne środki służące niedopuszczeniu do zapłonu mieszaniny wybuchowej. Zgodnie z zasadami zintegrowanego bezpieczeństwa wybuchowego [9] pierwszym krokiem jest zawsze niedopuszczanie do powstawania atmosfery wybuchowej. Wdraża się również kontrolę źródeł zapłonu, a w trzeciej kolejności zapewnia się środki służące ograniczeniu skutków wybuchu. Poniżej przedstawiono wybrane sposoby ograniczania prawdopodobieństwa powstania wyładowania elektrostatycznego (efektywnego źródła zapłonu):

- Eliminacja materiałów nieprzewodzących – jeżeli to możliwe, należy stosować materiały cechujące się przewodnością na tyle wysoką, aby ewentualny ładunek elektrostatyczny mógł być odprowadzany do uziemienia. W niektórych procesach technologicznych, np. druku na tworzywach sztucznych, stosuje się szczotki z przewodzącego materiału, które stykając się z powierzchnią dielektryka, będą neutralizować zgromadzony ładunek powierzchniowy. Metoda ta stosowana jest także w drukarkach, co wynika z niskiej przewodności papieru.
- W przypadku obiektów przewodzących stosuje się uziemienie ochronne, zapewniające swobodny spływ ładunków elektrostatycznych do ziemi. Z tego powodu uziemia się przewodzące obudowy maszyn, jest to jedna z przyczyn uziemiania konstrukcji wsporczej instalacji fotowoltaicznej.

- Wyrównywanie potencjałów – uzupełnieniem ochrony zapewnianej przez uziemienie ochronne jest łączenie obudów dodatkowym przewodem, którego zadaniem jest wyrównanie potencjałów elektrycznych. Wówczas uszkodzenie uziemienia jednej z połączonych w ten sposób maszyn nie spowoduje gromadzenia ładunku elektrostatycznego na obudowie. Ponadto jednoczesne dotknięcie obydwu urządzeń nie skutkuje porażeniem pracownika, gdyż potencjały obydwu ciał będą równe.
- W niektórych procesach technologicznych stosuje się jonizatory, nadmuchując powietrze wzbogacone w jony przeciwne znakiem w stosunku do gromadzącego się na powierzchni dielektryka ładunku elektrostatycznego.
- W przypadku transportu pneumatycznego pyłu możliwe jest obniżenie prędkości przepływu medium. Wówczas kosztem zmniejszenia wydajności instalacji zyskuje się wydłużenie czasu potrzebnego cząsteczce pyłu na przebycie określonej odległości, co zwiększa liczbę zderzeń z przewodzącą obudową, podczas których ładunek elektrostatyczny może zostać zneutralizowany.
- Istotną metodą, jednak niemożliwą do zastosowania we wszystkich branżach przemysłu, jest zapewnienie odpowiedniej wilgotności powietrza, a przez to obiektów znajdujących się w rozpatrywanej kubaturze. Wilgotność wpływa na obniżenie rezystywności materiałów nieprzewodzących, choć jest to proces niejednorodny dla wszystkich materiałów.

3.3. Znaczenie niniejszej pracy badawczej

Badając wpływ wilgotności na materiały nieprzewodzące pochodzenia naturalnego (tutaj: celulozę) oraz tworzywa sztuczne (tutaj: PTFE, zwany teflonem), przy wzroście wilgotności względnej powietrza z 20 do 80% rezystywność PTFE obniżyła się o rząd wielkości, a celulozy aż o sześć rzędów wielkości [10]. Jednocześnie przy elektryzacji poprzez wyładowanie koronowe próbek polietylenu (PE) udowodniono stan równowagi próbki przy potencjale powierzchniowym różnym od 0 V (tutaj: $-4,6 \pm 0,7$ V). Oznacza to, że widoczny jest wpływ adsorpcji OH^- z pary wodnej i desorpcji H^+ z grup karboksylowych polimeru [11]. Stąd wniosek, że zarówno makro-, jak i mikroskopowe zjawiska mają znaczenie dla elektryzacji materiału.

Niezależnie od samego mechanizmu, z praktycznego punktu widzenia podniesienie wilgotności próbki będzie zmniejszać ryzyko akumulacji ładunku elektrostatycznego, który doprowadzić może do powstania wyładowania.

