POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA INŻYNIERIA CHEMICZNA

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

Rozprawa doktorska

mgr inż. Mateusz Kamiński

Wykorzystanie jedno- i wielowarstwowych filtrów włókninowych do oczyszczania gazów z cząstek zawieszonych stałych i ciekłych

Promotor

prof. uczelni, dr hab. inż. Jakub M. Gac

WARSZAWA 2023

Streszczenie

W ostatnich latach obserwowany jest znaczący wzrost zapotrzebowania na rozwój i wykorzystanie metod usuwania zawieszonych w strumieniu gazu cząstek stałych i ciekłych różnego pochodzenia. Jednym ze sposobów oczyszczania strumienia gazu jest wykorzystanie procesu filtracji z wykorzystaniem filtrów włókninowych. W celu skutecznego prowadzenia tego procesu potrzebna jest wiedza na temat wszystkich składników rozważanego układu i zjawisk występujących w trakcie procesu filtracji. Kluczowa jest wiedza odnośnie zarówno aerozolu będącego wyzwaniem takiego procesu, filtra będącego stosowanym rozwiązaniem jak i dodatkowych efektów i zmian zachodzących w układzie na skutek prowadzenia tego procesu. Na podstawie tych informacji możliwe jest sporządzenie modelu obliczeniowego pozwalającego opisać działanie filtra podczas filtracji danego aerozolu. Cykl publikacji stanowiący podstawę tej rozprawy porusza teoretyczne oraz eksperymentalne aspekty prowadzenia procesu filtracji aerozoli z wykorzystaniem filtrów włókninowych oraz przedstawia przebieg prac nad modelem obliczeniowym.

Filtry włókninowe wykorzystane w badaniach wykonane zostały metodą rozdmuchu stopionego polimeru, a ich struktura wewnętrzna charakteryzuje się nieregularnym rozmieszczeniem włókien. Wykorzystane filtry różniły się średnim rozmiarem włókien je budujących, a jak zostało to pokazane w toku pracy, opis filtra poprzez średnią wartość rozmiaru włókien nie jest wystarczający. Przedstawiono sposób wyznaczania na podstawie zdjęć mikroskopowych rzeczywistego rozkładu rozmiarów włókien filtra oraz implementacji uproszczonej wersji tego rozkładu w modelu obliczeniowym.

W badaniach wykorzystano aerozole jednoskładnikowe składające się z grafitowych cząstek stałych, kropel oleju oraz kropel wody, a także ich wieloskładnikowe kombinacje o różnych koncentracjach, co pozwoliło na wskazanie i porównanie efektów zachodzących na powierzchni i we wnętrzu filtra na skutek depozycji na jego włóknach cząstek aerozolowych różnych rodzajów i o różnych właściwościach.

Doświadczenia z wykorzystaniem aerozolu mieszanego zawierającego cząstki stałe i krople oleju poskutkowały identyfikacją charakterystycznego dla tego układu maksimum sprawności obserwowanego dla filtrów o wysokiej sprawności ogólnej i wysokiej sprawności włókien budujących taki filtr, któremu towarzyszy dodatkowo minimum średniego rozmiaru cząstki penetrującej przez filtr. Występowanie tego efektu przypisano istnieniu lokalnej strefy najintensywniejszego wychwytu cząstek, przemieszczającej się we wnętrzu filtra, a której istnienie związane jest z efektami poślizgu cząstek na zwilżonym cieczą włóknie,

przemieszczania się zatrzymanej na włóknie cieczy po jego powierzchni i w głąb filtra oraz jej ociekania wymuszonego przepływem oraz działaniem siły grawitacji, wtórnego porywania cząstek zdeponowanych z powierzchni włókien, zmiany efektywnej średnicy włókna, zmiany lokalnej gęstości upakowania oraz zmiany lokalnej prędkości linowej przepływu.

W toku badań wskazano konieczność wykorzystania w modelu obliczeniowym rozwiązań empirycznych o odpowiednio dopasowanej wartości współczynników, dokładniejszego odwzorowania rozkładu rozmiarów włókien filtra, koncepcji efektywnej gęstości cząstek stałych oraz wynikających z depozycji na włóknach cząstek aerozolowych zmian gęstości upakowania filtra, zmian liniowej prędkości przepływu przez filtr oraz w przypadku rozpatrywanych niezależnie od siebie włókien, zmian ich średnicy. Zaproponowany model obliczeniowy wykorzystano do opisu zmiany masy filtra oraz w oparciu o niego zaproponowano model opisujący zmiany spadku ciśnienia na filtrze, który również wykorzystano do opisu badanych filtrów.

