

st. bryg. dr hab. Marzena Półka, prof. nadzw. SGSP<sup>a)</sup>\*

<sup>a)</sup>Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego / The Main School of Fire Service, Fire Engineering Department

\*Autor korespondencyjny / Corresponding author: mpolka@sgsp.edu.pl

## Analiza podatności na zapłon wytypowanych pyłów spożywczych

### Ignition Sensitivity Analysis of Selected Food Dusts

### Анализ восприимчивости к воспламенению отдельных видов пищевых порошкообразных продуктов

#### ABSTRAKT

**Cel:** Celem artykułu była analiza porównawcza parametrów zapalności, palności i termostabilności wybranych rodzajów mąk. Do badań użyto dostępne na rynku produkty spożywcze stosowane m.in. w przemyśle gastronomicznym, spożywczym czy w gospodarstwach domowych, tj. mąki z ciecierzycy, mąki pszennej, owsianej, ryżowej oraz kukurydzianej. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych wykazano, że na zapalność mąk wpływa rodzaj rośliny, z której pochodzi, jak również grubość warstwy pyłu.

**Wprowadzenie:** Zagrożenie wybuchem pyłów spożywczych może występować nie tylko w trakcie normalnych warunków pracy urządzeń lub procesów technologicznych, ale przede wszystkim w przypadku pracy wadliwej i awarii. Wybuchowe mieszaniny pyłowo-powietrzne mogą tworzyć się podczas transportu czy magazynowania surowców, takich jak zboże, cukier, mąka. W celu zaprojektowania i doboru odpowiednich urządzeń, wyposażenia młynów, elewatorów oraz innych obiektów, w których wytwarza się, przetwarza oraz magazynuje rozdrobnione produkty zbożowe, należy zbadać, jakie właściwości powstałych w tych warunkach pyłów decydują o zwiększonym zagrożeniu wybuchem i pożarem.

**Metody:** Do oznaczania palności i zapalności badanych próbek pyłów mąk przeprowadzono badania dotyczące: oznaczania minimalnej temperatury zapłonu pyłów od nagrzaną powierzchni według PN-EN 50281-2-1:2002, wyznaczenia temperatury zapalenia produktów rozkładu termicznego według normy PN-69/C-8902, analizy termograwimetrycznej według PN-EN ISO 11358-1:2014 oraz oznaczania ciepła spalania według PN-EN ISO 1716:2010. Przedstawiono wartości minimalnych temperatur zapłonu warstw i obłoków, temperatury zapalenia palnej fazy gazowej, wartości ciepła spalania oraz wykonano analizę termograwimetryczną czterech rodzajów produktów spożywczych: mąki pszennej, mąki z ciecierzycy, mąki owsianej, ryżowej oraz kukurydzianej.

**Wyniki:** Stwierdzono, że pył z mąki ciecierzycy spośród przebadanych pyłów stanowi największe zagrożenie pożarowe. Posiada najniższe temperatury zapłonu i początku rozkładu termicznego, a dopuszczalne temperatury powierzchni urządzeń pracujących w obecności tego pyłu dla warstwy o grubości 5 mm, 12,5 mm nie mogą przekroczyć kolejno: 245°C, 200°C.

**Wnioski:** Przeprowadzone badania eksperymentalne dają możliwość zminimalizowania zagrożeń i uzasadniają konieczność szczególnie dbałego i częstego usuwania nagromadzonych pyłów, przestrzegania reżimów technologicznych i wymaganej częstotliwości prowadzenia przeglądów i konserwacji biorących udział w procesie technologicznym maszyn i urządzeń. Pyły mąk – pszennej, kukurydzianej i ryżowej wykazują podobne właściwości fizykochemiczne i palne, co można zauważyć na przykładzie wartości gęstości nasypowej, temperatury zapalenia, minimalnej temperatury zapalenia obłoku oraz początkowej temperatury rozkładu termicznego. Biorąc pod uwagę wartość ciepła spalania i gęstość obciążenia ogniowego najkorzystniejszą parametry ma mąka ryżowa. Natomiast największą zapalność fazy gazowej od małego płomienia spośród badanych mąk posiada mąka owsiana.

**Słowa kluczowe:** pył, bezpieczeństwo pożarowe

**Typ artykułu:** oryginalny artykuł naukowy

---

Przyjęty: 09.05.2018; Zrecenzowany: 06.08.2018; Zatwierdzony: 05.11.2018;

Identyfikator ORCID autora: 0000-0002-2280-8137;

Proszę cytować: BiTP Vol. 51 Issue 3, 2018, pp. 14–24, doi: 10.12845/bitp.51.3.2018.1;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

---

#### ABSTRACT

**Aim:** The paper presents a comparative analysis of parameters for ignitability, flammability and thermal stability for each of the selected types of flour. The tests were performed using food products available on the market and used in the catering and food industry as well as in households, i.e. chickpea, wheat, oat, rice and maize flour. Experimental research demonstrated that the combustibility of flour depends on the type of the plant from which it is made and the thickness of the dust layer.

**Introduction:** The hazard caused by an explosion of food dusts may be present not only under normal operating conditions of appliances or during technological processes, but primarily during the faulty work of devices or system malfunctions. Explosive mixtures of dust and air may be formed during

the transport or storage of raw materials, such as cereals, sugar or flour. In order to ensure the appropriate design and selection of suitable appliances, equipment of mills, elevators and other facilities in which ground grain products are produced, processed and stored, a study should be made as to which properties of dusts generated in those conditions cause an increased danger of explosion and fire.

**Methods:** To determine the flammability and ignitability of the analysed samples of flour dusts, the following tests were performed: determining the minimum ignition temperature of dusts igniting from a heated surface in accordance with PN-EN 50281-2-1:2002, specifying the ignition temperature of thermal decomposition products according to PN-69/C-8902, thermogravimetric analysis in line with PN-EN ISO 11358-1:2014, and determining combustion heat according to PN-EN ISO 1716:2010. The presented values included the minimum ignition temperatures of layers and clouds, the ignition temperature of the flammable gaseous phase and the value of combustion heat. A thermogravimetric analysis was carried out of five types of food products used, inter alia, in the catering industry, food industry and in households, including wheat, chickpea, oat, rice and maize flour.

**Results:** It was found that among all the tested types of dusts the chickpea flour dust causes the highest fire hazard. It has the lowest temperature of ignition and of the onset of thermal decomposition, and the admissible temperatures of the surface of appliances operating in the presence of this dust, for a layer of 5 mm and 12.5 mm may not exceed 245°C and 200°C, respectively.

**Conclusions:** The conducted experimental tests allow minimising the hazards and justify the necessity of ensuring a particularly thorough and frequent removal of accumulated dusts, respecting technological regimes and the required frequency of inspections and maintenance activities of all machines and appliances used in the technological process. The dusts of flours made of wheat, maize and rice were found to have similar physicochemical and flammable properties, which may be seen in the example of the bulk density value, ignition temperature, minimum cloud ignition temperature and the initial temperature of thermal decomposition. Given the value of combustion heat and fire load density, it was found that rice flour offers the most favourable parameters. The highest ignitability of the gaseous phase by a small flame among the tested types of flour was found for oat flour.

**Keywords:** dust ignitability, fire safety

**Type of article:** original scientific article

Received: 09.05.2018; Reviewed: 06.09.2018; Accepted: 05.11.2018;

Author's ORCID ID: 0000-0002-2280-8137;

Please cite as: BITP Vol. 51 Issue 3, 2018, pp. 14–24, doi: 10.12845/bitp.51.3.2018.1;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

## АННОТАЦИЯ

**Цель:** Целью данной статьи является сравнительный анализ параметров воспламеняемости, горючести и термостабильности отдельных видов муки. В исследовании использовались коммерчески доступные пищевые продукты, применяемые, среди прочего, в гастрономической, пищевой и бытовой отраслях, а именно: мука из нута, пшеничная мука, овсяная мука, рисовая мука и кукурузная мука. На основе проведенных экспериментальных исследований было показано, что на воспламеняемость муки влияет тип растения, из которого она изготовлена, а также толщина слоя муки.