Ważnym z praktycznego punktu widzenia parametrem jest czas relaksacji, czyli czas potrzebny na rozładowanie wygenerowanego w materiale ładunku elektrycznego. Ocena zdolności materiału do szybkiego rozładowania odbywa się zwykle za pomocą wyznaczania dwóch wartości: rezystywności skrośnej i powierzchniowej, a często także rezystancji upływu R_c , czyli rzeczywistej wartości rezystancji pomiędzy rozpatrywanym obiektem a uziemieniem, określanej w omach (Ω). Wówczas czas relaksacji τ wyznacza się z zależności (2):

$$\tau = R_c \cdot C = \epsilon_0 \epsilon_r \rho_v \quad (2)$$

gdzie: C – pojemność elektryczna ciała, F; ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni, F/m; ϵ_r – przenikalność względna (wielkość bezwymiarowa); ρ_v – rezystywność skrośna, wyznaczona względem uziemionej powierzchni, Ωm .

Celem niniejszej pracy badawczej jest określenie wpływu wilgotności próbki na skłonność do akumulacji ładunku elektrostatycznego.

4. BADANIA

4.1. Próbki

W części eksperymentalnej wykorzystano pięć próbek biomasy. Wszystkie próbki zostały w jednakowych warunkach rozdrobnione przy użyciu młynka laboratoryjnego wibracyjnego, a następnie przesiane w celu uzyskania frakcji $\leq 500 \mu\text{m}$. Wykorzystana biomasa to:

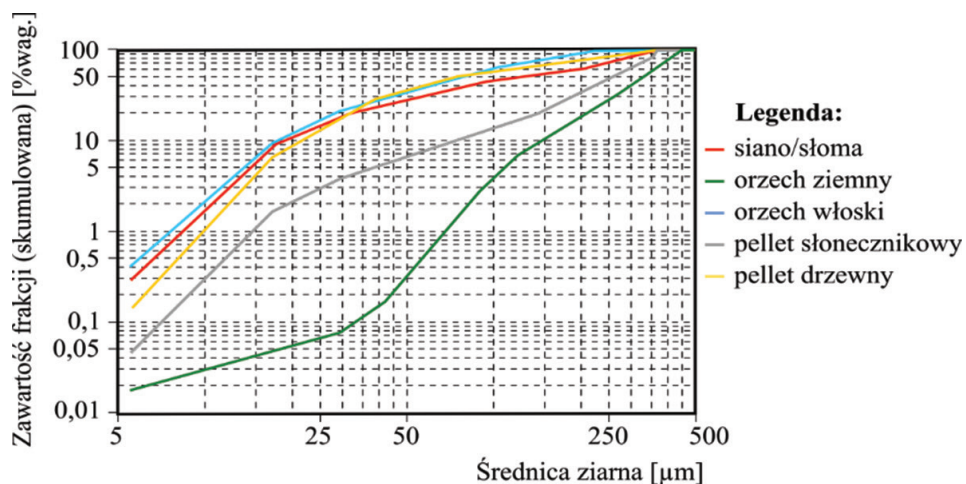
1. łupiny orzechów włoskich,
2. pellet drzewny,
3. pellet słonecznikowy,
4. odpad z blanszowania orzechów ziemnych,
5. pellet siano/słoma.

Pellet wykorzystywany jest w energetyce zarówno w skali przemysłowej, jak i przez indywidualnych konsumentów. W szczególności pellet drzewny i siano/słoma wykorzystywane są jako paliwo suplementarne do węgla.

Pellet drzewny często stanowi samodzielne paliwo w kotłach na biomasę ze względu na stosunkowo wysoką powtarzalność charakterystyki względem innych rodzajów biomasy. Pellet siano/słoma cechuje stosunkowo wysoka podaż, szczególnie w okresie zbiorów upraw rolniczych, choć jego produkcja możliwa jest przez cały rok wobec powszechności magazynowania surowca w formie balotów.

Łupiny orzechów włoskich oraz odpad z blanszowania orzechów ziemnych są odpadami z produkcji żywności. Zwykle przekazywane są do utylizacji, choć w przypadku łupiny orzecha włoskiego biomasę tę cechują interesujące parametry palności. Spodziewać się należy także zadowalającej powtarzalności charakterystyki tego paliwa [4]. Odpad z blanszowania orzechów ziemnych cechuje z kolei wysoka zawartość tłuszczów roślinnych, co wpływa zarówno na stosunkowo niskie wskaźniki wybuchowości, jak i brak skłonności do wytwarzania pyłu o niskich frakcjach, co wyraźnie widać na wykresie rozkładu granulometrycznego próbek.