Rozbieżności pomiędzy wynikami eksperymentalnymi i modelowymi przeanalizowano i zaproponowano ich potencjalne wyjaśnienia, a także na ich podstawie wskazano dodatkowe zjawiska mogące występować w badanych układach oraz zasugerowano obiecujące kierunki dalszych badań i rozważań, które pozwoliłyby na dokładniejsze opisanie procesu filtracji zawieszonych w strumieniu gazu cząstek stałych i ciekłych z wykorzystaniem filtrów włókninowych.

Słowa kluczowe: aerozole wieloskładnikowe, cząstki stałe, filtry włókninowe, krople cieczy, model obliczeniowy, spadek ciśnienia, sprawność filtracji

Abstract

In recent years, there has been a substantial increase in the demand for the development and use of methods to remove solid and liquid particles of various origins suspended in the gas stream. One way of cleaning the gas stream is to utilise a filtration process using nonwoven filters. In order to carry out the filtration process effectively, the knowledge of all the components of the system under consideration and the phenomena occurring during the process is required. It is essential to possess knowledge regarding the challenge of the process - aerosol, the utilised solution - filter, and all the additional effects and changes occurring in the system as a result of the process. On the basis of this information, a calculation model can be created to describe the filter performance during the filtration of a given aerosol. The series of publications that form the basis of this dissertation addresses the theoretical and experimental aspects of mixture aerosol filtration using nonwoven filters and presents the development of a calculation model.

The nonwoven filters utilised in this study were made by melt-blown technique, and their internal structure is characterised by an irregular distribution of fibres. The utilised filters differed in the average size of the filter-forming fibres, and, as shown in the course of the work, the description of the filter by the average value of the fibre size is not sufficient. A method for determining the actual filter fibre size distribution based on the microscopic images and implementation of a simplified version of this distribution in a calculation model is presented.

Single-component aerosols consisting of graphite particles, oil droplets and water droplets, as well as their multi-component combinations with different concentrations, were utilised during the research, which made it possible to indicate and compare the effects occurring on the surface and inside the filter due to the deposition of aerosol particles of different types and properties on its fibres.

Experiments with a mixture aerosol containing solid particles and oil droplets resulted in the identification of the characteristic for this aerosol, maximum efficiency observed for filters with high overall efficiency and high efficiency of the fibres building such a filter, accompanied by a minimum observed in the average size of the particle penetrating the filter. The occurrence of this effect was attributed to the existence of a local area of most intense particle capture, moving inside the filter, the existence of which is related to the effects of particle slip on the liquid-wetted fibre, movement of the retained liquid on the fibre surface and into the depth of the filter, as well as its drainage forced by the flow and action of the

gravitational force, secondary entrainment of particles deposited from the fibre surface, a change in the effective diameter of the fibre, a change in the local packing density and a change in the local linear velocity of the flow.

The research indicated the need to utilise empirical solutions in the calculation model with suitably adjusted coefficients, a more accurate representation of the filter fibre size distribution, the concept of effective particle density and the resulting changes in filter packing density due to aerosol particle deposition on the fibres, changes in the linear flow velocity through the filter and, in the case of the fibres considered independently, changes in their diameter. The proposed calculation model was utilised to describe the change in filter mass, and based on this, a model was proposed to describe the change in pressure drop across the filter, which was also used to describe the tested filters.

Discrepancies between experimental and model results have been analysed, and their potential explanations have been proposed, and based on them, additional phenomena which may occur in the studied systems have been indicated, and promising directions for further research and considerations have been suggested, which would allow a more accurate description of the process of filtration of solid and liquid particles suspended in the gas stream with the use of nonwoven filters.

Keywords: multi-component aerosols, solid particles, nonwoven filters, liquid droplets, calculation model, pressure drop, filtration efficiency

