

dr inż. **Rafał POROWSKI**¹
inż. **Dawid BODALSKI**¹
mgr **Martyna STRZYŻEWSKA**¹

Przyjęty/Accepted/Принята: 06.05.2013;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 19.11.2014;
Opublikowany/Published/Опубликована: 31.12.2014;

BADANIA DOŚWIADCZALNE I ANALIZA CYFROWA ZIARNISTOŚCI PYŁÓW PALNYCH²

Experimental Study and Digital Analysis of Flammable Dust Granularity

Экспериментальное исследования и цифровой анализ зернистости горючей пыли

Abstrakt

Cel: W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych oraz analizy cyfrowej ziarnistości pyłów palnych poddawanych testom parametrów wybuchowości w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości CNBOP-PIB. W artykule opisano wyniki analizy sitowej pyłów, takich jak aluminium, kakao, likopodium, czy bułka tarta oraz problemy występujące podczas przesiewania pyłów w celu zbadania ich ziarnistości.

Metodyka: Ze względu na przedmiot artykułu, oprócz badań doświadczalnych, wykorzystano mikroskop, aparat fotograficzny z adapterem do mikroskopu oraz komputer w celu opracowania alternatywnej metody badania ziarnistości pyłów. Wobec dużej różnorodności właściwości napotykaných materiałów nie jest możliwe wytypowanie jednej tylko metody analizy sitowej, którą można by zastosować do wszystkich badanych pyłów palnych. Pyły te różnią się właściwościami zarówno fizycznymi, jak i chemicznymi, takimi jak gęstość, kruchość, kształt ziarna, właściwości kohezyjne czy magnetyczne. Podstawowym problemem wynikającym z tych właściwości jest odpowiedni dobór parametrów oraz techniki ich przesiewania. Dla każdego materiału indywidualnie określić należy optymalny czas przesiewania, amplitudę wstrząsania, czy częstotliwość ręcznego ostukiwania, które niekiedy okazuje się konieczne. Wyboru parametrów dokonuje się empirycznie, co niekiedy bywa bardzo czasochłonne. Następnie dokonano analizy cyfrowej fotografii cząstek pyłu. Metoda ta opiera się na analizie fotografii cyfrowej z wykorzystaniem darmowego programu Image-J. W metodzie tej zdjęcie poddawane jest obróbce i analizie cyfrowej w celu uzyskania obrazu binarnego o określonym proggu.

Wyniki: Próby badania ziarnistości z wykorzystaniem jedynie metody cyfrowej okazały się znacznie bardziej czasochłonne. Główną przyczyną były duże niedokładności, skomplikowany proces przygotowania próbki, wykonania zdjęć ułatwiających późniejszą obróbkę oraz sam proces obróbki graficznej. Przetworzenie każdej z fotografii wymaga rozdzielenia złączonych ze sobą cząstek pyłu lub usunięcia fragmentów problematycznych, co w przypadku kilkudziesięciu zdjęć zajmuje wiele roboczogodzin.

Wnioski: Na podstawie uzyskanych wyników metody nie można uznać za skuteczną alternatywę dla analizy sitowej. Przyczyną takiego stanu rzeczy są rozbieżności w wartościach średnicy sitowej oraz średnicy pozornej – dwu różnych sposobów określania ziarnistości pyłu w wymienionych wyżej metodach badawczych. Metoda pozwala jednak w pewnym stopniu usprawnić metodę analizy sitowej, pozwalając wstępnie oszacować ziarnistość danego pyłu, wybrać odpowiedni zestaw sit, a także wartości nasypowe pyłu.

Słowa kluczowe: ziarnistość pyłów, mikroskopia, analiza cyfrowa, przesiewanie

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

Abstract

Aim: This paper presents the experimental study and digital analysis of flammable dust granularity performed in the Combustion Processes and Explosion Lab at the Scientific and Research Centre for Fire Protection (CNBOP-PIB). It contains experimental results of sieve analysis of several dusts such as aluminum, cocoa, lycopodium and breadcrumbs. It notices some problems identified during the screening of dust in order to examine its granularity.

¹ Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej im. Józefa Tuliszkowskiego Państwowy Instytut Badawczy; ul. Nadwiślańska 213, 05-420 Józefów; rporowski@cnbop.pl / Scientific and Research Centre for Fire Protection. National Research Institute, Poland;

² Wkład merytoryczny w powstanie artykułu / Percentage contribution: Rafał Porowski – 40%, Dawid Bodalski – 40%, Martyna Strzyżewska – 20%;

Methodology: Except some experimental work during the study the authors also used the laboratory microscope, camera with adapter for microscope and a computer in order to develop an alternative test method for granularity measurement. Due to a large variety of material properties it is not possible to nominate only one sieve analysis method that can be applied for all the combustible dust types. These dusts have large variety of properties both physical and chemical, such as density, fragility, grain shape, cohesive or magnetic properties. The main problem arising with these properties is suitable selection of parameters and sieving technique. For each material there is a need to determine individually the optimal sieving time, shaking amplitude or the frequency of manual tapping, which sometimes turns out to be necessary. Parameter selection needs to be made empirically, which sometimes can be very time consuming. The alternative method is based on the analysis of digital photography using the open source Image-J software. In this method, the image was processed in order to obtain a binary image with a specific threshold.

Results: Granularity testing using only a digital method proved to be much more time consuming. The main reason was the large discrepancies in the results due to errors in all phases of work, such as the complicated process of preparation of the sample shots to facilitate further processing and graphics processing process itself. The processing of each of the photo requires the separation of accumulated dust particles or to remove problematic fragments, which in case of several tens of pictures takes a lot of man-hours.

Conclusions: On the basis of tests results, this method cannot be considered as effective and alternative to the sieving analysis. The reason could be some discrepancies of the diameter of the sieve and the apparent diameter - two different ways of determining granularity of dust in this two methods. However, this method allows improving the sieving analysis process and estimating the granularity of the pre-dust, choose the right set and bulk of dust.