Rozkład granulometryczny wykorzystanych próbek biomasy, wyznaczony z wykorzystaniem urządzenia LS 13 320 MW firmy Becman Cunter, przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Rozkład granulometryczny próbek biomasy

Źródło: opracowanie własne

Gęstość nasypową poszczególnych próbek, wyznaczoną przy zastosowaniu wagi laboratoryjnej i naczynia szklanego o znanej objętości, zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Zestawienie wyników oznaczania gęstości nasypowej próbek pyłów biomasy

Nazwa materiału badawczego	Pellet drzewny	Pellet słonecznikowy	Pellet siano/słoma	Łupiny orzecha włoskiego	Odpad z blanszowania orzechów ziemnych
Gęstość nasypowa, $\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$	0,333	0,462	0,440	0,739	0,380

Źródło: opracowanie własne

4.2. Metoda

Przygotowane próbki poddawane były kondycjonowaniu z wykorzystaniem komory klimatycznej Weisstechnik WS3 w warunkach zmiennej wilgotności i stałej temperatury (25°C) przez okres 8 h, co pozwoliło na osiągnięcie stanu równowagi próbki względem warunków otoczenia. Niezwłocznie po zakończeniu kondycjonowania mierzono rezystywność warstwy pyłu oraz czas zaniku ładunku elektrostatycznego. Deklarowana dokładność pomiaru wilgotności wynosi 0,5% RH. Opis stanowisk badawczych i metody pomiarowej zamieszczono poniżej.

1. Pomiar rezystywności próbki

Urządzenie pomiarowe stanowią dwie elektrody z polerowanej stali nierdzewnej ułożone na podstawie teflonowej w odległości 10 mm od siebie. Wymiary elektrod to 10 mm, 10 mm, 100 mm, odpowiednio: głębokość, wysokość, długość. Rezystancja pomiędzy elektrodami nie powinna być niższa niż $10^{14} \Omega$, zgodnie z normą PN-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016, która zawiera opis metody badawczej. Próbka pyłu usypywana jest pomiędzy elektrodami, po czym rezystywność pyłu mierzona jest teraomierzem Megger MIT420/2. Badanie jest nieniszczące. Wynik wyznacza się jako wartość średnią z trzech prób. Obliczenia rezystywności pyłu dokonuje się zgodnie z zależnością (3):

$$\rho = 0,001 \cdot R_{sr} \cdot H \cdot W/L = 0,1 \cdot R_{sr} \quad (3)$$

gdzie: ρ – rezystywność, Ωm ; R_{sr} – wyznaczona średnia wartość rezystancji próbki, Ω ; H – wysokość elektrody, mm; W – długość elektrody, mm; L – odstęp między elektrodami, mm.

Zgodnie z danymi producenta dokładność pomiaru rezystancji jest zależna od napięcia probierczego, jednak nie przekracza $\pm 11,5\%$ (słupki błędów niewidoczne na rys. 4). Dla uproszczenia analizy wyników przyjęto tę wartość jako niepewność pomiaru.

2. Pomiar czasu zaniku ładunku

Do pomiaru czasu zaniku ładunku w objętości próbki wykorzystany zostanie miernik JCI 176 v6 firmy Chilworth, współpracujący z dedykowanym oprogramowaniem firmowym JCI-Graph. Badanie polega na umieszczeniu próbki pyłu w urządzeniu i uruchomieniu automatycznego pomiaru. Po autokalibracji miernika następuje elektryzacja próbki poprzez wyładowanie koronowe, w opisywanych badaniach o polaryzacji ujemnej. Wówczas rozpoczyna się rejestracja zaniku ładunku zgromadzonego na próbce i wyznaczenie charakterystycznych wielkości, takich jak: maksymalne napięcie, ładunek elektryczny, czas zaniku ładunku do wartości $1/e$ (równoznaczne zapisowi $t = \tau$) oraz 10% wartości początkowej itd. Biorąc pod uwagę rozdzielczość pomiaru i podawaną przez producenta dokładność, przyjmuje się niepewność pomiaru czasu zaniku ładunku rzędu 10%.

5. WYNIKI

W tab. 2 zestawiono wyniki obliczonej rezystywności średniej poszczególnych próbek pyłów biomasy.