Spis Treści

Streszczenie ... 3
Abstract ... 5
Życiorys naukowy ... 8
1. Wstęp ... 11
2. Cele, zakres i tezy pracy ... 15
3. Podstawy teoretyczne ... 17
3.1. Metody oczyszczania gazów oraz wytwarzanie filtrów włókninowych ... 17
3.2. Filtry włókninowe jedno- i wielowarstwowe ... 19
3.3. Aerozole wieloskładnikowe ... 21
3.4. Sprawność filtracji i opory przepływu ... 23
3.5. Schemat obliczeń ... 30
4. Uzupełnienie przedstawionej w artykułach metodyki badawczej ... 34
4.1. Stanowisko pomiarowe ... 34
4.2. Izokinetyczność ... 36
4.3. Czas przebywania oraz łączenie strumieni w przypadku aerozoli mieszanych ... 38
4.4. Gęstość efektywna grafitowych cząstek stałych ... 41
4.5. Rozkład rozmiarów włókien filtrów ... 42
4.6. Rozkład rozmiarów cząstek aerozolowych ... 45
4.7. Krok czasowy ... 52
4.8. Powtarzalność wyników i analiza statystyczna ... 53
5. Omówienie artykułów ... 56
5.1. Artykuł pierwszy ... 56
5.2. Artykuł drugi ... 60
5.3. Artykuł trzeci ... 66
5.4. Artykuł czwarty ... 72
5.5. Wpływ depozytów stałych na strukturę filtra podczas filtracji aerozolu mieszanego ... 77
5.6. Rozkład masy depozytów we wnętrzu filtra wielowarstwowego ... 78
6. Podsumowanie i osiągnięcia naukowe ... 85
7. Bibliografia ... 97
8. Oświadczenia współautorów ... 104
9. Treść publikacji ... 109

Życiorys naukowy

2017-2023 - studia doktoranckie na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej, dyscyplina naukowa - Inżynieria chemiczna, brak wcześniejszego ubiegania się o nadanie stopnia doktora

2016-2017 - studia magisterskie na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej, kierunek - Inżynieria chemiczna i procesowa, specjalność - Inżynieria procesów ochrony środowiska

2012-2016 - studia inżynierskie na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej, kierunek - Inżynieria chemiczna i procesowa

Publikacje naukowe

Publikacje stanowiące podstawę rozprawy doktorskiej:

[A1] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, S. Jakubiak, „Filtration of aerosols containing graphite nanoparticles or their mixture with water droplets on single and multi-layer fibrous filters", Separation and Purification Technology (2020), doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116378, IF=9,136, 140 pkt.

[A2] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, S. Jakubiak, T. Jankowski, „Filtration of submicron soot particles, oil droplets, and their mixtures on single- and multi-layer fibrous filters", Aerosol and Air Quality Research (2022), doi.org/10.4209/aaqr.210258, IF=4,53, 100 pkt.

[A3] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, T. Jankowski, „Mixture Aerosols Filtration on Filters with Wide Fibre Diameter Distribution - Comparison with Theoretical and Empirical Models", Aerosol and Air Quality Research (2022), doi.org/10.4209/aaqr.220039, IF=4,53, 100 pkt.

[A4] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, T. Jankowski, „Pressure Drop Dynamics during Filtration of Mixture Aerosol Containing Water, Oil, and Soot Particles on Nonwoven Filters", Polymers (2023), doi.org/10.3390/polym15071787, IF=4,967, 100 pkt.

Sumaryczne wartości dla cyklu publikacji stanowiącego podstawę rozprawy doktorskiej: IF = 23,163; 440 punktów ministerialnych

Wkład autora w poszczególne artykuły:

A1 – Główny autor – Opracowanie koncepcji pomiarów; przeprowadzenie pomiarów sprawności filtracji i oporów przepływu dla aerozolu grafitowych cząstek stałych oraz aerozolu mieszanego cząstek stałych i kropel wody; charakteryzacja włóknin; przeprowadzenie obliczeń sprawności; edycja zdjęć mikroskopowych; interpretacja wyników pomiarów; przygotowanie i edycja treści artykułu.

A2 – Główny autor – Opracowanie koncepcji pomiarów; przeprowadzenie pomiarów sprawności filtracji dla aerozoli jedno- i wieloskładnikowych; charakteryzacja włóknin; sformułowanie modelu obliczeniowego i przeprowadzenie obliczeń sprawności z wykorzystaniem autorskiego programu obliczeniowego; edycja zdjęć mikroskopowych; interpretacja wyników pomiarów; przygotowanie i edycja treści artykułu; przygotowanie wszystkich wykresów (poza schematem układu).

A3 – Główny autor – Opracowanie koncepcji pomiarów; przeprowadzenie pomiarów sprawności filtracji dla aerozoli jedno- i wieloskładnikowych o różnej koncentracji; przeprowadzenie obliczeń sprawności z wykorzystaniem zmodyfikowanego autorskiego programu obliczeniowego; interpretacja wyników pomiarów; przygotowanie i edycja treści artykułu; przygotowanie wszystkich wykresów (poza schematem układu).

A4 – Główny autor – Opracowanie koncepcji pomiarów; przeprowadzenie pomiarów sprawności filtracji oraz oporów przepływu dla aerozoli jedno- i wieloskładnikowych o różnej koncentracji; przeprowadzenie obliczeń sprawności filtracji i oporów przepływu z wykorzystaniem zmodyfikowanego autorskiego programu obliczeniowego; edycja zdjęć mikroskopowych; interpretacja wyników pomiarów; przygotowanie i edycja treści artykułu; przygotowanie wszystkich wykresów (poza schematem układu).