Keywords: dust granularity, microscopy, digital analysis, sieving

Type of article: original scientific article

Аннотация

Цель: В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований и цифрового анализа зернистости горючей пыли, которая проходила тесты параметров взрывоопасности в Группе Лабораторий Процессов Горения и Взрывоопасности CNBOP-PIB. В статье описаны результаты ситового анализа разных видов пыли, таких как: алюминий, какао, плауна, или панировочные сухари, а также проблем, возникающих в процессе просеивания пыли для того, что исследовать ее зернистость.

Методика: Учитывая предмет статьи, кроме экспериментальных исследований, для разработки альтернативного метода исследования зернистости пыли, были также использованы микроскоп, фотоаппарат с адаптером для микроскопа и компьютер. Из-за большого разнообразия свойств доступных материалов, не возможно использовать только один метод ситового анализа ко всем исследуемым типам горючей пыли. Разные виды пыли отличаются друг от друга по своим как физическим, так и химическим свойствам, таким как плотность, хрупкость, форма частицы, сплоченные или магнитные свойства. Основной проблемой, связанной с этими свойствами, является правильный выбор параметров и техники их просеивания. Для каждого материала следует отдельно определить оптимальное время просеивания, амплитуду вращения или частоту простукивания вручную, которые иногда оказываются просто необходимыми. Выбор параметров происходит опытным путём, что иногда может занять много времени. Далее проведен анализ цифровой фотографии частиц пыли. Этот метод основан на анализе цифровой фотографии с использованием бесплатной программы Image-J. При этом методе фотография подвергается обработке и цифровому анализу с целью получения бинарного изображения с определенным ограничением.

Результаты: Попытки исследования зернистости с использованием только цифрового метода заняли много времени. Основной причиной были большие неточности, сложный процесс приготовления образцов, проведение съёмок, которые облегчили бы последующую обработку и сам процесс графической обработки. Обработка каждой фотографии требует разделения соединенных вместе частиц пыли или удаления проблемных фрагментов, что в случае большого количества изображений занимает много рабочего времени.

Выводы: На основании этих результатов данный метод нельзя рассматривать в качестве эффективной альтернативы ситового анализа. Причиной этого являются различия значений ситового и видимого диаметра – два разных способа определения зернистости пыли в вышеуказанных методах исследования. Способ, однако, позволяет улучшить в определённой степени метод ситового анализа, способствуя оценке исходной зернистости пыли и выбрать соответствующий набор сит, и объём пыли.

Ключевые слова: зернистость пыли, микроскопия, цифровой анализ, просеивание

Вид статьи: оригинальная научная статья

1. Wprowadzenie

Jedynie w niektórych, czy też tylko poszczególnych przypadkach, takich jak młyny strumieniowe, wybuchowa mieszanina pyłowo-powietrzna może powstać na miejscu, to znaczy cząstki pyłu palnego tworzą obłok pyłu w momencie ich produkcji. W większości przypadków pyłowe atmosfery wybuchowe powstają na skutek uniesienia lub dyspersji pyłu nagromadzonego w warstwach. Proces nagromadzenia pyłu może zarówno stanowić cel zamierzony lub wymagany w warunkach przemysłowych, jak na przykład w silosach, kosztach samowyladowczych, czy w filtrach workowych, jak i być

efektem ubocznym (niezamierzonym), przykładowo osadzanie się pyłu na zewnętrznych powierzchniach urządzeń procesowych lub na ścianach i podłogach pomieszczeń magazynowych. Rozproszony pył może wytworzyć mieszaninę pyłowo-powietrzną o stężeniu zawartym pomiędzy dolną i górną granicą wybuchowości jedynie przez krótki czas. Po tym czasie uniesiony w powietrzu pył zacznie z powrotem opadać, tworząc warstwy [1]. Do określenia ziarnistości cząstek pyłu wykorzystuje się wiele zróżnicowanych metod, takich jak przesiewanie, metody sedimentacyjne, metody pneumatyczne, metody laserowe, czy metody mikroskopowe. Wszystkie spośród wy-

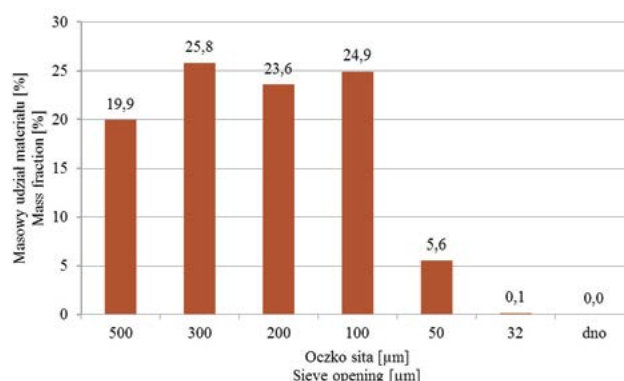
mienionych metod cechuje wysoka niepewność pomiarowa. Wyniki analiz przeprowadzanych różnymi urządzeniami, w ramach tej samej metody, wykazują znaczne rozbieżności. Dla przykładu amerykański instytut badawczy NIST przeprowadził testy kilkunastu urządzeń działających na zasadzie dyfrakcji laserowej. Badania przeprowadzono na jednakowym materiale, natomiast rozrzut wyników wyniósł około 20% [2]. Jeśli w przypadku drogiej i skomplikowanych metod dochodzi do takich rozbieżności, to w przypadku metody najtańszej, tj. przesiewania na sucho, uzyskanie miarodajnych wyników staje się bardzo trudne i czasochłonne. Należy jednak pamiętać, iż badanie ziarnistości opiera się na pomiarach wielkości geometrycznych poszczególnych cząstek, które to wielkości są zazwyczaj jedynie wartościami zastępczymi, często różniącymi się między sobą. Na przykład w analizie sitowej za średnicę cząstki przyjmuje się minimalny rozmiar boku kwadratowego oczka sita, przez które zdołało przejść ziarno, czyli tak zwaną średnicę sitową [3]. Natomiast w analizie mikroskopowej za wartość charakteryzującą wielkość cząstki przyjmujemy średnicę koła o polu powierzchni takim samym, jak powierzchnia rzutu cząstki na płaszczyznę stabilnego spoczynku, czyli tak zwaną średnicę projekcyjną [4].

