

Explosive properties of fungicidal plant protection products in the form of dust

Właściwości wybuchowe grzybobójczych środków ochrony roślin w formie pyłu

DOI: 10.15199/62.2024.3.9

Three com. available dust fungicides contg. captan or dodine as the active ingredient were tested for max. explosion pressure, deflagration index, lower explosion limit and limit O_2 concn. Comprehensive data were obtained on the explosiveness of the dust-air mix. resulting from dispersing a fungicide in a 20-L sphere. The highest values of the tested parameters were obtained for a dodine-contg. product. If a dusty explosive atmosphere was created, there was a serious risk of ignition. Due to the fact that the active substance content in the tested plant protection products was not 100%, in the case of pure substances, the explosion parameters may be much higher.

Keywords: dust, plant protection products, maximum explosion pressure, deflagration index, limiting oxygen concentration, lower explosion limit

Środki ochrony roślin są obecnie nieodłączną częścią nowoczesnego rolnictwa. W ciągu ostatnich lat wzrasta ich wykorzystanie w celu ograniczenia strat w produkcji rolnej oraz optymalizacji plonów na jednostkę powierzchni pól^{1, 2)}. Jedną z głównych grup środków ochrony roślin są fungicydy. Są to substancje, które zapobiegają lub leczą choroby grzybowe roślin, takie jak pleśń, rdza i mączniak. Warto mieć na uwadze, że zmiany klimatyczne będą również wpływały na większe wykorzystanie fungicydów. Wraz z ocieplaniem klimatu

Trzy dostępne na rynku środki grzybobójcze w postaci pyłu, zawierające kaptan lub dodinę jako substancję czynną, zbadano pod kątem maksymalnego ciśnienia wybuchu, wskaźnika deflagracji, dolnej granicy wybuchowości i granicznego stężenia tlenu. W wyniku badań w kuli o pojemności 20 L uzyskano kompleksowe dane dotyczące wybuchowości mieszaniny pyłowo-powietrznej powstałej w wyniku rozproszenia środka grzybobójczego w powietrzu. Największe wartości badanych parametrów uzyskano dla produktu zawierającego dodinę. Zawartość substancji aktywnej w badanych środkach ochrony roślin nie wynosi 100%, dlatego w przypadku czystych substancji parametry mogłyby być znacznie wyższe. Przeprowadzone badania pokazały, że w przypadku powstania pyłowej atmosfery wybuchowej pojawia się poważne zagrożenie spowodowane jej zapłonem. Skutki takiego wybuchu mogą być znacznie większe niż te obserwowane podczas wybuchu pyłów drewna.

Słowa kluczowe: środki ochrony roślin, maksymalne ciśnienie wybuchu, indeks deflagacyjny, graniczne stężenie tlenu, dolna granica wybuchowości

w Polsce mogą również zacząć pojawiać się zagrażające uprawom grzyby, obecne wcześniej jedynie w cieplejszych rejonach świata. Jednym z pomijanych zagrożeń stwarzanych przez fungicydy jest zagrożenie pożarowo-wybuchowe. W przeszłości na świecie pojawiały się duże pożary m.in. w Bazylei (1986 r.), Arkansas (1998 r.) i we wschodniej Wirginii w zakładach Bayer CropScience (2008 r.). Istotne jest, że poza dużymi fabrykami i magazynami pożarami mogą być objęte małe magazyny środków ochrony roślin oraz lokalne hurtownie.



Mgr inż. Jan PRZYBYSZ (ORCID: 0000-0002-3958-1581) ukończył studia magisterskie na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej. Obecnie jest asystentem w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych. Specjalność – badanie charakterystyk wybuchowych pyłów palnych oraz parametrów pożarowych.



Dr inż. Monika BORUCKA (ORCID: 0000-0003-0261-0147) w roku 2009 ukończyła studia na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. W 2014 r. uzyskała stopień doktora nauk chemicznych na tym samym wydziale. Obecnie pracuje w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym jako adiunkt w Zakładzie Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych. Specjalność – chemia analityczna, analiza zanieczyszczeń środowiska, zagrożenia pożarowe, identyfikacja produktów spalania.