Inne publikacje:

Wystąpienia konferencyjne (prezentacja ustna)

[K1] Kamiński Mateusz, Nowak Bartosz, Bojarska Marta, *Sorption properties of MTMS-based aerogel and filters modified with its share*, 7th European Young Engineers Conference, Warszawa, 23-25 kwietnia 2018

[K2] Kamiński Mateusz, Gac Jakub M., *Filtration of solid and liquid aerosols and their mixtures on non-woven filters*, 10th European Young Engineers Conference, Warszawa, 4-6 kwietnia 2022

Wystąpienia konferencyjne (prezentacja posterowa)

[K3] Kamiński Mateusz, Gac Jakub M., *Filtration of aerosol particles on multilayer fibrous filters - physical base and optimization*, 23rd Polish Conference of Chemical and Process Engineering, Jachranka, 2-5 Czerwca 2019

Staże zagraniczne:

[S1] Praktyka w ramach programu Erasmus+, Preparation and characterisation of filtration materials, GVS S.p.A., Zola Predosa, Włochy, 01.09.2022-30.11.2022

1. Wstęp

Filtracja z wykorzystaniem filtrów włókninowych, ze względu na prostotę, dostępność i łatwość implementacji tego rozwiązania, jest jedną z najpopularniejszych metod usuwania zanieczyszczeń ze strumienia powietrza. Filtry stosowane są do usuwania zanieczyszczeń fizycznych o różnym pochodzeniu, zarówno tych składających się z cząstek stałych jak i kropel. Znajdują one zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym [1–3], ochronie zdrowia [4–6], systemach ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji [7,8], w biotechnologii do zapewnienia czystego, pozbawionego zanieczyszczeń stałych, powietrza będącego źródłem tlenu, przy wytwarzaniu elektroniki i układów scalonych [9], a także wszędzie tam gdzie wymagana jest odpowiednia jakość powietrza na wejściu lub wyjściu z danego układu [10–12].

Według różnych szacunków, segment rynku obejmujący metody oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń podwoi swoją wartość w ciągu obecnej dekady i przekroczy 25 miliardów dolarów amerykańskich w ujęciu globalnym [13–16]. Za rozwój ten odpowiada częściowo niedawna pandemia, w trakcie której proces oczyszczania powietrza z wykorzystaniem filtrów był jedną z najpopularniejszych metod mającą na celu ograniczenie rozprzestrzenianie się wirusów [17–20]. Zwiększone zainteresowanie wynika również z postępującego zanieczyszczenia środowiska, zwłaszcza w krajach rozwijających się, a także rosnącej świadomości społeczeństw na temat niebezpieczeństw wynikających z oddziaływania na zdrowie znajdujących się w powietrzu zanieczyszczeń, zarówno tych pod postacią lotnych związków jak i zanieczyszczeń stałych [21–23]. Dzięki osiągnięciom w dziedzinie funkcjonalizacji materiałów, możliwe stało się dostosowanie filtrów do nowych zastosowań. Wykorzystanie włókien filtra jako nośnik, który wykorzystywany jest jako podstawa do różnego rodzaju modyfikacji pozwoliło rozszerzyć podstawową funkcjonalność filtra o takie efekty jak biobójczość [24], czy zdolność do usuwania lotnych związków organicznych [25,26]. Odpowiednie modyfikacje powierzchni włókien, lub wykorzystanie włóknin w filtrach kompozytowych [9,27], umożliwia nadanie im właściwości samooczyszczających [28,29], wydłużenie czasu efektywnej pracy lub jak ma to miejsce w przypadku materiałów elektretowych poprawienie sprawności dla określonego zakresu rozmiaru cząstek filtrowanych [30]. Szeroka gama możliwości ułatwia dopasowanie odpowiedniego filtra do konkretnego zastosowania, co wpływa na popularność tego rozwiązania.

Jednym z czynników, na który nie zawsze można wpłynąć jest natomiast rzeczywisty skład aerozolu. W rzeczywistości często zdarza się, czy to ze względu na dodatkowe nieprzewidziane na etapie projektu stałe źródło zanieczyszczenia, czy jedynie czasowe

wynikające z nieprzewidywalnych okoliczności, że mamy do czynienia z aerozolem pod postacią wieloskładnikowej mieszaniny cząstek i kropel o różnej charakterystyce i koncentracji. W takim przypadku filtr może nie spełniać postawionych przed nim wymagań jakościowych i ilościowych. Nawet jeśli wykluczymy tego typu trudno przewidywalne i niezamierzone przypadki, użycie filtra włókninowego do filtracji aerozoli mieszanych może być po prostu najlepszym i pożądanym rozwiązaniem. Z tych względów istnieje potrzeba poszerzania wiedzy na temat filtracji bardziej skomplikowanych układów, w tym aerozoli mieszanych [31,32].