2. Metody badawcze

2.1. Analiza sitowa

Badanie parametrów wybuchowości pyłów jest jednym z zasadniczych kierunków rozwoju Zespołu Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości CNBOP-PIB. Podstawowym sposobem określania ziarnistości pyłów poddawanych badaniom jest analiza sitowa na sucho, wykonywana według zaleceń standardu PN-ISO 2591-1. Jak wcześniej wspomniano, jest to metoda tania, bo wymagająca wydania jednorazowo kilku tysięcy złotych. Niestety z uwagi na bardzo zróżnicowane właściwości pyłów, z którymi pracownicy laboratorium mają do czynienia, jej miarodajność jest niezadowalająca. Wobec dużej różnorodności właściwości napotykanego materiału nie jest możliwe wytypowanie jednej tylko metody analizy sitowej, którą można by zastosować do wszystkich badanych pyłów palnych [5]. Pyły te różnią się właściwościami zarówno fizycznymi, jak i chemicznymi, takimi jak gęstość, kruchość, kształt ziarna, właściwości kohezyjne, czy magnetyczne. Podstawowym problemem wynikającym z tych właściwości jest odpowiedni dobór parametrów oraz techniki ich przesiewania. Dla każdego materiału indywidualnie określić należy optymalny czas przesiewania, amplitudę wstrząsania, czy częstotliwość ręcznego ostukiwania, które niekiedy okazuje się być konieczne. Wyboru parametrów dokonuje się empirycznie, co niekiedy bywa bardzo czasochłonne. Przykładem materiału sprawiającego problemy przy przesiewaniu jest kakao. Pył ten wykazuje tendencje do aglomeracji, skutkiem czego zapycha oczka sit, a jednocześnie jest bardzo kruchy. Materiał poddano pięciokrotnym próbom przesiewania z wykorzystaniem mechanicznej wytrząsarki oraz zestawu sit o rozmiarach oczka 500 μm , 300 μm , 200 μm , 100 μm , 50 μm oraz 32 μm . Wyniki przedstawione w tym artykule

stanowią średnią ważoną z pięciu prób. W pierwszej próbie czas przesiewania wyniósł 15 minut.



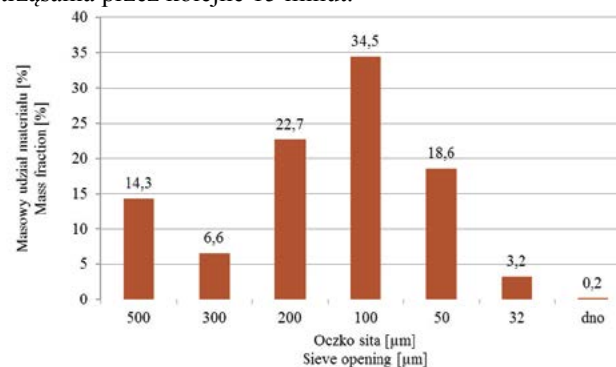
Ryc. 1. Wyniki przesiewania pyłu kakaowego – czas przesiewania 15 minut

Fig. 1. Experimental results of cocoa sieving in 15 min

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Po pierwszym badaniu zważono sita wraz z odsiewem, a następnie poddano ponownemu procesowi wytrząsania przez kolejne 15 minut.



Ryc. 2. Wyniki przesiewania pyłu kakaowego – czas przesiewania 30 minut

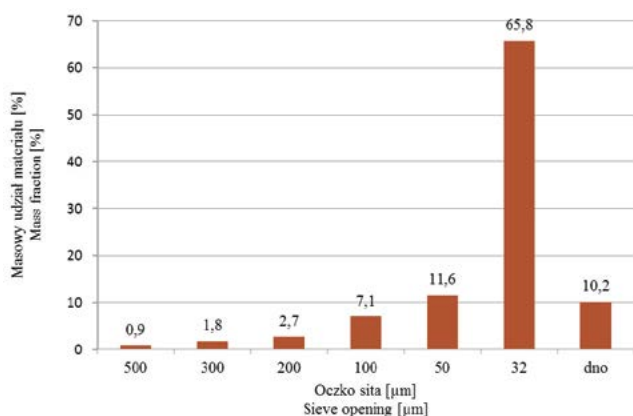
Fig. 2. Experimental results of cocoa sieving in 30 min.

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Z uwagi na wyraźne różnice w wynikach przedstawionych na ryc. 1 i ryc. 2 materiał poddano dalszemu oraz czasochłonnemu procesowi przesiewania ręcznego z wykorzystaniem miękkiej szczotki wg zaleceń standardu PN-ISO 2591-1. Wyniki okazały się zaskakująco rozbieżne. Pojawiło się zatem kilka pytań, a mianowicie: w którym momencie cząstki pyłu rzeczywiście zatrzymują się na sicie ze względu na swoje rozmiary? Kiedy są przez użytkownika kruszone? Kiedy, łącząc się pod wpływem wilgoci lub sił przyciągania, zapychają sita?

Kolejnym materiałem spośród badanych pyłów sprawiającym problemy podczas przesiewania był pył aluminiowy. Podobnie do pyłu kakaowego wykazywał on tendencję do aglomeracji oraz zapychania sit, jednak przy kolejnych próbach badania na wytrząsarce z coraz mniejszymi wartościami nasypowymi wykazywał podobne wyniki. Dla porównania wykonano kilka przesiewów techniką wytrząsania mechanicznego na przemian z ręcznym przesiewaniem dla różnych wartości nasypowych i tu również otrzymano powtarzalność wyników.