Tab. 2. Wyniki pomiaru rezystywności próbek biomasy

Wilgotność, % RH	Rezystywność, $G\Omega\text{m}$				
	Orzech włoski	Pellet drzewny	Pellet słonecznikowy	Orzech ziemny	Pellet siano/słoma
40	>20*	>20*	>20*	$15 \pm 0,3$	>20*
50	>20*	>20*	$10,4 \pm 0,3$	$7,5 \pm 0,2$	$6,0 \pm 0,2$

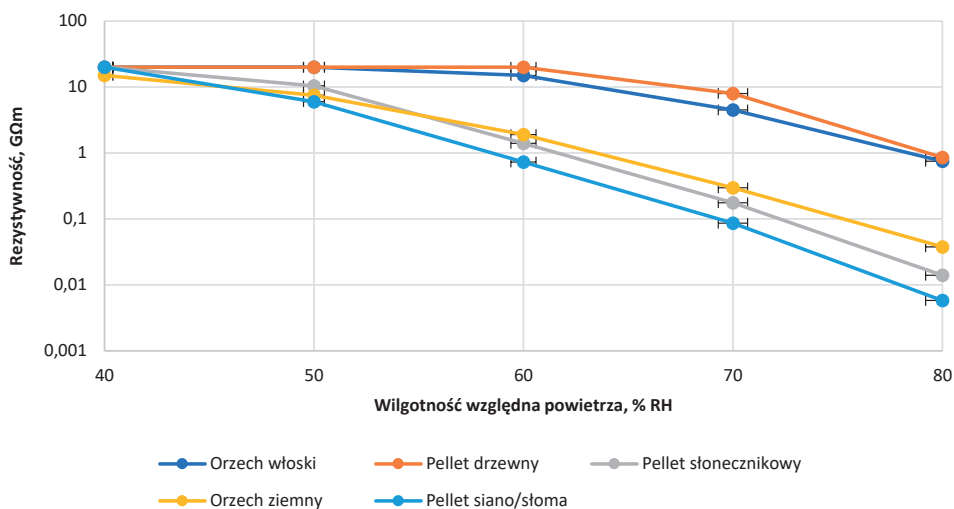
cd. Tab. 2

Wilgotność, % RH	Rezystywność, GΩm				
	Orzech włoski	Pellet drzewny	Pellet słonecznikowy	Orzech ziemny	Pellet siano/słoma
60	15 ± 0,3	>20*	1,4 ± 0,03	1,9 ± 0,04	0,73 ± 0,02
70	4,5 ± 0,09	8 ± 0,2	0,176 ± 0,004	0,296 ± 0,006	0,086 ± 0,002
80	0,75 ± 0,02	0,86 ± 0,02	0,0140 ± 0,0003	0,0378 ± 0,0008	0,0058 ± 0,0002

* poza zakresem miernika

Źródło: opracowanie własne

Rys. 4 zestawia wyniki rezystywności średniej względem wilgotności względnej powietrza, w której kondycjonowane były próbki. W przybliżeniu wzrost wilgotności o 10% RH powoduje obniżenie rezystywności o jeden rząd wielkości. Również dla próbek pelletu drzewnego i orzecha włoskiego można założyć spełnienie tej zależności, mając na uwadze górny zakres miernika pozwalający zmierzyć wartości nie większe niż $2 \cdot 10^9 \Omega m$. Ekstrapolując wyniki dla ww. próbek, dla niższych wilgotności należy spodziewać się podobnego charakteru przedstawionych zależności.



Rys. 4. Wykres zależności rezystywności pyłu biomasy od wilgotności względnej powietrza, w którym kondycjonowano próbkę

Źródło: opracowanie własne

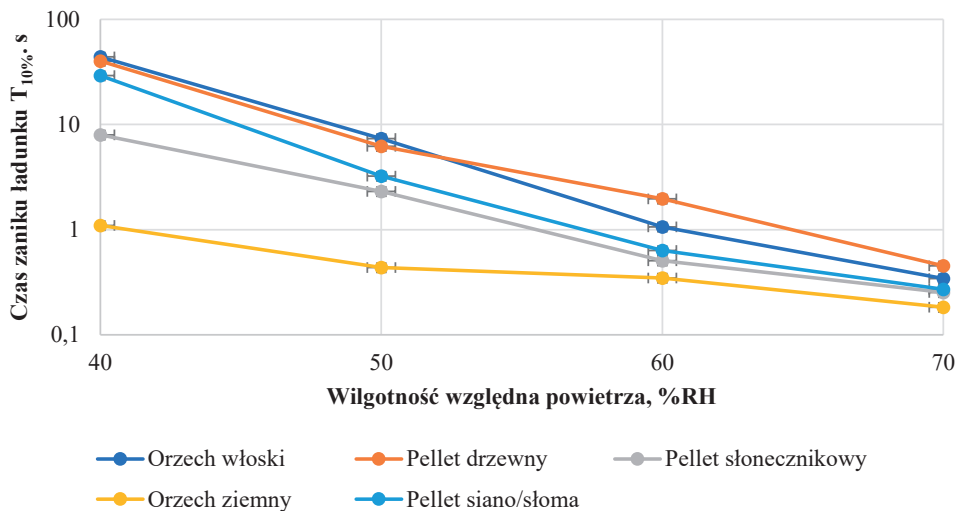
W tab. 3 zestawiono wyniki pomiaru czasu zaniku ładunku do wartości 10% wartości początkowej.