Przykładem takiego układu, któremu poświęcono w ostatnich latach uwagę jest filtracja naprzemienna cząstek stałych i ciekłych [33–35]. W tym przypadku odkryto ważne zależności wpływające na sprawność procesu filtracji oraz mechanizm depozycji na powierzchni włókna. Krople cieczy wprowadzone do aerozolu trafiającego na pokryte wcześniej cząstkami stałymi włókna prowadzą do degradacji zbudowanej z cząstek stałych struktury. Następuje powolne pokrycie włókien cieczą, aż osiągnięty zostanie etap dynamicznej równowagi pomiędzy nowymi kroplami trafiającymi na włókno oraz cieczą je opuszczającą. W przypadku odwrotnym, warstewka cieczy pokrywająca włókno jest powoli zapełniana depozytami stałymi, a kiedy pojemność warstewki zostaje wyczerpana nie obserwuje się rozbudowy struktury poza granicę tej warstewki [33].

Podobne interakcje obserwowane są dla jednoczesnej filtracji cząstek stałych i ciekłych, gdzie powyższe efekty występują równocześnie, ale w mniejszej skali i indywidualnie dla każdej deponowanej cząstki. W początkowej fazie filtracji, kiedy włókna nie są jeszcze całkowicie pokryte depozytami występują w układzie następujące interakcje mogące prowadzić do depozycji: cząstka stała-włókno, kropla-włókno, cząstka stała-kropla na włóknie, cząstka stała-cząstka na włóknie, kropla-cząstka stała na włóknie, kropla-kropla na włóknie. Każda z nich może charakteryzować się inną sprawnością zatrzymania nowej cząstki, która dodatkowo zależna jest od jej rozmiaru i od liczby cząstek z którą wchodzi ona w kontakt przy powierzchni włókna. Dodatkowo z upływem czasu interakcje pomiędzy nową cząstką a włóknem ustępować będą interakcjom pomiędzy nową cząstką, a cząstkami już zdeponowanymi, a w późniejszych etapach filtracji strukturami utworzonymi z zatrzymanych na włóknie cząstek. Po odpowiednio długim czasie, w przypadku filtracji jedynie cząstek stałych, to utworzona z nich struktura będzie niemal całkowicie odpowiadać za sprawność filtra i jej zmiany [36]. Natomiast w przypadku cząstek ciekłych, coraz wyraźniejsze stanie się zjawisko resuspensji kropel z włókien filtra oraz ociekania cieczy wewnątrz filtra [37,38].

Osobnym aspektem mającym wpływ na ogólną sprawność filtra jest ogół wszystkich włókien, znajdujących się na drodze cząstki zawieszonej w strumieniu gazu, z którymi potencjalnie może wystąpić interakcja. Droga ta zależy od grubości filtra, lub w przypadku filtra wielowarstwowego sumy grubości wszystkich jego warstw. Ponadto w przypadku filtra wielowarstwowego, którego warstwy mogą różnić się właściwościami, możemy mieć do czynienia z różną sprawnością każdej warstwy względem różnych cząstek oraz różną jej zmianą w czasie trwania procesu. Dodatkowo zmiana ta będzie zależeć od tego w którym rejonie filtra, lub jego warstwie, dochodzić będzie do najintensywniejszej depozycji i gromadzenia się cząstek. Wpływ wszystkich opisanych interakcji i zjawisk musi zostać oceniony i uwzględniony w docelowym modelu.