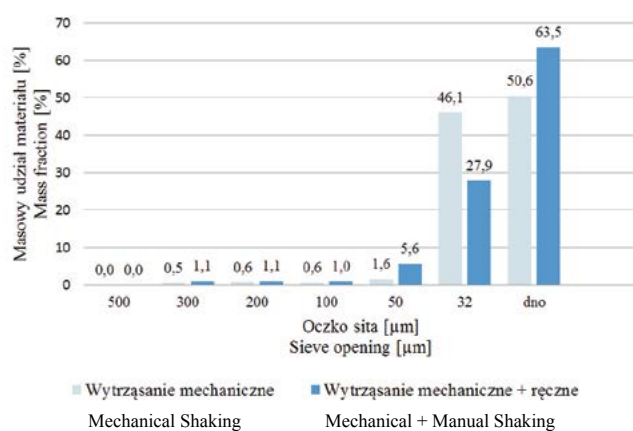


Ryc. 3 Wyniki ręcznego przesiewania pyłu kakaowego

Fig. 3. Experimental results of cocoa manual sieving

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 4. Porównanie wyników dwóch technik przesiewania pyłu aluminiowego

Fig. 4. Comparison of two sieving methods for aluminum dust

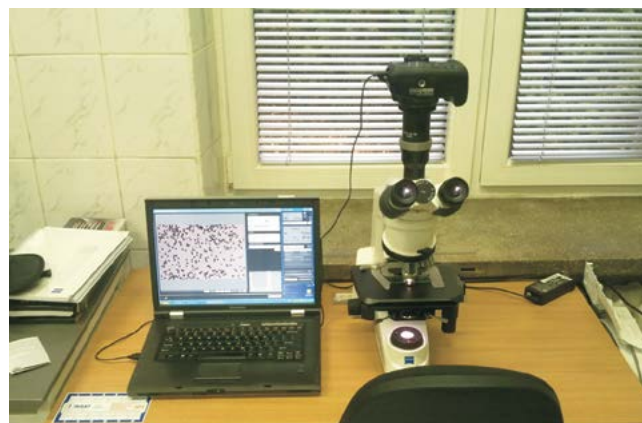
Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Jak widać połączenie techniki przesiewania mechanicznego z ręcznym spowodowało zwiększenie ilości materiału przechodzącego przez sito o oczkach 32 μm. W tym przypadku również pozostaje pytanie, czy dołożenie kolejnych czynności tj. oklepywania i omiotania sit powoduje rozdzielanie zbitych cząstek pyłu, z czym nie radzi sobie wytrząsarka, czy też w wyniku tychże czynności kruche ziarna zostają sztucznie rozdrobnione. Pytania te były przyczyną podjęcia próby opracowania techniki wspomaganego procesu badania ziarnistości pyłów z wykorzystaniem mikroskopu laboratoryjnego.

2.2. Analiza cyfrowa

Opracowana w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości CNBOP-PIB metoda badania ziarnistości pyłów oparta jest na analizie cyfrowej obrazu cząstek pyłu wykonanych pod mikroskopem. Do analizy zaadaptowano mikroskop laboratoryjny, aparat cyfrowy oraz komputer z zainstalowanym oprogramowaniem pozwalającym na wyświetlanie obrazu z aparatu. Aparat podłączono do mikroskopu za pomocą specjalnego adaptera.



Ryc. 5. Widok na stanowisko do analizy cyfrowej ziarnistości pyłów palnych

Fig. 5. An overview of the equipment for digital analysis of flammable dust granularity

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Pierwszym etapem analizy było pobranie próbki pyłu, którą można uznać za wystarczająco reprezentatywną, a następnie przygotowanie na jej podstawie preparatów badawczych. Starannie przygotowany preparat umieszczano na stole mikroskopu, a następnie manipulując posuwami stołu, wybierano obszar do fotografowania. Podstawową problematyką tego etapu stanowił wybór takich obszarów próbki, na których ziarna pyłu w jak najmniejszym stopniu nachodziły na siebie lub też się ze sobą stykały. Taka sytuacja generowała błędy oraz prowadziła do znacznego wydłużenia czasu analizy cyfrowej. Podstawowym narzędziem analizy cyfrowej był posiadający intuicyjny interfejs program Image-J. Jest to program znajdujący szerokie zastosowanie w badaniach naukowych. Za jego pomocą można wydzielić z fotografii poszczególne elementy, w tym przypadku cząstki pyłu, oraz zestawzić ich wartości geometryczne w formie tabel. Praca z programem Image-J sprowadzała się do wstępnej obróbki zdjęcia oraz wykonania obliczeń. Celem obróbki wstępnej było usunięcie z obszaru fotografii fragmentów problematycznych, to znaczy pozlepianych, nachodzących na siebie, niemożliwych do odseparowania cząstek lub rozdzielenie złączonych cząstek za pomocą odpowiednich w programie narzędzi. Jeśli to konieczne, należało również poprawić jakość fotografii poprzez manipulację kontrastem, jasnością, czy też nasyceniem całego obrazu lub poszczególnych, słabiej widocznych fragmentów, w celu uzyskania najbardziej miarodajnych wyników. Na tak przygotowanej fotografii dokonywano binaryzacji, tj. operacji punktowej, której wynikiem był obraz, na którym program rozróżniał tylko dwie wartości, tj. czerń symbolizującą cząstkę pyłu oraz biel, czyli tło. Właściwą binaryzację poprzedzało tzw. progowanie. Był to proces ustalenia granicy, powyżej której wszystkie piksele o danych wartościach trzech podstawowych parametrów miały być traktowane jako czarne, natomiast poniżej jako białe, lub odwrotnie. Parametrami tymi były wartości maksymalne i minimalne barwy, jasności oraz nasycenia. Próg dobierano na podstawie podglądu fotografii z naniesioną maską reprezentującą granicę. W ten sposób

otrzymywano binarny obraz gotowy do dalszej analizy cyfrowej, co przedstawiono na ryc. 6.



Ryc. 6. Fotografia mikroskopowa po binaryzacji w programie Image-J

Fig. 6. Microscopic photo after binary analysis in Image-J

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Program Image-J analizował każdy z odseparowanych fragmentów, wyliczając jego parametry geometryczne, w tym między innymi pole powierzchni, współczynnik okrągłości, czy maksymalna odległość w linii prostej między dwoma punktami. Wyniki otrzymywano w postaci tabelarycznej. Dane z pliku należało następnie skopiować do przygotowanej wcześniej formatki MS Excell, przeliczającej wartości z pikseli na mikrometry. Wynikiem tego działania był histogram przedstawiający rozkład ziarnistości (ryc. 7).