**Введение:** Риск взрыва пыли пищевого порошкообразного продукта может возникать не только при нормальных условиях эксплуатации оборудования или технологических процессов, но прежде всего в случае аварийной работы и сбоя. Взрывоопасные пылевоздушные смеси могут образовываться при транспортировке или хранении сырья, такого как зерно, сахар и мука. Для проектирования и выбора соответствующего оборудования и снаряжения для мельниц, элеваторов и других объектов, в которых производится, обрабатывается и хранится зерновая продукция, необходимо изучить, какие свойства порошкообразных продуктов, возникающие в результате этих условий, определяют повышенный риск взрыва и пожара.

**Методы:** Для определения горючести и воспламеняемости испытуемых образцов муки были проведены следующие испытания: определение минимальной температуры воспламенения муки от нагретой поверхности в соответствии с PN-EN 50281-2-1: 2002, определение температуры воспламенения продуктов термического разложения в соответствии со стандартом PN-69 / C-8902, термогравиметрический анализ согласно PN-EN ISO 11358-1: 2014 и определение теплоты сгорания согласно PN-EN ISO 1716: 2010. Были представлены значения минимальных температур воспламенения слоев и облаков пыли, температура воспламенения газовой фазы возгорания пыли, теплота сгорания и термогравиметрический анализ четырех видов пищевых продуктов: пшеничной муки, муки из нута, овсяной мука, рисовой муки и кукурузной муки.

**Результаты:** Было обнаружено, что пыль муки из нута среди проверенной пыли является самой пожароопасной. Она имеет самые низкие температуры воспламенения и начала термического разложения, а допустимые температуры поверхности устройств, работающих в присутствии этой пыли для толщины слоя 5 мм, 12,5 мм, не могут превышать соответственно: 245°C, 200°C.

**Выводы:** Проведенные экспериментальные испытания дают возможность минимизировать риски и обосновать необходимость особо тщательного и частого удаления накопленной пыли, соблюдения технологических режимов и требуемой частоты проверок и обслуживания машин и устройств, участвующих в технологическом процессе. Пыль муки - пшеницы, кукурузы и риса демонстрируют сходные легковоспламеняющиеся и физико-химические свойства, что видно из примера объемной плотности, температуры воспламенения, минимальной температуры воспламенения облаков и начальной температуры термического разложения. Учитывая величину теплоты сгорания и плотность огневой нагрузки, наиболее выгодными параметрами обладает рисовая мука. Напротив, самую высокую воспламеняемость при газовой фазе из небольшого пламени испытанной муки имеет овсяная мука.

**Ключевые слова:** пыль, пожарная безопасность

**Вид статьи:** оригинальная научная статья

Принята: 09.05.2018; Рецензирована: 06.08.2018; Одобрена: 05.11.2018;

Идентификатор ORCID автора: 0000-0002-2280-8137;

Просим ссылаться на статью следующим образом: BITP Vol. 51 Issue 3, 2018, pp. 14–24, doi: 10.12845/bitp.51.3.2018.1;

Настоящая статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

## Wprowadzenie

Zagrożenie wybuchem pyłów spożywczych jest bardzo ważnym zagadnieniem nie tylko z powodu generowanych przez taki wybuch strat materialnych, ale także ze względu na jego istotny wpływ na ciągłość dostaw żywności. Wybuchowe mieszaniny pyłowo-powietrzne mogą powstawać podczas transportu (np. w przenośnikach kubełkowych) oraz magazynowania surowców, takich jak zboże, cukier czy mąka. Do wybuchu może więc dojść wewnątrz urządzeń produkcyjnych, w których pył palny powstaje, jest transportowany, obrabiany lub suszony, jak również na zewnątrz tych urządzeń, w tym w przestrzeniach i na powierzchniach, gdzie może on zalegać w postaci warstw tzw. pyłu osiadłego. W wyniku np. złej wentylacji, nagłego zawirowania powietrza lub wybuchu wewnątrz urządzenia produkcyjnego pył osiadły może wznieść się i utworzyć niebezpieczną chmurę pyłowo-powietrzną o stężeniu wybuchowym, która w kontakcie ze źródłem zapłonu może zapalić się i spowodować wybuch. Zapalność warstw osiadłego pyłu mąk oraz mieszanin pyłowo-powietrznych jest poważnym zagrożeniem dla wielu obiektów przemysłowych i miejsc, w których składowane lub transportowane są rozdrobnione substancje stałe [1-13]. W dawnych czasach zagrożenie wybuchem mąk występowało w młynach, spichlerzach oraz w piekarniach. Jednym z pierwszych udokumentowanych zdarzeń związanych z poruszaną tematyką był przypadek wybuchu mąki w piekarni w Turynie we Włoszech, który nastąpił w grudniu 1785 r. Wybuch spowodował stłuczenie szyb we wszystkich oknach piekarni i uszkodzenie konstrukcji budynku. Na skutek osypania się zbyt dużej ilości mąki doszło do jej wzburzenia i wzniesienia w powietrze pyłu, który uległ zapłonowi od zawieszanej lampy [5]. Kolejnym przypadkiem, do którego warto się odnieść, jest wybuch z 1878 r. w Washburn a Mill w Minnesocie [11]. W siedmiopiętrowym młynie, do obsługi którego zatrudniano 200 pracowników, w godzinach porannych doszło do trzech dużych wybuchów, w wyniku których zginęła cała czternastoosobowa załoga nocnej zmiany. Wskutek rozprzestrzeniania się pożaru na okoliczne budynki zmarły także kolejne cztery osoby. Podczas dochodzenia ustalono, że zapłon obłoku pyłu został zainicjowany przez iskrę wytworzoną poprzez ocieranie się o siebie dwóch niedostatecznie zwilżonych kamieni młyńskich. Ten wypadek przyczynił się do wprowadzenia w USA szerokich reform w przemyśle młynarskim. Obejmowały one kwestie montażu odpowiednich systemów wentylacyjnych i innych urządzeń zabezpieczających. Według statystyk w latach 1785–2012 na terenie USA doszło do 1611 wybuchów i pożarów z udziałem pyłów palnych. Aż 645 (około 40%) zdarzeń zaszło w zakładach produkujących żywność. Nagrzane powierzchnie elementów pracujących maszyn stanowiły około 23% przypadków, w wyniku których dochodziło do zapłonu pyłów względem pozostałych sklasyfikowanych źródeł zapłonu [10]. Stopniowo wprowadzano rozwiązania zmniejszające ryzyko powstania zagrożenia wynikającego z pojawienia się warstw i obłoków pyłów w niepożądanym miejscach oraz takie, które redukowały siłę zniszczeń i strat w ludziach w przypadku wystąpienia zapłonu pyłów w zakładach. Mimo to nadal dochodzi do zdarzeń z udziałem pyłów. Przykładem może być wybuch pyłu zbożowego w młynie, do którego doszło w kwietniu 2013 r. w Statesville w USA [13]. Według danych