*** Adres do korespondencji:**

Pracownia Bezpieczeństwa Chemicznego, Zakład Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, tel.: (22) 623-32-63, e-mail: jan.prybysz@ciop.pl

Table 1. Plant protection products from the group of fungicides selected for testing

Tabela 1. Środki ochrony roślin z grupy fungicydów wybrane do badań

Substancja aktywna	Wzór strukturalny	Środek ochrony roślin	Skład	Numer CAS
Kaptan		Malvin 80 WDG (pył)	80% kaptan 1–10% sulfonowany polimer aromatyczny 1–10% kaolin 0–5% sól sodowa dioktylosulfobursztynianu	133-06-2 1332-58-7 577-11-7
		Kaptan 50 WP (pył)	50% kaptan 5–15% Genapol X-080 0–45% kaolin	133-06-2 9043-30-5 1332-58-7
Dodyna		Syllit 65 WP (pył)	65% dodyna 5–10% dyspergator	2439-10-3

Środki ochrony roślin są dostępne w różnych postaciach, wśród których najczęściej spotykane to: koncentrat zawiesiny SC (*suspension concentrate*), proszek zwilżalny WP (*wettable powder*), koncentrat do sporządzania emulsji EC (*emulsifiable concentrate*), granulaty dyspergowane w wodzie WG (*water dispersible granule*), olejowa dyspersja OD (*oil dispersion*), płynny koncentrat FS (*flowable concentrate*) i granulaty GR (*granule*). Wśród tych form znajdują się takie, które są ciałami stałymi o wielkości cząstek poniżej 500 µm, co sprawia, że mogą stwarzać zagrożenie atmosferą wybuchową³⁻⁵). Jednak na zdolność do wybuchu atmosfery pyłowo-powietrznej poza wielkością cząstek wpływ ma wiele innych czynników. Należą do nich m.in. kształt, skład chemiczny, stężenie pyłu w powietrzu, zawartość tlenu w otaczającym powietrzu oraz turbulentne ruchy powietrza, które wpływają na tworzenie się frontów spalania mieszaniny pyłowo-powietrznej^{6, 7}).

Celem pracy była identyfikacja zagrożenia związanego z wybuchem mieszaniny pyłowo-powietrznej, stwarzanego przez środki ochrony roślin z grupy fungicydów.

Część doświadczalna

Surowce

Do badań charakterystyk wybuchu wybrano 3 różne środki ochrony roślin z grupy fungicydów, zawierające najczęściej stosowane substancje aktywne. Z uwagi na brak podobnych badań uznano, że badane materiały powinny w znacznym stopniu różnić się między sobą. Dlatego do badań wybrano środki różniące się zawartością substancji aktywnej. Dwa z nich zawierały tę samą substancję aktywną, jaką był kaptan (Kaptan 50 WP oraz Malvin 80 WDG), a trzeci badany środek zawierał dodynę (Syllit 65 WP). Składy badanych środków ochrony roślin, a także wzory strukturalne substancji aktywnych przedstawiono w tabeli 1. Dla wszystkich badanych środków ochrony roślin przeprowadzono analizę sitową, która wykazała, że 100% próbek przeszło przez sito o wielkości oczek 500 µm. Przed pomiarami próbki materiałów kondycjonowano zgodnie z normą⁸) (temp. 23±2°C i wilgotność 50±5%) przez co najmniej 24 h, aż do uzyskania stałej masy (różnica w masie próbek nie przekraczała 0,1%).



Dr inż. Kamila MIZERA (ORCID: 0000-0001-7427-7588) ukończyła studia magisterskie na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Inżynierii Materiałowej. W 2021 r. uzyskała stopień doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Pracuje w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym w Zakładzie Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych, obecnie na stanowisku adiunkta. W swojej pracy naukowej zajmuje się tematyką związaną z oceną palności i analizą substancji niebezpiecznych powstających podczas rozkładu i spalania różnych grup materiałów, jak również opracowywaniem metod uniepalniania tworzyw sztucznych. Specjalność – inżynieria materiałowa, badanie palności i emisji dymów, analiza substancji powstających podczas spalania.



Dr Agnieszka GAJEK (0000-0003-2461-5352) w roku 1998 ukończyła studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego, a w 2003 r. studia podyplomowe z zakresu bezpieczeństwa procesów przemysłowych na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. Stopień doktora uzyskała w 2010 r. w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym w Warszawie. Jest adiunktem i kierownikiem Pracowni Bezpieczeństwa Chemicznego w Zakładzie Zagrożeń Chemicznych i Pyłowych CIOP-PIB. Specjalność – przeciwdziałanie poważnym awariom przemysłowym i ograniczanie ich skutków.