Przyporządkowania danej cząstki pyłu do konkretnej kategorii program dokonywał, obliczając zastępczą średnicę każdego z ziaren. Jest to średnica koła o powierzchni równej polu powierzchni rzutu danej cząstki na powierzchnię próbki. Następnie powierzchnia rzutu każdego z ziaren dzielona była przez sumę powierzchni wszystkich cząstek, czego wynikiem był procentowy udział każdej z cząstek. Następnie procentowe udziały ziaren

Powierzchnia [µm²]	Powierzchnia elipsy [µm²]	Oś wielka elipsy [µm]	Oś mała elipsy [µm]	Współczynnik kształtu	wielkość maksymalna [µm]	wielkość minimalna [µm]	średnica zastępcza [µm]	warunek!	Współczynnik pix/µm						
62,405	62,405	11,888	6,684	1,779	12,990	6,767	8,914	dno							
652,291	652,286	34,225	24,266	1,41	37,894	27,016	28,819	dno							
21,598	21,597	8,315	3,307	2,514	8,562	3,222	5,244	dno							
235,186	235,184	21,143	14,163	1,493	25,991	18,091	17,305	dno							
311,712	311,714	24,935	15,917	1,567	27,707	17,943	19,922	dno							
71,335	71,334	12,884	7,050	1,828	13,882	7,089	9,530	dno							
72,269	72,268	16,052	5,732	2,8	18,505	6,445	9,592	dno							
287,830	287,829	21,264	17,234	1,234	23,062	18,216	19,144	dno							
231,656	231,654	21,234	13,891	1,529	23,346	14,501	17,174	dno							
56,382	56,383	14,008	5,125	2,733	16,115	5,800	8,473	dno							
320,434	320,434	29,212	13,967	2,092	30,065	14,976	20,199	dno							
625,397	625,394	32,706	24,346	1,343	38,411	25,826	28,218	dno							
449,917	449,916	30,012	19,087	1,572	32,141	20,841	23,934	dno							
143,604	143,605	14,260	12,822	1,112	14,910	13,433	13,522	dno							
4,050	4,050	2,420	2,131	1,135	3,318	2,900	2,271	dno							
336,113	336,115	24,030	17,809	1,349	25,635	19,323	20,687	dno							
419,701	419,698	31,427	17,004	1,848	34,231	20,343	23,117	dno							
179,115	179,116	17,593	12,963	1,357	18,883	13,398	15,102	dno							
2,181	2,180	3,298	0,842	3,918	3,758	1,154	1,666	dno							
149,211	149,211	17,327	10,964	1,58	18,279	12,174	15,783	dno							
428,215	428,211	29,247	18,642	1,569	40,511	25,374	23,350	dno							
103,627	103,628	13,503	9,771	1,382	14,094	10,154	11,487	dno							
230,098	230,098	19,416	15,089	1,287	21,943	17,216	17,116	dno							
689,671	689,671	33,820	25,964	1,303	36,027	28,269	29,633	dno							
185,241	185,239	17,726	13,306	1,332	19,340	14,911	15,358	dno							
124,602	124,601	15,425	10,285	1,5	15,999	10,916	12,596	dno							
350,235	350,235	21,732	20,520	1,050	25,260	22,517	21,117	dno							

Ryc. 7. Obliczone wartości pikseli na mikrometry oraz wynik w postaci histogramu ziarnistości

Fig. 7. Calculated values of microns and the some results of dust granularity

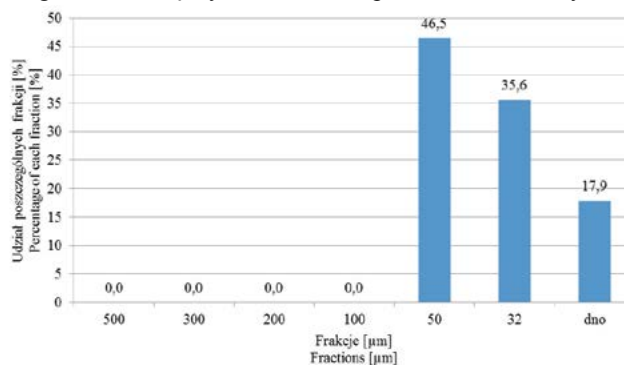
Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

podzielonych na przedziały, zgodne z oczkami sit, były sumowane, a program na podstawie danych tworzył histogram rozkładu ziarnistości z próby.

3. Wyniki badań

Jako pierwszy badaniu poddany został pył aluminiowy, którego rozbieżności między dwoma metodami przesiewania były stosunkowo niewielkie. W przypadku przesiewania mechaniczno-ręcznego 91,4% materiału przeszło przez sito 50 µm, a zatem zawierało się w przedziale od 0 do 50 µm. W przypadku przesiewania z wykorzystaniem wytrząsarki było to aż 96,7%. Tymczasem według analizy cyfrowej jedynie 53,5% udziału masowego ziaren występowało w zakresie od 0 do 50 µm, natomiast 46,5% w zakresie od 50 do 100 µm. Badanie nie wykazało żadnych ziaren o średnicy zastępczej większej niż 100 µm, w przeciwieństwie do technik przesiewania, gdzie na siatach o rozmiarach oczka 100-300 µm odnotowano odsiew w granicach między 0,5 i 1,1%, co przedstawiono na ryc. 8.



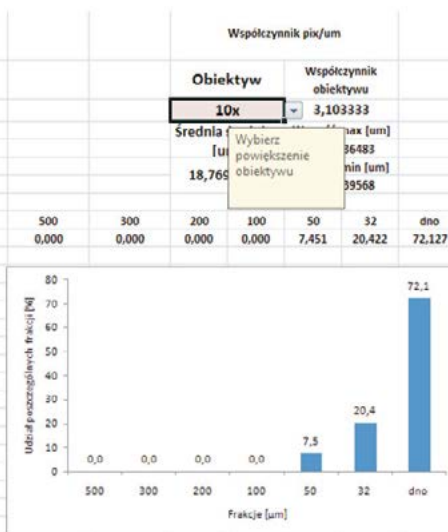
Ryc. 8. Wyniki analizy cyfrowej pyłu aluminiowego

Fig. 8. Results of digital analysis for aluminum dust

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Następnym materiałem poddanym analizie cyfrowej było kakao. Materiał ten, powodujący jeszcze większe problemy przy przesiewaniu niż aluminium, wykazywał