## Introduction

The risk of food dust explosion is a crucial issue not only due to financial losses generated by such explosions, but also due to its high impact on the continuity of food supplies. Explosive mixtures of dust and air may form during transport (e.g. in bucket elevators) and during the storage of raw materials such as cereals, sugar and flour. An explosion may occur inside the manufacturing equipment where the combustible dust is produced, transported, processed or dried, and outside the equipment, including spaces and surfaces where it can linger in the form known as settled dust. As a result of, e.g., poor ventilation, sudden air whirl or an explosion inside a manufacturing device, settled dust may be made airborne and create a dangerous dust and air cloud with an explosive concentration, which in contact with a source of ignition may ignite and cause an explosion. The flammability of settled dust layers and mixtures of dust and air is a serious threat for many industrial buildings and storage or transport sites of pulverised solid substances [1-13]. In the past, the risk of flour explosion was present in mills, granaries and bakeries. One of the first documented events of this type was the flour explosion in a bakery in Turin, Italy, in December 1785. The explosion shattered all the windows in the bakery and damaged the building's structure. As the surface had been covered with an excessive amount of flour, the dust was stirred and rose into the air where it ignited from a hanging lamp [5]. Another notable case was the explosion of 1978 in Washburn A Mill, Minnesota [11]. One morning, the seven-floor mill employing 200 people was shaken by large explosions, which killed all 14 people working the night shift. Fire spread to the neighbouring buildings, killing another four people. The investigators discovered that the dust cloud ignition had been started by a spark created by two insufficiently moistened millstones rubbing against each other. The accident gave rise to large-scale reforms in the US milling industry, covering the installation of ventilation systems and other security elements. According to statistics, in 1785-2012 in the USA there were 1611 explosions and fires involving combustible dusts. As many as 645 (approx. 40%) of the events took place in food-producing plants. Heated surfaces of the operating elements of machines were the cause of approx. 23% of cases of dust ignition against other listed sources of ignition [10]. Solutions were being gradually introduced to mitigate the risk of the threat arising from the formation of dust layers and clouds in undesired locations and to reduce the damage and human casualties in cases of dust ignition in plants. However, accidents caused by dust still occur. One example is the explosion of cereal grain dust which happened in a mill in Statesville, USA, in April 2013 [13]. According to data from 2016, profits from the food industry in Poland account for 17% of total budget gains generated by Polish industry. The part of the food sector dealing with the production of cereal milling products and flour products employs approx. 50,000 people. Poland ranks second in the European Union in terms of the number of operating mills. There are approx. 500 facilities of this type in this country [4].

z 2016 r. zyski z przemysłu spożywczego w Polsce stanowią 17% całkowitych wpływów do budżetu z polskiego przemysłu. W sektorze spożywczym związanym z wytwarzaniem produktów przemiału zbóż i produkcją wyrobów mącznych zatrudnionych jest około 50 tys. pracowników. Polska zajmuje drugie miejsce w Unii Europejskiej co do ilości funkcjonujących obecnie młynów. Na terenie kraju występuje około 500 tego typu obiektów [4].

Poznanie właściwości pożarowo-wybuchowych poszczególnych rodzajów mąk pozwoli dobrać odpowiednie zabezpieczenia i określić maksymalne dopuszczalne temperatury powierzchni urządzeń narażonych na prace w obecności pyłów tych produktów, tak aby zredukować ryzyko zdarzeń z ich udziałem do minimum [4, 12].

## Część doświadczalna

### Opis badanych pyłów

Przedmiotem badań były wybrane dostępne na rynku rodzaje mąk: pszenna, z ciecierzycy, owsiana, ryżowa oraz mąka kukurydziana. Próbkę każdej z mąk zostały przesiane przez stalowe sito o wielkości nominalnym oczek wynoszącym 200  $\mu\text{m}$ . Próbkę były jednorodne i reprezentatywne w odniesieniu do badanego pyłu.

### Charakterystyka metod badawczych

Do oznaczania palności i zapalności analizowanych próbek pyłów mąk przeprowadzono badania dotyczące:

- 1) oznaczania minimalnej temperatury zapłonu pyłów od nagrzanej powierzchni według PN-EN 50281-2-1:2002 [14],
- 2) wyznaczenia temperatury zapalenia produktów rozkładu termicznego według normy PN-69/C-8902 [15],
- 3) analizy termogravimetrycznej według PN-EN ISO 11358-1:2014 [16],
- 4) oznaczania ciepła spalania według PN-EN ISO 1716:2010 [17].

Ad. 1.

Metodologia badawcza [14] służąca do wyznaczenia minimalnej temperatury zapłonu pyłu od nagrzanej powierzchni (podzielona na dwie części A i B) wykorzystana została do określenia maksymalnej dopuszczalnej temperatury powierzchni urządzeń elektrycznych i właściwego ich doboru w obiektach, w których występują pyły palne. Metodę stosuje się do badania warstwy pyłu na płycie o stałej temperaturze i oznaczenia minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu (MTZW), czyli najniższej temperatury powierzchni pieca, przy której dochodzi do zapłonu warstwy pyłu o zadanej grubości. Zgodnie z normą PN-EN 50281-2-1 zapłon warstwy pyłu następuje, jeśli spełniony jest co najmniej jeden z trzech kryteriów. Pierwszym z nich jest osiągnięcie temperatury 450°C w warstwie pyłu. Drugim jest przekroczenie o 250°C temperatury warstwy od nastawionej temperatury płyty grzejnej. Trzecim natomiast jest zaobserwowanie widocznego źródła żarzenia lub palenia w warstwie pyłu. Dla pyłów mąk zbadano minimalne temperatury zapłonu warstwy o grubości 5 mm oraz 12,5 mm. Wybór grubości warstwy 5 mm wynikał z zaleceń normy PN-EN 50281-2-1 (obowiązującej do 30 września 2018 r.) oraz nowej normy PN-EN ISO/IEC 80079-20-2 [18], która jest normą zharmonizowaną z dyrektywą Atex, natomiast grubość warstwy 12,5 mm jest rekomendowana

Recognising the fire and explosive properties of the particular types of flour will make it possible to select the appropriate protection measures and to specify the maximum permissible temperatures for the surfaces of appliances exposed to dust from these products to an extent allowing the maximum possible reduction of the risk of accidents involving them [4, 12].

## Experimental part

### Description of the analysed dusts

The study concerned the selected types of flour available on the market: wheat, chickpea, oat, rice and maize flour. Samples of each of the flours were sifted through a steel sieve with a nominal mesh size of 200  $\mu\text{m}$ . The samples were homogeneous and representative for the analysed dust.

### Specification of the research methods

To determine the flammability and ignitability of the analysed samples of flour dusts, the following tests were performed:

- 1) the specification of the minimum ignition temperature of dusts igniting from a heated surface in accordance with PN-EN 50281-2-1:2002 [14],
- 2) the specification of the ignition temperature of thermal decomposition products according to PN-69/C-8902 [15],
- 3) thermogravimetric analysis in line with PN-EN ISO 11358-1:2014 [16],
- 4) the specification of the combustion heat according to PN-EN ISO 1716:2010 [17].

Re 1.

The research methodology [14] used to determine the minimum ignition temperature of dust igniting from a heated surface (divided into parts A and B) was used to determine the maximum permissible surface temperature of electric appliances and their proper selection in buildings in which combustible dusts are present. The method is used to analyse the dust layers on a plate with a constant temperature and to determine the minimum ignition temperature of a dust layer (MFPDL), i.e. the lowest temperature of the furnace surface in which the layer of dust of a given thickness ignites. In line with standard PN-EN 50281-2-1 the dust layer ignites when at least one of the three criteria is met. The first of them is reaching the temperature of 450°C in the dust layer. The second is exceeding the set temperature of the heating plate by 250°C. The third is observing a visible source of glow or burning in the dust layer. For flour dusts, minimum ignition temperatures were tested for layers 5 mm and 12.5 mm thick. The selection of the 5 mm layer was based on the recommendations contained in standard PN-EN 50281-2-1 (valid until 30 September 2018) and the new standard PN-EN ISO/IEC 80079-20-2 [18], which is a standard harmonised with the Atex Directive, while the 12.5 mm layer thickness is recommended

## RESEARCH AND DEVELOPMENT

przez amerykańską normę ASTM E2021 [19]. Błąd metody wynosi 10°C. Badania mąk przeprowadzono w dwukrotnych powtórzeniach w temperaturach powierzchni płyty grzejnej, przy których zaobserwowano zapłon i brak zapłonu z różnicą  $\pm 10^\circ\text{C}$ .