Tab. 3. Wyniki pomiaru czasu zaniku ładunku do 10% wartości początkowej

Wilgotność, %RH	Orzech włoski		Pellet drzewny		Pellet słonecznikowy		Orzech ziemny		Pellet siano/słoma	
	$T_{10\%}$, s	σ , s	$T_{10\%}$, s	σ , s	$T_{10\%}$, s	σ , s	$T_{10\%}$, s	σ , s	$T_{10\%}$, s	σ , s
40	44	3,5	40	2,9	8,0	0,52	1,1	0,25	29	2,8
50	7,4	0,49	6,2	0,54	2,3	0,51	0,4	0,30	3,2	0,36
60	1,1	0,11	2,0	0,18	0,5	0,065	0,3	0,049	0,6	0,21
70	0,3	0,017	0,5	0,044	0,3	0,027	0,2	0,012	0,3	0,065

Źródło: opracowanie własne

Rys. 5 obrazuje uzyskane wyniki. Ponownie obserwowana jest wykładnicza zależność czasu zaniku ładunku od wilgotności próbek.



Rys. 5. Wykres zależności czasu zaniku ładunku względem wilgotności względnej powietrza, w którym kondycjonowano próbkę

Źródło: opracowanie własne

6. WNIOSKI

- Zmiana parametrów paliwa, następująca w momencie wprowadzenia biomasy jako paliwa suplementarnego do węgla, skutkuje szeregiem problemów technicznych (spalanie paliwa w kotle) oraz związanych z bezpiecznym przetwarzaniem, transportowaniem i magazynowaniem biomasy.
- Pomiar czasu zaniku ładunku wrażliwy jest na jednorodność próbki. Należy zwrócić uwagę, aby badana próbka była reprezentatywna.
- Rezystywność pyłu biomasy przekłada się bezpośrednio na czas relaksacji zgromadzonego ładunku elektrostatycznego. Czym krótszy ten czas, tym poziom zagrożenia powstania efektywnego źródła zapłonu mieszaniny wybuchowej pyłowo-powietrznej w postaci wyładowania elektrostatycznego jest niższy.
- Substancje gromadzą wodę w postaci związanej w strukturach chemicznych oraz w formie tzw. wilgoci przemijającej. O ile pierwsza z wymienionych cech może mieć pewne znaczenie dla rezystywności materiału, o tyle zawartość wilgoci przemijającej, związanej z otaczającego ciała powietrza, ma kluczowe znaczenie dla aktualnej wartości rezystywności powierzchniowej (lub w niektórych przypadkach skrośnej) i tym samym czasu zaniku ładunku elektrostatycznego.
- Dla niskich wilgotności powietrza, poniżej 40% RH, próbki osiągały rezystywność przewyższającą możliwości zastosowanego teraomierza, czyli $2 \cdot 10^{10} \Omega\text{m}$. Umowną granicą pomiędzy pyłem przewodzącym (grupa IIIC) i nieprzewodzącym (grupa IIIB) jest jednak granica $10^3 \Omega\text{m}$ [12].
- Spośród przebadanych próbek rezystywność pelletu drzewnego i łupin orzecha włoskiego jest wyraźnie wyższa niż pozostałych próbek. Przekłada się to na dłuższe czasy relaksacji ładunku. Można zatem stwierdzić, że na tle innych rodzajów biomasy powszechnie wykorzystywany w energetyce pellet drzewny cechuje istotny wpływ na pogorszenie warunków ochrony przeciwybuchowej.

BIBLIOGRAFIA

1. Malinkiewicz O., Yella A., Lee Y.H., Espallargas G.M., Graetzel M., Nazeeruddin M. i Bolink H., *Perovskite solar cells employing organic charge-transport layers*, „Nature Photonics” 2014, nr 8, pp. 128–132.