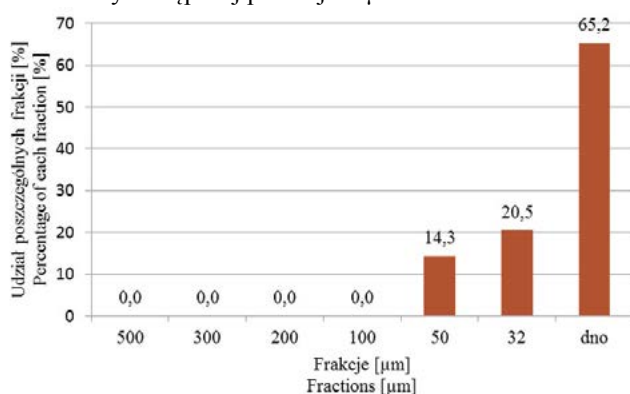
Ryc. 7. Obliczone wartości pikseli na mikrometry oraz wynik w postaci histogramu ziarnistości

Fig. 7. Calculated values of microns and the some results of dust granularity

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

również znaczne rozbieżności pomiędzy wynikami tych dwóch metod analizy. W tym przypadku różnice dotyczyły przede wszystkim granicznego rozmiaru 32 μm . Podczas przesiewania pyłu kakao za pomocą wytrząsarki mechanicznej na dno dotarły jedynie śladowe ilości materiału, tj. maksymalnie 0,1%. Wynik ten oscylował w granicach błędów pomiarowych wagi, jednak podczas badania na dnie zauważalny był delikatny brązowy nalot. Dodanie techniki wytrząsania ręcznego z omiataniem i oklepywaniem pozwoliło pyłowi przedostać się przez sito 50 μm , przez które wcześniej przeszło maksymalnie 3,2%. Przy technice mieszanej aż 65,8% materiału osiadło na sicie 32 μm , natomiast na dno przeszło zaledwie 10,2%. Wyniki analizy cyfrowej pyłu kakaowego (ryc. 9) diametralnie różniły się od wyników przesiewania. Z wykresu wynika, iż ponad 65% udziału masowego w pyłe stanowią ziarna o średnicy zastępczej poniżej 32 μm .



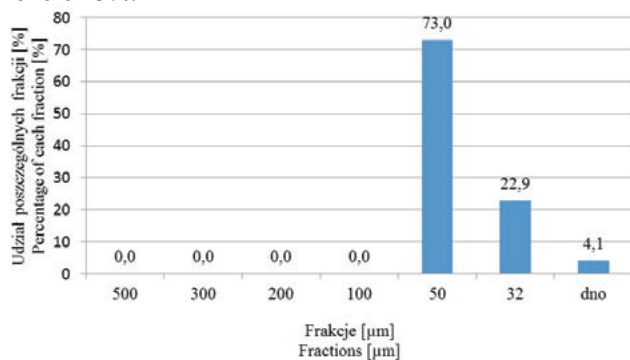
Ryc. 9. Wyniki analizy cyfrowej pyłu kakaowego

Fig. 9. Results of digital analysis for cocoa dust

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Z uwagi na niekorzystne wyniki badań próbek pyłu aluminiowego oraz kakaowego pobranych bezpośrednio z reprezentatywnej próbki podjęto działania mające na celu sprawdzenie, jak analiza cyfrowa odnosi się do wyników badań doświadczalnych. W tym przypadku próbki pobrano z sit kontrolnych po przesiewaniu. Wyniki badań odsiewu z sita 32 μm przedstawia ryc. 10. Aż 73% ziaren zostało zidentyfikowanych w przedziale 50-100 μm , natomiast w zamierzonym 32-50 μm znalazło się jedynie około 23%.



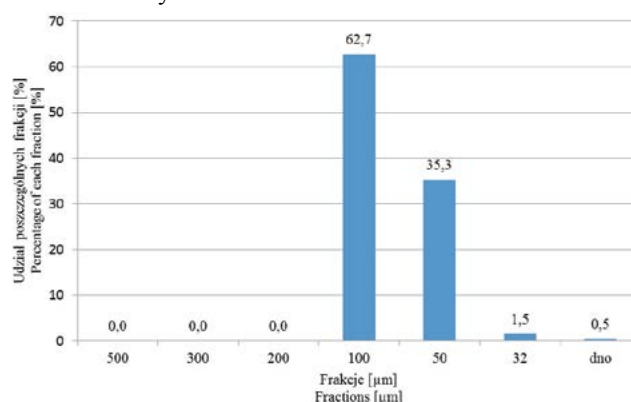
Ryc. 10. Wyniki analizy cyfrowej odsiewu na sicie 32 μm pyłu aluminiowego

Fig. 10. Results of digital analysis for aluminum dust using 32 μm sieve

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Podobnie w przypadku odsiewu z sita 50 μm (ryc. 11), znaczna większość udziału masowego przypadła na frakcję wyższą, tj. 100 μm . Jest to szczególnie interesujące, gdyż analiza pyłu pobranego z próbki nie wykazała obecności tak dużych ziaren.



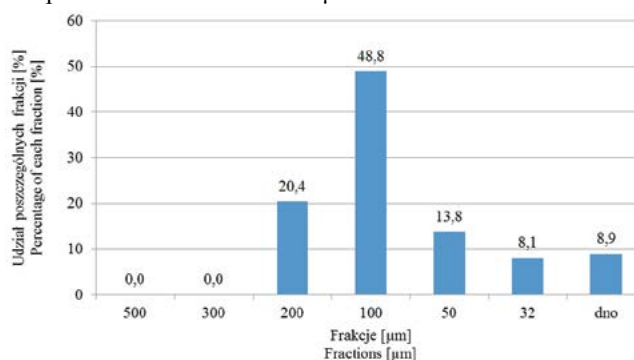
Ryc. 11. Wyniki analizy cyfrowej odsiewu na sicie 50 μm pyłu aluminiowego

Fig. 11. Results of digital analysis for aluminum dust using 50 μm sieve

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Następnie analizie poddano odsiew z sita 100 μm (ryc. 12), który stanowił poniżej 1% udziału masowego całej próbki. Niemalże 50% materiału zaklasyfikowano w przedziale od 100 do 200 μm .