Metodyka badań

W celu uzyskania charakterystyk wybuchu badanych pyłów przeprowadzono badania w 20-litrowej sferze do badania wybuchowości pyłów (20-L komora Siwek), zgodnie z normami⁹⁻¹³). Badanymi parametrami było maksymalne ciśnienie wybuchu (P_{\max}), indeks deflagracji (K_{St}), dolna granica wybuchowości (DGW) oraz graniczne stężenie tlenu (GST).

Badanie polegało na przeprowadzeniu serii pomiarów dla różnych ilości pyłu. W pierwszej fazie badania na elektrodach znajdujących się w pokrywie urządzenia umieszczono 2 identyczne chemiczne zapalniki pirotechniczne o energii 5 lub 1 kJ każdy. Po zamknięciu komory powietrze w zbiorniku kuli odpompowano do wartości ciśnienia 0,4 bar, a w zasobniku pyłowym umieszczono odważoną próbkę pyłu. W trakcie pomiaru zasobnik pyłowy napełniono powietrzem do ciśnienia 20 bar (g), a następnie otwarto zawór ciśnieniowy, w wyniku czego pył wtłoczony został do kuli pomiarowej. Ciśnienie w jej wnętrzu wyrównało się do ciśnienia atmosferycznego. Po czasie opóźnienia wynoszącym 60 ms względem wtłoczenia pyłu i wyrównania ciśnień zapalniki pirotechniczne ulegały zapłonowi w wyniku przekazania im energii elektrycznej. Jeśli podana mieszanina pyłowo-powietrzna uległa zapłonowi, to czujniki ciśnienia dynamicznego odnotowały zmianę ciśnienia w czasie oraz wartość maksymalną ciśnienia wewnątrz zbiornika. Po wykonaniu badania zbiornik przedmuchiwało, dokładnie czyszczono, montowano nowe zapalniki, wprowadzano nowy pył do zasobnika i wykonywano kolejne badanie.

Badania ciśnienia maksymalnego wybuchu pyłu P_{\max} , maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia dp/dt_{\max} i indeksu deflagracji K_{St} wykonywane były w identyczny sposób poprzez wprowadzanie do komory badawczej kolejnych stężeń mieszaniny pyłu z powietrzem. Były to stężenia o wartościach 60, 125, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500 g/m³. Badania prowadzono do momentu oznaczenia maksymalnych wartości parametrów. W badaniu wykonywano przy najmniej po 3 pomiary dla stężeń sąsiadujących z wartością maksymalną. Wartość P_{\max} obliczano na podstawie 3 oznaczeń jako średnią arytmetyczną z wartości maksymalnego ciśnienia wybuchu uzyskanych w każdej serii pomiarowej, zgodnie ze wzorem:

$$P_{\max} = \frac{P_{\max}(\text{seria 1}) + P_{\max}(\text{seria 2}) + P_{\max}(\text{seria 3})}{3}$$

Dolna granica wybuchowości (DGW) jest to najmniejsze stężenie pyłu w mieszaninie palnej, poniżej którego nie jest możliwy zapłon mieszaniny pod wpływem czynnika inicjującego (np. iskra elektryczna lub zapalnik chemiczny o określonej energii) i dalsze samoczynne rozprzestrzenianie płomienia na całą niespaloną objętość. Badanie DGW przeprowadzono adekwatnie do badań maksymalnego ciśnienia wybuchu. Różnica polegała na zastosowaniu zapalników o mniejszej wartości energii. W badaniu maksymalnego ciśnienia wybuchu stosowano zapalniki o energii 5 kJ, a w przypadku badania dolnej granicy wybuchowości

stosowano zapalniki o energii 1 kJ. Badania rozpoczęto od stężenia 250 g/m³, następnie dla 120, 60 i 30 g/m³ do momentu zapłonu, w wyniku którego przyrost ciśnienia wybuchu przekroczył wartość 0,5 bar. Dolną granicę wybuchowości oznaczono po 3 próbach bez zapłonu obłoku pyłu o jak największym stężeniu.