2. Dobrowolska E., Dzurenda L., Jabłoński M. i Kłosińska T., *Wykorzystanie energetyczne dendromasy*, SGGW, Warszawa 2010.
3. www.termika.pgnig.pl (dostęp: 12.09.2021).
4. Ptak S., Półka M., *Wpływ biomasy na parametry palności i wybuchowości pyłu węgla kamiennego*, SGSP, Warszawa 2018.
5. Ptak S., Ostrowski P., *Zjawiska elektrostatyczne w środowisku pracy – analiza zagrożeń i studium przypadku*, „Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka” 2020, nr 9, s. 18–21.
6. Grabarczyk Z., Kurczewska A., *Zagrożenia elektrostatyczne w strefach zagrożonych wybuchem*, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2008.
7. Ptak S., *Zagrożenia elektroenergetyczne w środowisku pracy*, SGSP, Warszawa 2020.
8. PN EN 1127-1:2019-10 Atmosfery wybuchowe – – Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem – – Część 1: Pojęcia podstawowe i metodyka.
9. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/34/UE z 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej.
10. Luttgens G., Luttgens S., *Static Electricity. Understanding, Controlling, Applying*, Willey-VCH, Weinheim 2017.
11. Burgo T., Ducati T., Francisco K., Clincspoor K., Galembek F. i Galembek S., *Triboelectricity: Macroscopic Charge Patterns Formed by Self-Arraying Ions on Polymer Surfaces*, „Langmuir” 2012, Vol. 28, Issue 19, p. 7407–7416.
12. PN-EN 60079-0:2018 Atmosfery wybuchowe – – Część 0: Urządzenia – – Podstawowe wymagania.
13. PN-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016 Atmosfery wybuchowe – – Część 20-2: Właściwości materiałowe – – Metody badań pyłów palnych.

Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2020–2022 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego / Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

SZYMON PTAK – jest absolwentem Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej oraz Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Ukończył także studia podyplomowe z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy na Politechnice Warszawskiej oraz z zakresu bezpieczeństwa technicznego w przestrzeniach zagrożonych wybuchem w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach. W 2016 r. uzyskał stopień doktora na Wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. W tym samym roku objął stanowisko Kierownika Zakładu Elektroenergetyki SGSP. Od 2019 r. zajmuje stanowisko Kierownika Katedry Techniki Pożarniczej. Swoją działalność naukową prowadzi na styku energetyki i bezpieczeństwa wybuchowego, a także elektrostatyki, w ramach współpracy z Centralnym Instytutem Ochrony Pracy – Państwowym Instytutem Badawczym. Jest autorem lub współautorem kilkudziesięciu publikacji oraz kilku pozycji zwartych. Jest recenzentem artykułów dla czasopism “Fire and Materials”, “Sustainability” oraz “Processes”, a także członkiem dwóch rad wydawniczych czasopism naukowych.

SZYMON PTAK – is a graduate of the Faculty of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service and the Faculty of Power and Aeronautical Engineering at the Warsaw University of Technology. He also completed postgraduate studies in occupational health and safety at the Warsaw University of Technology and in technical safety in explosive atmospheres at the Central Mining Institute in Katowice. In 2016, he obtained his PhD degree at the Faculty of Chemical Technology and Engineering of the West Pomeranian University of Technology in Szczecin. In the same year he took up the position of Head of the Department of Electrical Power Engineering at SGSP. Since 2019, he holds the position of Head of the Department of Fire Technology. Mr Ptak conducts his scientific activity at the point of contact between power engineering and explosion safety, as well as electrostatics, in cooperation with the Central Institute for Labour Protection – National Research Institute. He is the author or co-author of dozens of publications and several short papers. He is a reviewer of articles for “Fire and Materials”, “Sustainability” and “Processes” journals and a member of two editorial boards of scientific journals.

KONRAD PŁACHETKO – ukończył studia I stopnia na Wydziale Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego w Szkole Głównej Służby Pożarniczej z tytułem inżyniera bezpieczeństwa pożarowego (2019). Obecnie studiuje automatykę i robotykę stosowaną na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Zainteresowania: sport, historia XX wieku, nowe technologie.

KONRAD PŁACHETKO – graduated from the Faculty of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service with the degree of Fire Safety Engineer (2019). He is currently studying Automation and Applied Robotics at the Faculty of Electrical Engineering, Warsaw University of Technology. Interests: sport, history of the 20th century, new technologies.