Ryc. 12. Wyniki analizy cyfrowej odsiewu na sicie 100 μm pyłu aluminiowego

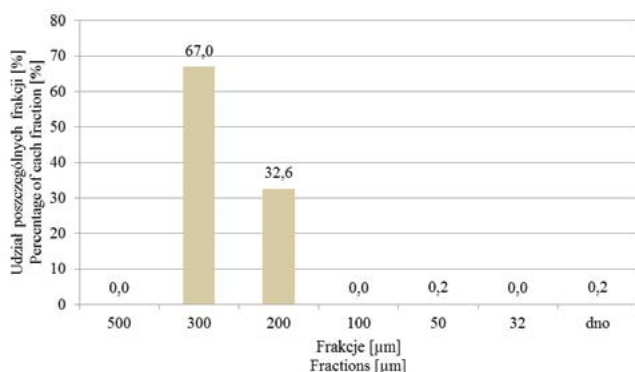
Fig. 12. Results of digital analysis for aluminum dust using 100 μm sieve

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Wykonano również analizę odsiewów dla pyłu, używającego powtarzalne wyniki przesiewania zarówno mechanicznego, jak i ręcznego, tj. bułki tartej. Badanie odsiewu z sita 100 μm wykazało, podobnie jak dla pyłu aluminiowego, przewagę ziaren o średnicach zastępczych 300-500 μm , tj. 67% nad spodziewanymi w zakresie 200-300 μm .

W przypadku badania odsiewu z sita 100 μm aż 54% udziałów masowych mieściło się w zakresie 100-200 μm . Podobnie jak w przypadku większej frakcji znaczna ilość cząstek znajdowała się w dwóch przedziałach, odpowiadających rozmiarowi sita oraz większym.

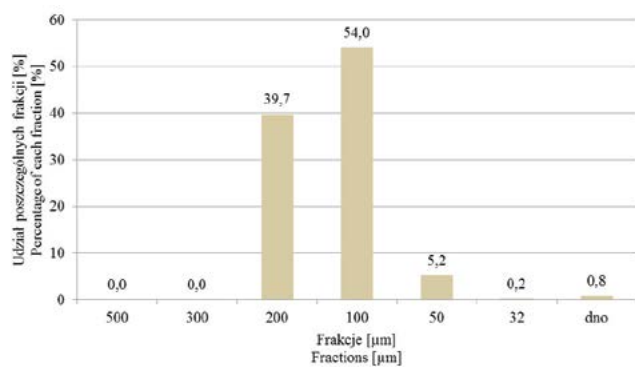


Ryc. 13. Wyniki analizy cyfrowej odsiewu na sicie 200 µm bułki tartej

Fig. 13. Results of digital analysis for breadcrumbs dust using 200 µm sieve

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



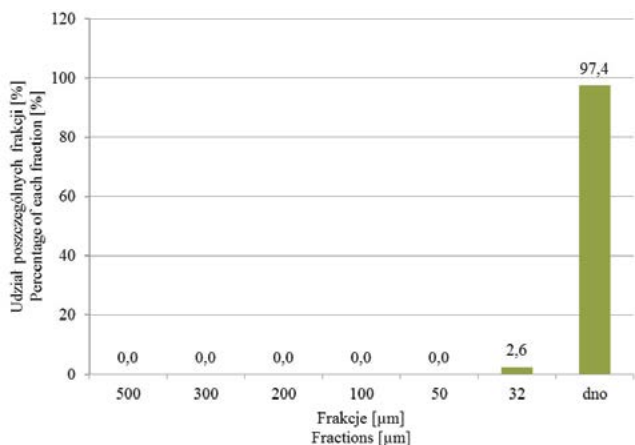
Ryc. 14. Wyniki analizy cyfrowej odsiewu na sicie 200 µm bułki tartej

Fig. 14. Results of digital analysis for breadcrumbs dust using 200 µm sieve

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Badaniom poddano również pył likopodium, który jest pyłem jednorodnym o regularnym kształcie ziaren. Wyniki analizy sitowej przedstawiono na ryc. 15. Aż 97,4% materiału uległo przesianiu, co było pewnym zaskoczeniem, gdyż według źródeł literaturowych cząstki likopodium powinny mieć średnicę około 33 µm [5].



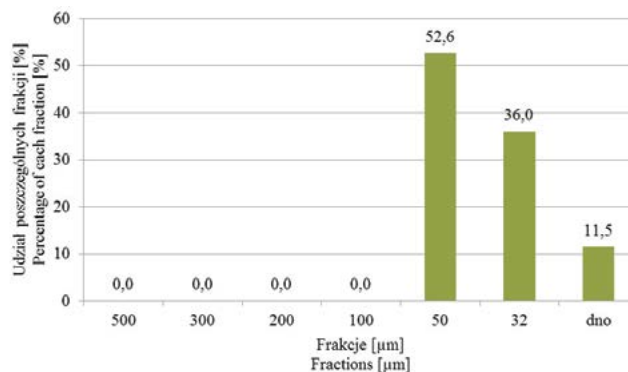
Ryc. 15. Wyniki analizy sitowej pyłu likopodium

Fig. 15. Results of digital analysis for lycopodium dust

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Podjęto zatem analizę cyfrową pyłu likopodium z wykorzystaniem sita o rozmiarach 32 µm, co przedstawiono na ryc. 16 oraz pyłu z dna wytrząsarki, co przedstawiono na ryc. 17.