Graniczne stężenie tlenu (GST) jest to parametr określający, przy jakim najmniejszym stężeniu tlenu w powietrzu możliwy jest zapłon mieszaniny pod wpływem czynnika inicjującego (zapalnik chemiczny) i dalsze samoczynne rozprzestrzenianie się płomienia na całą niespaloną objętość mieszaniny pyłowo-powietrznej. Badanie zaczęto od określenia maksymalnej wartości indeksu deflagracji dla zapalników o energii 1 kJ, po czym zmniejszono stężenie tlenu w powietrzu o 6 punktów procentowych (p.p.) do poziomu 15%. Następnie, w zależności od tego, czy nastąpił zapłon mieszaniny pyłowo-powietrznej, czy nie, zmieniano stężenie tlenu o 1 p.p. w celu znalezienia stężenia, dla którego nie nastąpi zapłon w 3 próbach. Zmianę stężeń tlenu prowadzono poprzez wtłaczanie odpowiednich ilości azotu do sfery (po wcześniejszym wytworzeniu podciśnienia) oraz do zbiornika na pył.

Wyniki badań i ich omówienie

W wyniku przeprowadzonych pomiarów otrzymano charakterystyki wybuchu środków ochrony roślin. W trakcie badań oznaczono maksymalne ciśnienie wybuchu P_{\max} (bar), indeks deflagacyjny K_{St} (bar·m/s), dolną granicę wybuchowości pyłu DGW (g/m³) i graniczne stężenie tlenu GST (%). Na podstawie uzyskanych wyników poszczególne pyły przydzielono do klas wybuchowości wg Occupational Safety and Health Administration (OSHA)¹⁴) (tabela 2) i zestawiono je w tabeli 3. Z przeprowadzonych pomia-

Table 2. Classification of dust explosiveness based on deflagration index (K_{St})

Tabela 2. Klasyfikacja wybuchowości pyłów na podstawie indeksu deflagracji (K_{St})

Klasa wybuchowości pyłów	K_{St} bar·m/s	Charakterystyka	Przykładowe materiały
St 0	0	niewybuchowa	krzemionka
St 1	> 0 $i \leq 200$	wybuchowa	mleko w proszku, węgiel drzewny, siarka, cukier
St 2	> 200 $i \leq 300$	silnie wybuchowa	celuloza, mączka drzewna
St 3	> 300	bardzo silnie wybuchowa	aluminium, magnez

Table 3. Explosion characteristics of selected plant protection products from the fungicide group

Tabela 3. Charakterystyka wybuchu wybranych środków ochrony roślin z grupy fungycydów

Środek ochrony roślin	P_{\max}	K_{St}	Klasa wybuchowości pyłu	DGW	GST
	bar			bar·m/s	g/m ³
Syllit 65 WP	7,7	277	2	30	13
Malvin 80 WDG	7,3	159	1	60	15
Kaptan 50 WP	6,8	138	1	60	16

rów wynika, że zagrożenie pyłową atmosferą wybuchową w przypadku środków ochrony roślin z grupy fungycydów jest realne, a wysokie wartości uzyskanych parametrów pokazują, że konsekwencje takiego wybuchu mogą być poważne. Największe wartości badanych parametrów uzyskano dla środka Syllit 65 WP, w którego skład wchodzi ok. 65% dodyny (2-dodecyloguanidyna). Jest to środek z grupy guanidyn, których związki charakteryzują się generowaniem dużych ilości gazów i stosowane są m.in. w gazogeneratorach. Decydujący wpływ na uzyskiwane wartości nadciśnienia może mieć mechanizm rozkładu samej dodyny. Związki z grupy guanidyn, ze względu na dużą zawartość azotu w cząsteczce, charakteryzują się generowaniem dużych ilości produktów gazowych podczas rozkładu. Jednym z przykładów jest nitroguanidyna, która jest wykorzystywana jako generator gazu^{15, 16}). Dodatkowo badania nad mechanizmem spalania *n*-węglowodorów alifatycznych pokazują, że podczas rozkładu termicznego łańcuch alkilowy ulega fragmentacji i powstają duże ilości lekkich węglowodorów. Powstałe substancje ulegają szybkiemu spalaniu, co mogło mieć wpływ na wyższe wartości P_{max} ^{17, 18}).