Metoda B stosowana jest do badania obłoku pyłu w piecu o stałej temperaturze, stąd też ważoną próbkę pyłu umieszcza się w pojemniku podłączonym jednym końcem do przewodu prowadzącego sprężone powietrze ze zbiornika, za pomocą którego pył zostaje rozprowadzony do wnętrza pieca. Po otwarciu zaworu elektromagnetycznego próbka w postaci obłoku zostaje prowadzona do cylindrycznej rury wewnątrz pieca. Dolny koniec tej rury jest odsłonięty, co pozwala przy pomocy lusterka umieszczonego pod nią, obserwować wnętrze pieca i zachodzące w nim zjawiska. Zgodnie z PN-EN 50281-2-1 (Metoda B) uznaje się, że doszło do zapłonu obłoku pyłu, jeśli pojawi się płomień wychodzący poza dolny koniec rury pieca lub wewnątrz. Może on nastąpić z pewnym opóźnieniem. Pojawienie się na wylocie iskier nie stanowi spełnienia kryterium zapłonu. Jako minimalną temperaturę zapłonu obłoku (MTZO) ustala się najniższą temperaturę pieca, w której odnotowano zapłon obłoku pyłu pomniejszoną o 20°C, a w temperaturze zapłonu poniżej 300°C o 10°C. W przypadku zidentyfikowania zagrożeń związanych z gorącymi powierzchniami należy przestrzegać warunków, aby temperatura wszystkich powierzchni, które mogą mieć kontakt z obłokami pyłów mąk, nie przekraczała 2/3 MTZO, a jeżeli na powierzchniach tych istnieje możliwość gromadzenia się warstwy pyłów o grubości do 5 mm to temperatura ta powinna być niższa o margines bezpieczeństwa równy 75°C w porównaniu do MTZW. Jeśli warstwa ta jest grubsza, w zakresie od 5 mm do 50 mm, wtedy margines bezpieczeństwa należy odpowiednio zwiększyć zgodnie z wykresem na ryc. 1 [18]. Natomiast w przepisach amerykańskich dopuszczalna temperatura powierzchni urządzeń jest wyznaczana poprzez pomniejszenie wartości MTZW pyłów o grubości 12,5 mm o 25°C. Błąd metody wynosi 20°C (w badanych zakresach oznaczeń MTZO). Badania mąk przeprowadzono w dziesięciokrotnych powtórzeniach w temperaturze powierzchni wnętrza pieca, przy której już nie zaobserwowano zapłonu obłoku.

### Ad. 2.

Wyznaczanie temperatury zapalenia produktów rozkładu termicznego pyłów [15] polega na oznaczeniu najniższej temperatury pieca, przy której dochodzi do pięciosekundowego palenia się gazowych produktów rozkładu termicznego na skutek działania bodźca pilotowego w postaci płomienia przykładanego przez 5 minut. Metoda badania polegała na umieszczeniu w gilzie (cylindrycznym pojemniku z przykrywką wraz z otworem dla wydobywających się gazowo-parowych produktów rozkładu termicznego) 1 g próbki pyłu, którą następnie wprowadzono do jednego z otworów znajdujących się w bloku pieca. Temperatura pieca działającego w zakresie od 150°C do 400°C regulowana była przy użyciu panelu kontrolnego. Zgodnie z normą [15] powinna być nastawiona na temperaturę o 10°C niższą niż spodziewana temperatura rozkładu termicznego próbki. W momencie zaobserwowania wydzielanych gazowych produktów rozkładu termicznego z gilzy, należy przystawić płomień palnika gazowego o długości płomienia nieprzekraczającego 10 mm i przystąpić do zapalenia produktów. Błąd metody wynosi 10°C. Wynik końcowy to średnia arytmetyczna z trzech pomiarów temperatury zapalenia nieróżniących się o 10°C.

by the US standard ASTM E2021 [19]. The error of the method is 10°C. The flours were tested with two repetitions at heating plate surface temperatures at which ignition and no ignition was observed, with a difference of  $\pm 10^\circ\text{C}$ .

Method B is used to analyse the dust cloud in a furnace with a constant temperature; a weighed sample is placed in a container with one end connected to the pipe transporting compressed air from the container, with which dust is transported to the inside of the furnace. After opening the solenoid valve, the sample in the form of a cloud is guided to the cylindrical tube inside the furnace. The lower end of the tube is exposed, which makes it possible to observe, with a mirror placed beneath it, the inside of the furnace and the phenomena occurring there. In line with PN-EN 50281-2-1 (Method B), it is considered that the dust cloud ignited if there is a flame reaching beyond the lower part of the furnace pipe or inside. It may occur with a certain delay. The presence of sparks at the outlet does not meet the ignition criterion. The lowest furnace temperature at which the dust cloud ignition was observed is determined as the minimum ignition temperature of the cloud (MFPC), lowered by 20°C, and for ignition temperatures below 300°C – by 10°C. In the case of identifying threats related to hot surfaces, the condition is to keep the temperature of all surfaces which may be in contact with flour dust clouds below 2/3 of the MFPC, and if there is a possibility of the accumulation of dusts on these surfaces with a thickness of up to 5 mm, the temperature should be lower by the safety margin of 75°C as compared to the MFPC. If the layer is thicker, within a range from 5 mm to 50 mm, the safety margin should be increased accordingly in line with Fig. 1 [18]. However, as provided in the US regulations, the permissible temperature of the surface of appliances is determined by reducing the MFPC value for dusts with a thickness of 12.5 mm by 25°C. The error of the method is 20°C (in the analysed MFPC ranges). The flours were tested with ten repetitions at the surface temperature of the inside of the furnace at which ignition of the cloud was not observed.

### Re 2.

Determining the ignition temperature of dust thermal decomposition products [15] consists of identifying the lowest temperature of the furnace at which a five-second combustion of gaseous thermal decomposition products occurs as a result of the pilot stimulus involving the application of flame for 5 minutes. The study method consisted of placing in a filter cup (a cylindrical container with a lid and a hole for the gas and steam thermal decomposition products) 1 g of the dust sample, which was subsequently introduced to one of the outlets in the furnace block. The temperature of a furnace operating within the range of 150°C–400°C was regulated with a control panel. In line with the standard [15], the set temperature should be 10°C lower than the expected thermal decomposition temperature of the sample. At the moment of observing the gaseous thermal decomposition products emitted from the filter cup, a gas burner flame should be applied, with a flame length of up to 10 mm, and proceed with igniting the products. The error of the method is 10°C. The final result is the arithmetic mean of three measurements of ignition temperature not differing by 10°C.

Ad. 3.

Próbki mąk o masie około 30 mg poddano analizie termogravimetrycznej metodą dynamiczną [16]. Pomiar wykonano w zakresie temperatur od 20°C do 800°C przy stałej szybkości ogrzewania wynoszącej 10°C/min. Wybór wartości szybkości ogrzewania warstw pyłów wynikał z tego, że jest to wartość średnia szybkości ogrzewania materiałów w pożarach w pełnej skali. Atmosferę utleniającą (powietrze) uzyskano poprzez zachowanie stałego przepływu powietrza o wartości 90 ml/min oraz przepływu gazu obojętnego (azotu) - 10 ml/min. Na podstawie badań własnych oszacowano precyzję pomiaru: temperatura – 1°C; masa próbki 0,01 mg; szybkość ubytku masy 1°C/min.

Ad. 4.