Podstawowym modelem wykorzystywanym do opisu zjawiska filtracji z wykorzystaniem filtrów włókninowych jest klasyczna teoria filtracji [39,40]. Pozwala ona na wyznaczenie sprawności filtra, dla danego rozmiaru cząstki filtrowanej, na podstawie obliczonej sprawności włókna ekwiwalentnego, która z założenia opisuje całość filtra. Bazuje ona na założeniu, że opis filtrowanych cząstek jako posiadających sferyczny kształt z dobrą dokładnością odzwierciedla rzeczywistość. Założenie to jest spełnione w przypadku cząstek ciekłych o rozmiarach nie powodujących ich odkształcenia podczas przemieszczania się w strumieniu powietrza oraz dla tej części cząstek stałych, które mają jednorodną strukturę. Ponadto, kiedy filtrowane cząstki stałe są aglomeratami mniejszych cząstek, kształt aglomeratów może odbiegać od kulistego co będzie miało negatywny wpływ na dokładność modelu. Dodatkowo w przypadku aglomeratów problematyczne staje się wyznaczenie rzeczywistej gęstości cząstki. Pomocna w rozwiązaniu tego problemu może być gęstość efektywna cząstki, która zależna jest od kształtu i rozmiaru aglomeratu i pozwala w lepszym stopniu oddać rzeczywiste właściwości cząstki. Jednakże nawet to rozwiązanie staje się skomplikowane kiedy w układzie pojawiają się krople cieczy, które mogą częściowo wypełniać wolne przestrzenie aglomeratu. W przypadku cząstek o dużych rozmiarach, przekraczających rozmiar włókien, pojawiają się w układzie efekty rozpadu cząstki (aglomeratu) lub kropli na skutek kontaktu z włóknem i może dochodzić jedynie do częściowego zatrzymania cząstki. Klasyczna teoria bierze również pod uwagę pojedynczą średnią wartość średnicy włókna filtra. Wymaga ona, aby filtr składał się z jednorodnych włókien o identycznych rozmiarach, lub aby rozkład rozmiarów włókien i ich wpływ na sprawność filtra były symetryczne. W przypadku filtrów składających się z włókien o różnych średnicach, lub z wielu warstw z których każda zbudowana jest z innego rozmiaru włókien, wyzwaniem staje się prawidłowa implementacja w modelu rozkładu rozmiaru włókien.

Dodatkową komplikacją z tego wynikającą jest nierównomierna zmiana rozmiaru włókna na skutek obładowania cząstkami zatrzymanymi. Włókna o większej sprawności będą zatrzymywały więcej cząstek, a ich rozmiar będzie zmieniał się bardziej dynamicznie. Różnica w sprawności wynikać może zarówno z różnic w rozmiarach jak i umiejscowienia danego włókna we wnętrzu filtra.

Włókna znajdujące się na powierzchni filtra jednorodnego, charakteryzują się największą efektywną zdolnością zatrzymywania cząstek aerozolowych, co wynika z liczby cząstek w interakcję z którymi mogą one wejść. Po zatrzymaniu części cząstek na włóknach znajdujących się na powierzchni, znajdujące się głębiej we wnętrzu filtra włókna mogą wchodzić w potencjalne interakcje z mniejszą liczbą cząstek. Zatem zmiany zachodzące w czasie dla poszczególnych włókien, zależeć będą również od ich umiejscowienia w strukturze filtra. Oznacza to, że również grubość takiego filtra jest jednym z istotnym parametrów mających wpływ na jego sprawność oraz jej zmiany w czasie trwania procesu filtracji.

Zapełnianie filtra depozytami prowadzi również do zmniejszenia wolnej objętości filtra dostępnej dla przepływu strumienia aerozolu. Skutkuje to wzrostem efektywnej gęstości upakowania filtra oraz większą prędkością liniową przepływu we wnętrzu filtra [38,41–44]. Dodatkowo zarówno prędkość przepływu, średnice włókien jak i gęstość upakowania będą zmieniały się niezależnie od siebie w przypadku filtra wielowarstwowego.

Obecnie nie istnieją jeszcze modele, które pozwalałyby przewidywać zmianę sprawności filtra w trakcie długotrwałej filtracji aerozoli wieloskładnikowych, a wiedza na temat zjawisk zachodzących wewnątrz filtra w trakcie tego szczególnego procesu jest mocno ograniczona i oparta w znacznym stopniu o uproszczone odwzorowanie takiego układu.

2. Cele, zakres i tezy pracy

Celem niniejszej pracy doktorskiej jest zbadanie filtracji aerozoli jedno- i wieloskładnikowych z wykorzystaniem filtrów włókninowych oraz modyfikacja i dostosowanie istniejących modeli obliczeniowych, wykorzystywanych dla układów jednoskładnikowych, do opisu układów wieloskładnikowych z uwzględnieniem zmian zachodzących wewnątrz filtra w czasie trwania procesu filtracji.