Według wcześniejszych badań¹⁹) mechanizm termicznego rozkładu kaptanu jest znacznie bardziej złożony. W badaniach tych podczas spalania kaptanu powstawały związki zawierające siarkę, chlor, a także węglowodory aromatyczne, m.in. benzonitryl i benzen. W przytoczonych badaniach spalanie było prowadzone w izotermicznym reaktorze przepływowym, prawdopodobnie z tego powodu gama związków powstałych podczas gwałtownego spalania w 20-litrowej sferze była szersza i obejmowała produkty, które powstają pod kontrolą kinetyczną reakcji. Uwarunkowane jest to znacznie większą szybkością przejścia frontu spalania w wyniku inicjacji zapłonu zapalnikami chemicznymi w porównaniu z kontrolowanym spalaniem. Powstawanie substancji pod kontrolą kinetyczną, a nie termodynamiczną często oznacza powstawanie substancji o niższej entalpii tworzenia. Jest to przyczyną uwolnienia mniejszych ilości energii, co bezpośrednio wpływa na niższą wartość P_{max} ²⁰). Prawdopodobnie mechanizmy te również sprzyjały osiągnięciu najmniejszego stężenia tlenu, przy którym dochodziło do zapłonu mieszaniny pyłowo-powietrznej. Powstające lekkie węglowodory podczas rozkładu łańcucha alkilowego pod wpływem inicjacji zapalnikiem chemicznym łatwiej ulegną zapłonowi w warunkach ograniczonego dostępu do tlenu, tak aby podczas utleniania tych substancji generowana była odpowiednia ilość energii w postaci ciepła. Badane środki charakteryzują się niskimi wartościami dolnej granicy wybuchowości, która wynosi 30 g/m³ dla środka Syllit 65 WP oraz 60 g/m³ dla środków zawierających kaptan. Wpływ stężenia pyłu w powietrzu na P_{max} oraz K_{St} przedstawiono na rys. 1–3.

Należy pamiętać, że są to środki ochrony roślin, których nośnikiem jest kaolin, czyli substancja niepalna. Istnieje duże prawdopodobieństwo, że wartości charakterystyk

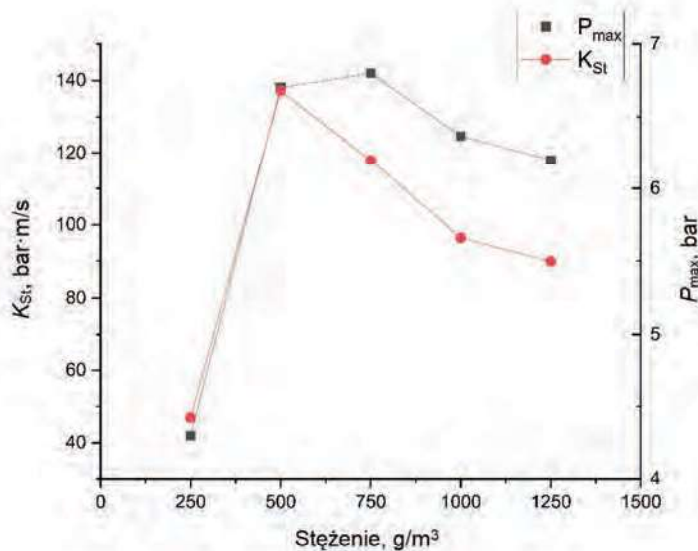


Fig. 1. P_{max} and K_{St} values for different dust concentrations in air of Kaptan 50 WP
Rys. 1. Wartości P_{max} oraz K_{St} dla różnych stężeń pyłu środka Kaptan 50 WP w powietrzu