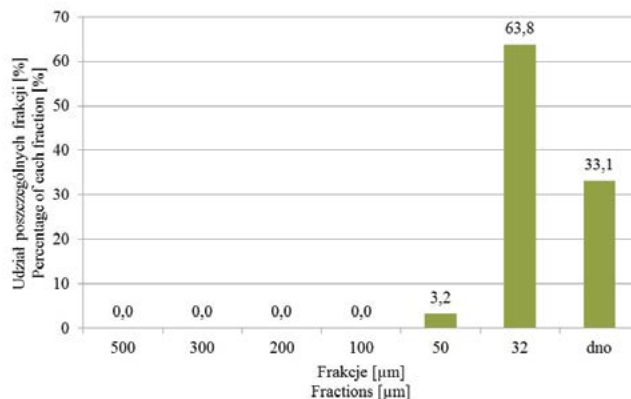


Ryc. 16. Wynik analizy cyfrowej odsiewu na sicie 32 µm pyłu likopodium

Fig. 16. Results of digital analysis for lycopodium dust using 32 µm sieve

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 17. Wynik analizy cyfrowej pyłu likopodium z dna wytrząsarki

Fig. 17. Results of digital analysis for lycopodium dust from the bottom of sieve machine

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Okazało się, że wyniki analizy cyfrowej znajdują się w mniejszym zakresie spodziewanym po analizie sitowej. Przeważająca część wyników, to jest odpowiednio 52,5% dla odsiewu z sita 32 µm oraz 63,8% dla najniższego poziomu, znalazły się w przedziałach odpowiadających większemu rozmiarowi oczka, a zatem nie powinny znaleźć się na poszczególnych poziomach. Analiza cyfrowa pyłu likopodium pozwoliła jednoznacznie stwierdzić, że odsiew z sita 32 µm stanowiły ziarna będące zlepkiem kilku innych ziaren o średnicy zbliżonej do pozostałych. W przypadku pyłu niewykazującego tendencji do łączenia się cząstek może być to efektem nieodpowiednio dobranej amplitudy podczas procesu przesiewania lub błędami numerycznymi w procesie analizy obrazu. Fakt istnienia cząstek złączonych na stałe generuje również niepewności podczas obróbki cyfrowej fotografii, stawiając pod znakiem zapytania zasadność rozdzielania połączonych cząstek.

4. Podsumowanie i wnioski

Metoda badania ziarnistości pyłów palnych z wykorzystaniem mikroskopu oraz oprogramowania do analizy cyfrowej okazała się być niewystarczająco dokładna, a zarazem zbyt czasochłonna, aby móc stosować ją jako narzędzie autonomiczne. W przypadku pyłów mających skłonności do aglomeracji problemem jest przygotowanie próbki w taki sposób, aby materiał ułożył się pod mikroskopem, nie tworząc skupiska. Badanie wszystkich rodzajów pyłu wykazało duże różnice w wynikach. Zależnością występującą we wszystkich badaniach było wykazywanie istnienia na odsiewach z konkretnych sit materiału o ziarnach, które powinny zatrzymać się na sicie o większych oczkach. Spowodowane jest to przede wszystkim stosowaniem dwóch sposobów obliczania średnic poszczególnych ziaren. Jak wspomniano wcześniej, w analizie sitowej bada się średnice sitowe cząstek, natomiast w analizie cyfrowej, z wykorzystaniem dostępnych narzędzi, średnicę projekcyjną. Są to różnice spowodowane przede wszystkim możliwością podglądu ziaren jedynie w dwóch wymiarach. Ziarna o strukturze płatkowatej takie jak chociażby badany pył aluminiowy znajdą drogę przez kwadratowe oczka sit, wykorzystując nieznaną obserwatorowi trzeci wymiar – grubość. Idąc dalej w tym kierunku, można pokusić się o określenie dobieranego empirycznie współczynnika wynikającego z kształtu cząstek. Przydatne w opracowaniu tego typu metody byłyby z pewnością inne parametry poszczególnych cząstek podawane przez program Image-J, takie jak współczynnik okrągłości, średnica Fereta, czy dopasowana elipsa. Niewiadomą jednak pozostanie trzeci wymiar ziarna, do określenia którego metoda mikroskopowa nie jest wystarczająca. Z drugiej strony cząstki pyłu likopodium wydają się być kształtem podobne do kuli, a mimo to wyniki analizy cyfrowej wychodzą zawyżone w stosunku do analizy sitowej. Zatem reasumując, można stwierdzić, iż analiza cyfrowa znajdzie zastosowanie jako proces wspomaganie analizy sitowej pomagający dobrać wystarczającą liczbę sit oraz odpowiednie wartości nasypowe badanego pyłu.

Publikacja powstała w ramach realizacji projektu rozwojowego DOBR-BIO4/052/13073/2013 pt. „Innowacyjne technologie zabezpieczeń przed wybuchem, w tym obiektów szczególnie chronionych”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

1. Sonechkin V., Panasevich L., Rackauskas A., *Otsenka požarovzryvoopasnosti tekhnologicheskogo protsessa mekhanicheskoy obrabotki drevesnykh materialov*, „Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashhenie, likwidacija”, Issue 1, 2014, pp. 32-35.
2. Kamiński S., Kamińska D., *Porównanie metod pomiaru granulacji materiałów ziarnistych, streszczenie*, IX Sympozjum „Granulacja”, Nałęczów 2012.
3. Radomski P., Jarosiński A., *Wyznaczanie powierzchni właściwej materiałów ziarnistych w aspekcie stosowania jej wielkości w wybranych procesach technologicznych*, „Czasopismo Techniczne. Chemia”, 2010, R. 107, z. 1-Ch, 267-276.
4. PN-ISO 2591-1: 2000, Analiza sitowa. Metody z zastosowaniem sit kontrolnych z tkaniny z drutu i z blachy perforowanej.
5. Živcová Z., Gregorová E., Pabst W., *Porous alumina ceramics produced with lycopodium spores as pore-forming agents*, „Journal of Materials Science”, Vol. 42, Issue 20, 2007.

dr inż. Rafał Porowski – absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. W roku 2010 ukończył studia doktoranckie na Wydziale Mechanicznym, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Temat rozprawy doktorskiej dotyczył badań doświadczalnych i symulacji numerycznych przejścia do detonacji w mieszaninach gazowych. W latach 2009-2010 w ramach stypendium Fulbrighta pracował w California Institute of Technology, gdzie w Explosion Dynamics Laboratory zajmował się badaniami doświadczalnymi propagacji fal uderzeniowych oraz detonacji w mieszaninach heterogenicznych. Obecnie pracuje w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości w CNBOP-PIB w Józefowie.

inż. Dawid Bodalski – w roku 2013 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej. Obecnie pracuje na stanowisku młodszego specjalisty w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpowodziowej – PIB w Józefowie.

mgr Martyna Strzyżewska – absolwentka Wydziału Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego. Pracuje na stanowisku młodszego specjalisty w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpowodziowej – PIB w Józefowie.