Jednym z głównych zagadnień tej pracy jest tematyka interakcji pomiędzy cząstkami aerozolowymi o różnej morfologii i charakterystyce z włóknami filtra. Zależnie od tego czy mamy do czynienia z cząstką ciała stałego, czy kroplą cieczy, sposób osadzania się na włóknie będzie inny. Cząstki ciała stałego będą z czasem tworzyć skomplikowaną trójwymiarową strukturę na powierzchni włókna, za to krople będą się ze sobą łączyć i przemieszczać po jego powierzchni. Natomiast gdy filtracja różnych aerozoli prowadzona jest w sposób jednoczesny, w układzie pojawiają się dodatkowo skomplikowane interakcje pomiędzy cząstkami tych aerozoli. Interakcje te występują zarówno pomiędzy cząstkami i kroplami już osadzonymi na powierzchni włókna, znajdującymi się jeszcze w strumieniu powietrza jak i pomiędzy tymi dopiero się osadzającymi i już znajdującymi się na włóknie. W tym ostatnim przypadku częściowej zmianie ulegnie sposób osadzania się cząstek na powierzchni włókna filtra.

Dodatkowo z upływem czasu, zdeponowane cząstki aerozolowe powoli zapełniają wnętrze filtra, co prowadzi do zmian w jego strukturze wewnętrznej. Zmianie ulega powierzchnia włókien, pole przepływu strumienia aerozolu wewnątrz struktury filtra oraz sama makroskopowa struktura filtra, a charakter tych zmian zależy od tego jakie cząstki, lub ich mieszanina, znajdują się w strumieniu aerozolu i są przez filtr wychwytywane. Zapełnianie filtra nie następuje równocześnie w całej jego objętości, zależnie od rodzaju cząstek filtrowanych, w strukturze filtra rozwija się asymetryczny rozkład sprawności. Odpowiedni model obliczeniowy powinien w satysfakcjonującym stopniu uwzględniać i opisywać wszystkie te efekty, które mają znaczenie i wpływ, a także ich zmianę w czasie trwania procesu filtracji.

Podsumowując w pracy postawiono następujące hipotezy badawcze:

H1 – rodzaj cząstek aerozolowych, a w przypadku aerozoli wieloskładnikowych, również udział poszczególnych składników takiego aerozolu, ma wpływ na morfologię depozytów filtracyjnych.

H2 – zmiany w czasie sprawności i spadku ciśnienia na filtrze, zależą od morfologii depozytów filtracyjnych, przy czym dominujący wpływ na te zmiany mają krople (o ile występują one w aerozolu).

H3 – efektywne przewidywanie sprawności i spadku ciśnienia na filtrach jedno- i wielowarstwowych oraz ich zmian podczas filtracji aerozoli wieloskładnikowych wymaga modyfikacji istniejących modeli, uwzględniających m.in. dokładniejszy opis rozkładu rozmiarów włókien filtra i objętości depozytów na nich zatrzymanych.

W celu udowodnienia powyższych hipotez, przed pracą postawiono następujące cele szczegółowe:

1) zmodyfikowanie i dostosowanie standardowego stanowiska do badania filtracji aerozoli jednoskładnikowych, tak aby możliwe było badanie filtracji aerozoli wieloskładnikowych o różnym składzie i koncentracjach, zawierających cząstki ciała stałego, krople oleju i krople wody,
2) opis zmian w czasie parametrów eksploatacyjnych filtrów (sprawności, spadku ciśnienia) podczas filtracji aerozoli wieloskładnikowych o różnej zawartości cząstek stałych i kropel,
3) zbadanie wzajemnego wpływu cząstek stałych i kropel cieczy na morfologię powstających na powierzchni włókien depozytów filtracyjnych,
4) dostosowanie istniejącego modelu sprawności filtracji do przypadku filtracji aerozoli wieloskładnikowych oraz usprawnienie tego modelu o możliwość przewidywania zmian w czasie sprawności filtra,
5) opracowanie modelu pozwalającego na przewidywanie zmiany masy filtra w czasie procesu filtracji, bazującego na masie zatrzymanych depozytów oraz opracowanie opartego o tę zmianę modelu oporów przepływu przez filtr.

3. Podstawy teoretyczne

Poniższy rozdział zawiera zarówno informacje literaturowe jak i własne przemyślenia na temat procesu filtracji aerozoli z wykorzystaniem filtrów włókninowych. Przedstawiono pozycję tego procesu pośród innych metod separacji oraz jego pozycję na tle alternatywnych metod oczyszczania gazów z zanieczyszczeń. Przybliżono metody produkcji filtrów włókninowych, w tym metody rozdmuchu stopionego polimeru, która wykorzystana była do wytworzenia filtrów wykorzystanych w badaniach. Nakreślono podział włóknin ze względu na ich budowę i strukturę oraz potencjalny wpływ struktury filtra na prowadzenie procesu filtracji. Bazując na wiedzy literaturowej odnośnie procesu filtracji aerozoli jednoskładnikowych przedstawiono, w formie przemyśleń własnych, kluczowe efekty które mogą zaistnieć i wpływać na prowadzenie procesu filtracji aerozoli wieloskładnikowych z uwzględnieniem zmian zachodzących w czasie trwania tego procesu. Przedstawiono ideę istniejących modeli obliczeniowych wykorzystywanych do opisu tego procesu. Zaproponowano sposób ich modyfikacji, tak aby możliwe było ich wykorzystanie do opisu filtracji aerozoli wieloskładnikowych oraz opisu zmian zachodzących na skutek depozycji cząstek aerozolowych. Opisano również schemat prowadzenia obliczeń w oparciu o zmodyfikowaną postać modeli obliczeniowych.