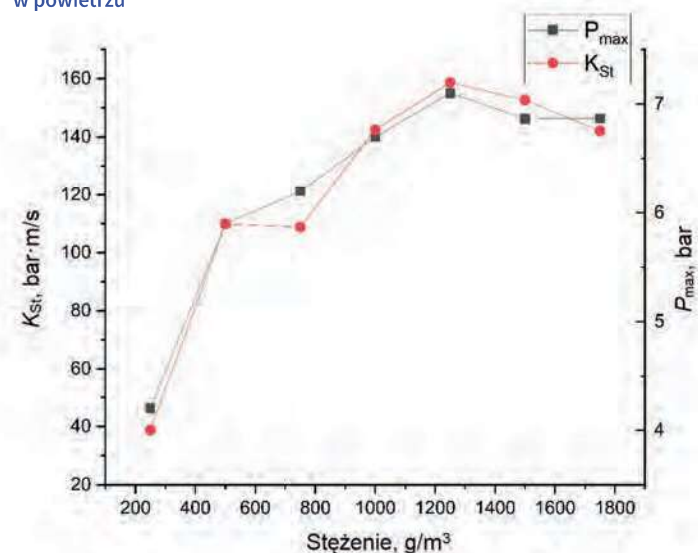


Fig. 2. P_{max} and K_{St} values for different dust concentrations in air of Malvin 80 WDG
Rys. 2. Wartości P_{max} i K_{St} dla różnych stężeń pyłu środka Malvin 80 WDG w powietrzu

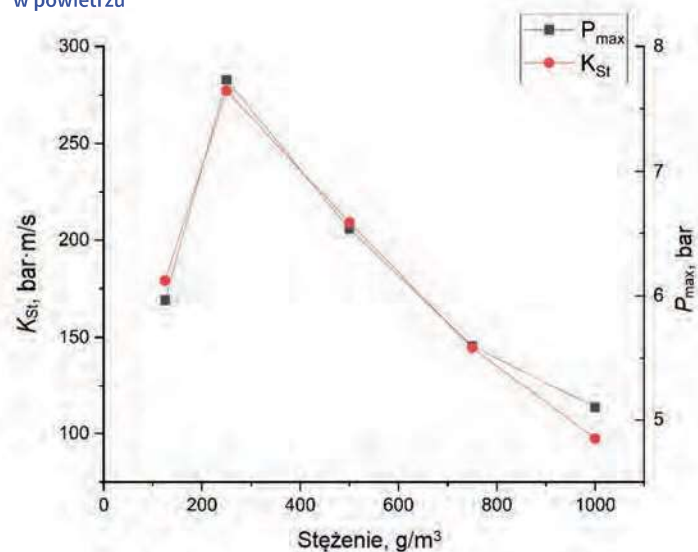


Fig. 3. P_{max} and K_{St} values for different dust concentrations in air of Syllite 65 WP
Rys. 3. Wartości P_{max} oraz K_{St} dla różnych stężeń pyłu środka Syllit 65 WP w powietrzu

wybuchowych czystych substancji aktywnych mogą osiągać znacznie większe wartości, co warto mieć na uwadze podczas produkcji tych środków. Szczególnie że porównując z wynikami uzyskanymi przez Liu i współpr.²¹⁾, wartości parametrów wybuchowych uzyskanych dla środków ochrony roślin zawierających kaptan są podobne do uzyskiwanych dla pyłów drewna, natomiast w przypadku środka Syllit 65 WP uzyskane wartości są znacznie wyższe niż dla pyłów drewna.

Podsumowanie

Badano środki ochrony roślin z grupy fungicydów w postaci pyłu, które stwarzają zagrożenie wybuchem. Wyniki uzyskane podczas badań w 20-litrowej sferze wskazują, że w przypadku wytworzenia i zapłonu mieszaniny pyłowo-powietrznej zawierającej środki ochrony roślin w postaci pyłu zagrożenie dla pracowników oraz strażaków może być duże. Środki ochrony roślin z grupy fungicydów zawierające kaptan jako substancję aktywną osiągają porównywalne wartości badanych parametrów z wartościami dla pyłów drewna. Podczas badania charakterystyk wybuchu środka zawierającego dodynę, z uwagi na jej strukturę cząsteczkową, osiągnięto wartość indeksu deflagracyjnego blisko 2-krotnie większą w porównaniu ze środkami zawierającymi kaptan. Również pozostałe wartości badanych parametrów były stosunkowo wyższe niż w przypadku pozostałych substancji. Warto również zwrócić uwagę na fakt, że największe wartości P_{max} i K_{St} w przypadku środka Syllit 65 WP uzyskano już dla stężenia 250 g/m³, a wartości DGW na poziomie 30 g/m³. Szczególnie niebezpieczne mogą być wybuchy wtórne podczas pożarów składowisk tych substancji. W sytuacji gdy podczas pożaru dostanie się powietrze z zewnątrz i nastąpi przyspieszenie spalania gorących gazów znajdujących się w magazynie, mogą zostać wytworzone silne ruchy powietrza zdolne do wzbicia magazynowanych środków ochrony roślin w postaci pyłu. Tak wytworzona mieszanina mająca wokół silne źródło inicjacji spalania może wygenerować znacznie większe wartości nadciśnienia od tych zbadanych eksperymentalnie.