Ważnym parametrem pod kątem nagrzewania się warstwy pyłu na skutek zapoczątkowania reakcji spalania jest wartość ciepła spalania substancji. Jest on również istotny w kwestii obliczania obciążenia ogniowego oraz względnego czasu trwania pożaru. Do wyznaczenia ciepła spalania posłużono się metodą bomby kalorymetrycznej według normy [17].

Re 3.

Flour samples with a weight of approx. 30 mg were subjected to thermogravimetric analysis using the dynamic method [16]. The measurement was made for temperatures from 20°C to 800°C with a constant heating rate of 10°C/min. The selection of the heating rate of dust layers was based on the average value of the heating rate of materials in full-scale fires. The oxidising atmosphere (air) was achieved through the provision of a constant air flow of 90 ml/min and the neutral gas (nitrogen) flow of 10 ml/min. On the basis of the author's own research, the measurement precision was estimated: temperature – 1°C sample weight 0.01 mg; mass loss rate 1°C/min.

Re 4.

An important parameter of dust layer heating as a result of beginning the combustion reaction is the value of the heat of the substance's combustion. It is also essential for calculating the fire load and the relative duration of the fire. The combustion heat was determined with the bomb calorimeter method according to standard [17].

## Wyniki badań

Zestawienie uzyskanych wyników badań przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Zestawienie wyników pomiarów badanych próbek pyłów

**Table 1.** List of measurement results of the tested dust samples

Nazwa badania Test name	Uzyskane wartości dla poszczególnych próbek pyłów/The values obtained for individual dust samples				
	Pył mąki pszennej/ Wheat flour dust	Pył mąki ciecierzycy/ Chickpea flour dust	Pył mąki ryżowej/ Rice flour dust	Pył z mąki kukurydzianej/ Maize flour dust	Pył z mąki owsianej/ Oat flour dust
Gęstość nasypowa [g/dm <sup>3</sup> ] (średnia arytmetyczna z pięciu pomiarów) Bulk density [g/dm <sup>3</sup> ] (arithmetic mean from 5 measurements)	540	340	580	540	344
Wilgotność pyłów [% wag.] (średnia arytmetyczna z pięciu pomiarów) Humidity of dust [wt%] (arithmetic mean from 5 measurements)	9,7	5,3	9,12	10,02	10,17
Minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu o grubości 5 mm [°C] Minimum ignition temperature of a 5 mm thick layer of dust [°C]	Ponad 400 over 400	320	ponad 400 over 400	ponad 400 over 400	ponad 400 over 400
Minimalna temperatura zapłonu warstwy 12,5 mm [°C] Minimum ignition temperature of a 12.5 mm thick layer of dust [°C]	400	280	ponad 400 over 400	ponad 400 over 400	ponad 400 over 400
Minimalna temperatura zapłonu obłoku pyłu [°C] Minimum ignition temperature of the dust cloud [°C]	390	440	390	380	440
Ciepło spalania [kJ/g] Combustion heat [kJ/g]	17,152	16,525	14,325	15,223	17,252
Temperatura początku rozkładu termicznego [°C] Temperature at the onset of thermal decomposition [°C]	285	252	288	288	283
Temperatura 50% ubytku masy próbki [°C] Temperature of 50% sample mass loss [°C]	306	303	302	305	301
Temperatura maksymalnej szybkości ubytku masy [°C] Temperature of the maximum mass loss rate [°C]	304	286	303	307	299
Temperatura zapalenia [°C] Ignition temperature [°C]	345	310	340	340	285

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

## Test results

The obtained test results are presented in Table 1.

### Omówienie wyników

Wyznaczenie minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu jest istotne dla prawidłowej oceny zagrożenia. Umożliwia ona właściwy dobór urządzeń pracujących w miejscach zapyłonych, pozwalając na minimalizację zagrożeń pożarowo-wybuchowych, powodowanych przez palne pyły spożywcze. Podczas nagrzewania próbek pyłów zaobserwowano, że pył z owsa tracił swoją objętość, a wraz z postępującym nagrzewaniem warstwy na powierzchni pojawiły się pęknięcia, a na krawędziach widniały drobne oleiste krople. Próbkę mąki pszennej i ryżowej pęczniały, natomiast pył kukurydziany przy długotrwałym nagrzewaniu wykazywał stopniowe tworzenie warstwy stopionej. Próbka pyłu z ciecierzycy ułożona na płycie w temperaturze zapłonu wytwarzała dużą ilość lotnych produktów rozkładu termicznego oraz białą dym. W przypadku oznaczania minimalnej temperatury zapłonu warstwy o grubości 5 mm dla badanych pyłów zgodnie z PN-EN 50281-2-1, spełnione kryterium zapłonu pyłu uzyskała jedynie mąka z ciecierzycy, natomiast pozostałe próbki nie spełniły tego kryterium nawet w maksymalnej temperaturze pieca wynoszącej 400°C (zgodnie z [14]). Należy przypuszczać, że do zapłonu pozostałych próbek może dochodzić w wyższych temperaturach powierzchni grzejnych.

Czas trwania pomiarów uzależniony był od rodzaju pyłu i grubości warstwy. Podczas badania zapłonu warstwy pyłów o grubości 12,5 mm pomiary trwały od jednej do kilku godzin. Wartości minimalnej temperatury zapłonu warstwy mąki z ciecierzycy wraz ze wzrostem wysokości jej warstwy była mniejsza o 40°C, natomiast zapon uzyskano (dla warstw 12,5 mm) po 2 godzinach. Dla ciecierzycy przy zastosowanych kolejno wysokości warstw: 5 mm; 12,5 mm uzyskano minimalne temperatury zapłonu: 320°C, 280°C. Również zanotowano, że warstwa pyłu mąki pszennej o grubości 12,5 mm uległa zapłonowi w temperaturze 400°C. Przyczyną tego zjawiska jest fakt, iż przy grubszych warstwach pyłu trudniej dochodzi do wymiany ciepła z otoczeniem, przez co proces samonagrzewania następuje przy niższych temperaturach powierzchni grzejnej z większą intensywnością wydzielania ciepła. Prowadzi to do zapłonu warstwy. Zgodnie z [18] dla mąki z ciecierzycy można określić dopuszczalną temperaturę powierzchni warstwy pyłu z ciecierzycy do grubości 5 mm wynoszącą 245°C.

Przy rozważaniu dopuszczalnej temperatury dla warstw pyłu o grubości większej niż 5 mm wykorzystuje się wykres (ryc. 1).

Do określenia dopuszczalnej temperatury powierzchni urządzeń pracujących w obecności badanych pyłów zgodnie z [18] należy wziąć pod uwagę wartość minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu o grubości 5 mm i wybrać zgodnie z zakresem odpowiedni wykres (ryc. 1), z którego odczytuje się wartość dopuszczalnej temperatury urządzeń pokrytych pyłem o grubości powyżej 5 mm. Dla grubości warstwy pyłu 12,5 mm dopuszczalna temperatura powierzchni urządzeń wynosi 200°C dla mąki z ciecierzycy, a dla pozostałych mąk 260°C.

W tabeli 2 ukazano wartości dopuszczalnych temperatur urządzeń, na których lub w pobliżu których istnieje ryzyko tworzenia się warstw i obłoków badanych pyłów.

### Discussion of the results

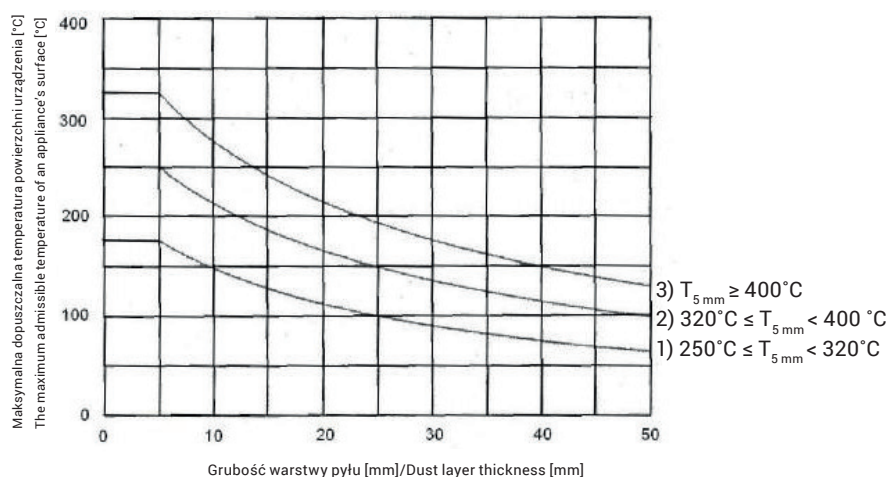
Determining the minimum ignition temperature of a dust cloud is essential for the proper assessment of the threat. It allows an appropriate selection of appliances operating in dusty places, making it possible to minimise the threat of fire and explosion caused by combustible food dusts. During the heating of dust samples it was observed that oat dust was losing its volume, and together with the heating of the layer, cracks appeared on the surface and oily drops appeared on the edges. Wheat and rice flour samples were swelling, and maize dust heated for a long time was showing a gradual formation of a melt layer. The chickpea dust sample placed on a plate at the ignition temperature was producing a large amount of volatile thermal decomposition products and white smoke. In determining the minimum ignition temperature of the 5 mm layer for the tested dusts in line with PN-EN 50281-2-1, the dust combustion criterion was met only by the chickpea flour, and the remaining samples did not meet this criterion even at the maximum furnace temperature of 400°C (in accordance with [14]). It should be concluded that the remaining samples may ignite at higher temperatures of heating surfaces.

The duration of measurements depended on the type of the dust and the thickness of the layer. During the analysis of the ignition of dusts with a thickness of 12.5 mm measurements lasted from one to several hours. The minimum ignition temperature for a layer of chickpea flour along with an increase in the layer's height was lower by 40°C, and ignition was reached (for 12.5 mm layers) after 2 hours. In the case of chickpea with the respective layers of 5 mm and 12.5 mm the following minimum ignition temperatures were obtained: 320°C and 280°C. It was also recorded that for the wheat flour dust layer with a thickness of 12.5 mm the ignition temperature was 400°C. The reason for this is that with thicker dust layers heat exchange with the environment is hindered, and this causes the self-heating process to occur at lower temperatures of the heating surface and with greater intensity of heat emission. This leads to the ignition of the layer. In line with [18] for chickpea flour it is possible to determine the permissible surface temperature for a 5 mm thick chickpea dust layer of 245°C.

When considering the permissible temperature for dust layers with a thickness higher than 5 mm, the following diagram is used (Fig. 1).

To specify the permissible surface temperature of appliances operating in the presence of the analysed dusts in accordance with [18], the minimum ignition temperature of a 5 mm layer of dust should be considered and the suitable diagram should be used with the appropriate range (Fig. 1), which is used to read the maximum temperature of appliances covered with dust with a thickness exceeding 5 mm. For the dust layer thickness of 12.5 mm the permissible surface temperature of appliances is 200°C for chickpea flour, and for the remaining flours – 260°C.

Table 2 shows permissible temperatures of appliances on or around which there is a risk of accumulation of layers and clouds of the tested dusts.



Rycina 1. Zależność maksymalnej dopuszczalnej temperatury powierzchni urządzenia od grubości warstwy pyłu [18]

Figure 1. The dependence of the maximum admissible temperature of an appliance's surface ( $^\circ\text{C}$ ) on dust layer thickness [18]

Tabela 2. Maksymalne wartości dopuszczalnej temperatury urządzeń dla danych warstw i obłoków pyłów

Table 2. The maximum admissible temperature of an appliance's surface for the given dust layers and clouds

Nazwa pyłu/Dust type	Maksymalna dopuszczalna temperatura powierzchni urządzeń dla badanych pyłów przy grubości warstwy do 5 mm [ $^\circ\text{C}$ ]/The maximum permissible surface temperature of appliances for dust layers up to 5 mm thick [ $^\circ\text{C}$ ]	Maksymalna dopuszczalna temperatura powierzchni urządzeń dla badanych pyłów przy grubości warstwy do 12,5 mm [ $^\circ\text{C}$ ]/The maximum permissible surface temperature of appliances for dust layers up to 12.5 mm thick [ $^\circ\text{C}$ ]	Maksymalna dopuszczalna temperatura powierzchni urządzeń dla badanych obłoków pyłów [ $^\circ\text{C}$ ]/The maximum permissible surface temperature of appliances for tested dust clouds [ $^\circ\text{C}$ ]
Pył mąki pszennej Wheat flour dust	ponad 325 over 325	275	260
Pył mąki ciecierzycy Chickpea flour dust	245	200	293
Pył mąki ryżowej Rice flour dust	ponad 325 over 325	275	260
Pył mąki kukurydzianej Maize flour dust	ponad 325 over 325	275	253
Pył mąki owsianej Oat flour dust	ponad 325 over 325	275	293

Najniższą temperaturę zapalenia produktów rozkładu termicznego od małego płomienia uzyskano dla mąki owsianej tj.  $285^\circ\text{C}$ . Można zauważyć, że spośród badanych pyłów to ten pył jest najbardziej podatny na zapłon od małego płomienia. W temperaturze pieca  $310^\circ\text{C}$  doszło do zapalenia się produktów gazowo-parowych pyłu z ciecierzycy, co świadczy że w tej temperaturze występuje stężenie gazowych produktów rozkładu termicznego w zakresie zapalności od bodźca pilotowego. Jednakowe wartości wynoszące  $340^\circ\text{C}$  uzyskano dla próbek mąk kukurydzianej i ryżowej, jak również zbliżoną wartość uzyskano dla mąki pszennej. Ze względu na pęcznienie próbek z mąką pszenną, kukurydzianą i ryżową masa próbek do badań zgodnie z metodologią [15] została zmniejszona o połowę. Przyczyną tego zjawiska może być odparowanie wilgoci z pyłu, które prowadzi do jego spulchnienia w gilzach. Zaobserwowane spostrzeżenia należy wykorzystać podczas projektowania instalacji przemysłowych przeznaczonych do wykorzystania w wysokiej temperaturze i dodatkowo posiadających małe przekroje, w których mogą znaleźć się pyły wymienionych powyżej mąk.

Pomiary w termogravimetrze wykazały istotną różnicę w wartościach temperatury początku rozkładu termicznego

The lowest ignition temperature of thermal decomposition products by a small flame was obtained for oat flour, i.e.  $285^\circ\text{C}$ . It can be noticed that among the tested dusts this is the most susceptible to ignition by a small flame. At the furnace temperature of  $310^\circ\text{C}$  the gas and steam products of the chickpea dust ignited, which demonstrated that at this temperature the concentration of gaseous thermal decomposition products is present in terms of ignitability from a pilot stimulus. Equal values amounting to  $340^\circ\text{C}$  were obtained for the maize and rice flour samples, with a similar result for wheat flour. Due to the swelling of the wheat, maize and rice flour, the weight of test samples was reduced by half in line with the methodology in [15]. The cause of this may be the evaporation of moist from the dust, which leads to its loosening in filter cups. The observations made should be used during the design of industrial installations intended for high-temperature operations with small sections which can contain dust from the flours mentioned above.