Opracowano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie zadań

śłuż państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej (do 12 grudnia 2023 r. pod nazwą: Ministerstwo Rodziny i Polityki Społecznej). Zadanie nr 5.ZS.02 pt. „Rozwój serwisu informacyjnego nt. przeciwdziałania poważnym awariom przemysłowym”, Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Otrzymano: 16-01-2024

LITERATURA

- [1] Główny Urząd Statystyczny, *Rolnictwo w 2021 r.*, Warszawa 2022.
- [2] Główny Urząd Statystyczny, *Środki produkcji w rolnictwie w roku gospodarczym 2019/2020*, Warszawa 2021.
- [3] W. Domański, *Bezp. Pracy Nauka Praktyka* 2016, **7**, 14.
- [4] I.M. Fanebust, N. Fernandez-Anez, Influence of particle size and moisture content of wood particulates on deflagration hazard, Technical Report, Fire Protection Research Foundation, USA Quincy 2019.
- [5] R.K. Eckhoff, *Dust explosions in the process industries*, Elsevier, Amsterdam 2003, doi: 10.1016/B978-0-7506-7602-1.X5000-8.
- [6] D.A. Khudhur, M.W. Ali, T.A.T. Abdullah, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021, **1892**, 012023, doi: 10.1088/1742-6596/1892/1/012023.
- [7] R.K. Eckhoff, [w:] *Methods in chemical process safety* (red. P.R. Amyotte, F.I. Khan), t. 3, Academic Press, 2019, 7, doi: 10.1016/bs.mcps.2019.03.001.
- [8] ISO 554:1976, *Standard atmospheres for conditioning and/or testing. Specifications*.
- [9] PN-EN ISO/IEC 80079-20-2:2016-05, *Atmosfery wybuchowe. Cz. 20-2. Właściwości materiałowe. Metody badań pyłów palnych*.
- [10] PN-EN 14034-1+A1:2011, *Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu. Cz. 1. Oznaczanie maksymalnego ciśnienia wybuchu p_{max} obłoków pyłu*.
- [11] PN-EN 14034-2+A1:2011, *Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu. Cz. 2. Oznaczanie maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu $(dp/dt)_{max}$ obłoków pyłu*.
- [12] PN-EN 14034-3+A1:2011, *Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu. Cz. 3. Oznaczanie dolnej granicy wybuchowości DGW obłoków pyłu*.
- [13] PN-EN 14034-4+A1:2011, *Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu. Cz. 4. Oznaczanie granicznego stężenia tlenu GST obłoków pyłu*.
- [14] OSHA, Hazard Communication Guidance for Combustible Dusts, OSHA 3371-08, 2009.
- [15] Y. Izato, K. Shiota, K. Satoh, T. Satoh, Y. Yahata, A. Miyake, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2020, **151**, 104918, doi: 10.1016/J.JAAP.2020.104918.
- [16] Z. Han, Y. Zhang, Z. Du, Q. Jiang, Q. Yao, *J. Clean. Prod.* 2018, **199**, 763, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.07.194.
- [17] C. Movileanu, D. Razus, V. Giurcan, V. Gosa, *J. Phys. Conf. Ser.* 2014, **530**, 12014, doi: 10.1088/1742-6596/530/1/012014.
- [18] A. D'Anna, A. Violi, A. D'Alessio, *Combust. Flame* 2000, **121**, nr 3, 418, doi: 10.1016/S0010-2180(99)00163-7.
- [19] K. Chen, J.C. MacKie, E.M. Kennedy, B.Z. Długogorski, *Environ. Sci. Technol.* 2010, **44**, nr 11, 4149, doi: 10.1021/es9037935.
- [20] R.T. Balmer, [w:] *Modern engineering thermodynamics* (red. R.T. Balmer), Academic Press, Boston 2011, 591, doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374996-3.00015-4.
- [21] A. Liu, J. Chen, X. Huang, J. Lin, X. Zhang, W. Xu, *Bioresour. Technol.* 2019, **294**, 122168, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122168.