Measurements in the thermogravimeter showed an important difference between the temperature at the onset of the thermal decomposition of the chickpea flour and the remaining



mąki z ciecierzycy a pozostałymi. Proces rozkładu termicznego pyłu mąki z ciecierzycy rozpoczął się w temperaturze 252°C, podczas gdy w pozostałych pyłach temperatury znacząco nie odbiegały od siebie. Dla pyłów z mąki pszennej, ryżowej, kukurydzianej i owsianej wynosiły one w od 283–do 288°C. Temperatura początku rozkładu termicznego pyłu z ciecierzycy była o około 12% niższa od uśrednionej wartości temperatur pozostałych próbek. Inny skład elementarny zawarty w pyłach z ciecierzycy powoduje uzyskiwanie stosunkowo wyższej podatności na zapłon dla tego pyłu od nagrzanego powierzchni. Wartości temperatur, przy których nastąpił 50% ubytek masy pyłów, były zbliżone do siebie. Największe różnice można dostrzec pomiędzy pyłami mąki pszennej a owsianej. Wynosiły one 5°C. Pozostałe dwa pyły uzyskały bardzo zbliżoną wartość wynoszącą dla ciecierzycy 303°C oraz dla pyłu ryżowego 302°C.

Najniższą wartość temperatury maksymalnej szybkości ubytku masy uzyskała mąka z ciecierzycy i wynosiła ona 286°C. Jest to wynik o około 7% niższy od najwyższej wartości, którą uzyskał pył z mąki kukurydzianej. Należy przypuszczać, że najniższa termostabilność mąki z ciecierzycy jest przyczyną uzyskania jego największej podatności na zapłon od nagrzanego powierzchni spośród badanych pyłów. Pyły mąki pszennej i ryżowej wykazały zbliżone wartości temperatury maksymalnej szybkości ubytku masy.

Pyły posiadające większe wartości ciepła spalania zapalały się w niższej ustawionej temperaturze pieca. Pył z owsa, którego produkty rozkładu termicznego zapalały się w temperaturze 285°C, zyskał najwyższą wartość ciepła spalania – 17,150 kJ/g. Natomiast temperatura zapalenia palnej fazy gazowej mąki ryżowej charakteryzującej się najmniejszą wartością spalania (14,325 kJ/g) wynosiła aż 340°C.

## Podsumowanie

Z analizy uzyskanych wyników wynika, że ciecierzycza, która jest rośliną strączkową, ze względu na jej skład, budowę oraz zawartość substancji odżywczych, uległa zapłonowi od nagrzanego powierzchni w temperaturach niższych niż 400°C, a przy grubszych warstwach w temperaturach powierzchni pieca poniżej 300°C. Ten pył wśród badanych wykazuje największe zagrożenie spowodowania pożaru czy wybuchu. Zostało to potwierdzone w badaniach termogravimetrycznych, w których to ten pył osiągnął najniższą temperaturę początku rozkładu termicznego.

Z uzyskanych badań wynika, że zapłon warstw pozostałych mąk – pszennej, kukurydzianej, ryżowej i owsianej, o grubości 5 mm, przypuszczalnie może nastąpić dopiero przy temperaturze pieca powyżej 400°C. Na przykładzie mąki z ciecierzycy można stwierdzić, że zwiększanie grubości warstwy pyłu z 5 mm na 12,5 mm zwiększa jej podatność na zapłon od nagrzanego powierzchni i wydłuża czas potrzebny do zaobserwowania zapłonu warstwy. Wraz ze wzrostem grubości warstwy dochodzi do obniżenia temperatury zapłonu od nagrzanego powierzchni, która dla tego pyłu uległa zmniejszeniu o 40°C. Niższa temperatura zapłonu zalegającej warstwy pyłu na

flours. The thermal decomposition process of the chickpea flour dust started at 252°C, while for the remaining dusts the temperatures remained at a similar level. For wheat, rice, maize and oat flour they were within the range of 283–288°C. The temperature of the onset of the thermal decomposition for the chickpea dust was approx. 12% lower than the average value for the remaining samples. A different elemental composition of the chickpea dust causes it to have a relatively higher ignitability for this type of dust from a heated surface. The temperature values at which a 50% dust mass loss occurred were similar. The greatest differences could be noticed between wheat and oat flour, amounting to 5°C. The remaining two dusts achieved very similar values, 303°C for chickpea and 302°C for the rice dust.

The lowest maximum temperature value of the mass loss rate was achieved by the chickpea flour, amounting to 286°C. This is a result approx. 7% lower than the highest value recorded for the maize flour dust. It should be considered that the lowest thermal stability of chickpea flour is the reason for its highest ignitability from a heated surface among the analysed dusts. Wheat and rice flour dusts showed similar maximum temperature values of the mass loss rate.

Dusts with higher combustion heat values ignited at a lower set temperature of the furnace. The oat dust, whose thermal decomposition products ignited at 285°C, achieved the highest combustion heat value, i.e. 17.150 kJ/g. However, the ignition temperature of the combustible gas phase of the rice flour characterised by a lower combustion value (14.325 kJ/g) was 340°C.

## Summary

The analysis of the obtained results shows that chickpea, which is a leguminous plant, due to its composition, structure and nutrient content ignited from a heated surface at temperatures lower than 400°C, and with thicker layers at furnace surface temperatures below 300°C. Among the analysed dusts, chickpea is associated with the greatest threat of fire or explosion. This was confirmed by thermogravimetric tests, in which the dust achieved the lowest temperature of the thermal decomposition onset.

The test results showed that the ignition of the remaining types of flour: wheat, maize, rice and oat with a thickness of 5 mm may presumably occur only at the furnace temperature above 400°C. Based on the example of the chickpea flour it is possible to conclude that an increase of the layer's thickness from 5 mm to 12.5 mm increases its ignitability from a heated surface and extends the time needed to observe the layer's ignition. Together with an increase of the layer's thickness, the ignition temperature from a heated surface is lowered, in this case by 40°C. A lower ignition temperature of the dust layer settling on the heated surfaces of appliances raises the risk of fire. A comparison of the bulk density of dust samples makes

nagranych powierzchniach urządzeń podnosi ryzyko wystąpienia zagrożeń związanych z powstaniem pożaru. Porównanie wartości gęstości nasypowej próbek pyłów pozwala stwierdzić, że przy mniejszych wartościach gęstości nasypowej próbek pyłów zaobserwowano mniejsze wartości minimalnej temperatury zapłonu obłoku badanych mąk. Spowodowane jest to tym, iż badane pyły spożywcze posiadające większą wartość gęstości nasypowej, nie tworzą zbitych grudek cząstek pyłu w warstwie, przez co po wprowadzeniu do pieca obłoku pojedyncze ziarna pyłu szybciej ulegają zapłonowi. Ta zależność prowadzi do zapłonu obłoków pyłowo-powietrznych przy niższych temperaturach nagrzanej powierzchni. Możliwym czynnikiem powodującym tworzenie się grudek pyłów jest większa zawartość tłuszczu w składzie danego pyłu, która dla mąki z ciecierzycy i owsa była największa.

Mąki – pszenna, kukurydziana i ryżowa – wykazują podobne właściwości fizykochemiczne i palne, co można zauważyć podczas analizy wartości gęstości nasypowej, temperatury zapalenia, minimalnej temperatury zapalenia obłoku oraz początkowej temperatury rozkładu termicznego. Biorąc pod uwagę wartość ciepła spalania, można stwierdzić, że spośród badanych mąk najmniejszą gęstość obciążenia ogniowego przy danej powierzchni pomieszczenia posiada mąka ryżowa. Natomiast największą zapalność fazy gazowej od małego płomienia w grupie badanych mąk posiada mąka owsiana.

Wilgotność w sposób nieznaczny wpływa na zachowanie się próbek podczas badań na zapalność warstwy pyłów. Obserwowany jest jedynie w początkowych kilku minutach pomiarów, podczas których dochodziło do stopniowego odparowywania wody z próbek. Wilgotność pyłów posiada natomiast wpływ na zapalność ich obłoków. Na podstawie przedstawionych badań zauważono, że podczas oznaczeń minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu wraz z obniżaniem temperatury pieca stopniowo wydłużał się czas między wprowadzeniem próbki do pieca a jej faktycznym zapłonem obłoku. Wilgotność pyłu wpływa na czas tworzenia obłoku pyłu w piecu. Przy oznaczaniu temperatury zapalenia fazy lotnej pyłów na skutek wody zawartej w próbkach pyłu ryżowego oraz kukurydzianego dochodziło do spiętrzenia się próbek powodowanego gwałtownym odparowywaniem wody i jej utrudnionym ujściem przez mały otwór przykrywkę gilzy.

Przeprowadzone badania eksperymentalne dają możliwość zminimalizowania zagrożeń oraz potwierdzają konieczność szczególnie dbałego i częstego usuwania z urządzeń nagromadzonych pyłów, przestrzegania reżimów technologicznych i wymaganej częstotliwości przeglądów i konserwacji maszyn oraz urządzeń biorących udział w procesie technologicznym.

Publikacja została opracowana w ramach ewaluacji wyników projektu nr DOBR-BIO4/050/13009/2013 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju pod tytułem: „Opracowanie systemowych rozwiązań wspomagających prowadzenie dochodzeń popożarowych wykorzystujących nowoczesne technologie w tym narzędzia techniczne i informatyczne”.

it possible to conclude that a lower bulk density of the dust samples is associated with a lower minimum ignition temperature of the analysed flours' clouds. This is due to the fact that the analysed food dusts with a higher bulk density do not form compact lumps of dust particles in the layer, which is why after reaching the inside of the furnace single dust particles ignite quicker. This correlation leads to the ignition of dust and air clouds at lower heated surface temperatures. A possible factor causing the formation of dust lumps is the higher fat content in the composition of a given dust, which was the highest for the chickpea and oat flour.

Wheat, maize and rice flours have similar physico-chemical and flammability properties, which can be observed through the analysis of bulk density, ignition temperature, the minimum ignition temperature of a dust cloud and the initial temperature of thermal decomposition. Considering the combustion heat value it is possible to state that among the analysed flours rice flour has the lowest fire load density with a given room area. Oat flour has the highest ignitability of the gaseous phase from a small flame among the analysed flours.

Humidity has a slight impact on the performance of samples during ignitability tests of dust layers. It was observed only in the first few minutes of measurements, during which water gradually evaporated from the samples. However, humidity influences the ignitability of dust clouds. The presented tests demonstrated that during the determination of the minimum ignition temperature of a dust cloud, along with the dropping furnace temperature, the time between placing the sample in the furnace and the actual ignition of the cloud was gradually extending. Dust humidity has an impact on the formation of a dust cloud in the furnace. During the determination of the dust volatile phase ignition temperature the water contained in the rice and maize dust samples causes the concentration of the samples due to the rapid water evaporation and its hindered exit through a small hole in the filter cup's lid.

The performed experimental tests make it possible to minimise the threats and justify the necessity of the frequent and thorough removal of accumulating dust, following technological procedures and the required frequency of inspections and maintenance of machines and appliances involved in the technological process.

The publication was prepared within the evaluation of the results of project No. DOBR-BIO4/050/13009/2013 financed by the National Centre for Research and Development under the title “Developing systemic solutions to support the implementation of post-fire investigations based on cutting-edge technologies, including technical and IT tools.”

## Literatura / Literature

- [1] Eckhoff R.K., *Current status and expected future trends in dust explosion research*, "Journal of Loss Prevention in the Process Industries" 2005, 18, 225–237.
- [2] Babrauskas V., *Ignition handbook*, Fire Science Publishers, Issaquah 2003.
- [3] Ptak S., *Analiza zagrożeń wybuchowych związanych ze współspalaniem biomasy i węgla*, rozprawa doktorska, 2016.
- [4] Cudziło B., Flis U., *Nakłady i wyniki przemysłu w 2016 r.*, Warszawa 2017.
- [5] Eckhoff R.K., *Dust explosions in the process industries. Third edition*, Burlington 2003.
- [6] Grabarczyk M., *Minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu jako parametr biernej ochrony przeciwwybuchowej*, „Bezpieczeństwo pracy” 2016, 1, 22–26.
- [7] Guzewski P., *Badanie przyczyn powstania pożarów. Zbiór referatów z III Międzynarodowej Konferencji*, Poznań 2007, 259–266.
- [8] Salamonowicz Z., Półka M., Woliński M., Sobolewski M., *Badania eksperymentalne i modelowanie zapłonu warstwy pyłu na gorącej powierzchni*, „Przemysł Chemiczny” 2014, 93(1), 99–102.
- [9] Salamonowicz Z., Michał Kotowski, Półka M., Barnat W., *Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu przy wykorzystaniu modelowania numerycznego za pomocą technik CFD*, „Przemysł Chemiczny” 2014, 93(5), 692–696.
- [10] Yuan Z., Khakzad N., *Dust explosions: A threat to the process industries*, "Process Safety and Environmental Protection" 2015, 98, 57–71.
- [11] <http://www.mnopedia.org/event/washburn-mill-explosion-1878> [dostęp: 11.02.2018].
- [12] Courrières mine disaster, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Courri%C3%A8res\\_mine\\_disaster](https://en.wikipedia.org/wiki/Courri%C3%A8res_mine_disaster) [dostęp: 11.02.2018].
- [13] White K., *Grain-dust explosion at Nestle Purina plant hurts 4*, USA Today, <https://www.usatoday.com/story/news/nation/2014/09/14/explosion-at-nestle-plant/15648861/> [dostęp: 20.02.2018].
- [14] Norma PN-EN 50281:2002 Urządzenia do stosowania w obecności pyłów palnych. Część 1-1: Urządzenia elektryczne chronione przez obudowę, Budowa i badanie. Część: 1–2: Urządzenia elektryczne chronione przez obudowę. Dobór, instalacja i konserwacja. Część: 2-1: Metody oznaczania minimalnej temperatury zapłonu pyłu.
- [15] PN-69/C-89022:1969 Tworzywa sztuczne: Oznaczanie temperatury zapalenia.
- [16] PN-EN ISO 11358:2004 Tworzywa sztuczne. Termograwimetria (TG) polimerów. Zasady ogólne.
- [17] PN-EN ISO 1716:2010 Badania reakcji na ogień wyrobów. Określanie ciepła spalania brutto (wartości kalorycznej).
- [18] PN-EN 60079-14:2009 Atmosfery wybuchowe. Część 14: Projektowanie, dobór i montaż instalacji elektrycznych.
- [19] PN-EN ISO/IEC 80079-20-2 Atmosfery wybuchowe -- Część 20-2: Właściwości materiałowe -- Metody badań pyłów palnych.
- [20] ASTM E2021-09 Standard Test Method for Hot-Surface Ignition Temperature of Dust Layers.

**ST. BRYG. DR HAB. MARZENA PÓŁKA, PROF. NADZW. SGSP** – w 1992 roku ukończyła studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego. Jest profesorem w Zakładzie Teorii Procesów Spalania i Wybuchu Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. W swojej pracy naukowej zajmuje się procesami spalania materiałów polimerowych i ich modyfikacją przeciwogniową.

**SENIOR BRIG. MARZENA PÓŁKA, PH.D., SGSP PROFESSOR** – in 1992 she graduated from the Faculty of Chemistry at the University of Warsaw. She works as a Professor at the Combustion and Explosion Processes Theory Institute, the Main School of the Fire Service, in Warsaw. In her academic work, she focuses on polymer-combustion processes and the modifications of polymer materials.