3.1. Metody oczyszczania gazów oraz wytwarzanie filtrów włókninowych

Metody oczyszczania gazów, stosowane na szeroką skalę w przemyśle, podzielić można na metody suche i mokre. W przypadku metod suchych, właściwości cząstek stałych lub kropel cieczy wykorzystywane są w celu zatrzymania ich na przeszkodzie. Siłą napędową takich procesów jest oddziaływanie grawitacyjne w przypadku komór osadczych, siła bezwładności w przypadku aparatów inercyjnych lub jak ma to miejsce w cyklonach siła odśrodkowa. Kontakt ze ściankami aparatu, siatkami lub żaluzjami prowadzi do wytracenia energii kinetycznej przez cząstki i krople, a dalej do zsuwania lub ociekania (w przypadku kropel) i grawitacyjnego opadania na dno aparatu. Sprawność tych metod zależna jest bezpośrednio od rozmiaru oraz masy usuwanych zanieczyszczeń stałych i ciekłych, i spada wraz ze spadkiem rozmiaru. Skuteczność usuwania dla najmniejszych rozmiarów może zostać poprawiona przez wykorzystanie metod mokrych, bazujących na wprowadzeniu do systemu odpowiedniej cieczy jak ma to miejsce w różnego rodzaju konstrukcji skruberach. Rozproszona pod postacią kropel ciecz, staje się dodatkową przeszkodą i potencjalnym kolektorem na drodze zawieszonych w strumieniu gazu cząstek i kropel. Pozwala to znacznie poprawić sprawność w całym zakresie rozmiarów, również poniżej jednego mikrometra.

Dodatkową przewagą metod mokrych nad suchymi jest możliwość jednoczesnego usuwania zanieczyszczeń gazowych poprzez ich absorpcję w rozproszonej cieczy. Z wykorzystaniem cieczy wiąże się natomiast zasadniczy problem dalszego przetwarzania i postępowania z pozostałą po procesie cieczą zanieczyszczoną zatrzymanymi w niej cząstkami i kroplami. Osobną klasę aparatów stanowią elektrofiltry suche i mokre, wykorzystujące działanie sił pola elektrostatycznego do wymuszenia kontaktu naładowanych cząstek i kropel z przeszkodą. Cechują się one wysokimi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi i niewielką elastycznością w dostosowaniu do potencjalnie zmiennych warunków procesowych [45,46].

Wad tych pozbawione są natomiast filtry tkane i włókninowe o szerokiej gamie dostępnych materiałów (metale, szkło, polimery) możliwych do spożytkowania w procesach wytwórczych, co pozwala dostosować je do danego zastosowania i nadać im unikatowe cechy. Dodatkowo w przypadku filtrów włókninowych możliwe jest uproszczenie metody wytwarzania, w porównaniu z filtrami tkanymi, co obniża ich koszt i ułatwia prowadzenie procesu w większej skali.

Podobnie metody suche i mokre można wyróżnić w odniesieniu do procesów wytwarzania filtrów włókninowych. Elektroprzędzenie (electrospinning), oparte jest o formowanie włókien poprzez wyciąganie stopionego polimeru lub włóknotwórczego roztworu polimeru z kapilary z wykorzystaniem ładunku elektrostatycznego. W przypadku tej metody, występować mogą problemy ze skalowalnością procesu, a jej wykorzystanie wiąże się z koniecznością zagospodarowania pozostałych po procesie rozpuszczalników, jeśli te są wykorzystywane. Podobny problem występuje w przypadku metod opartych o dyspersję włókien, na przykład szklanych, w roztworze, który po uformowaniu włókniny musi być usunięty, a włókna wysuszone. Natomiast metoda rozdmuchu stopionego polimeru pozbawiona jest tej wady, a dodatkowo dzięki zastosowaniu strumienia gorącego powietrza, którego wykorzystanie dodaje do procesu kolejną metodę wpływania na właściwości (głównie rozmiar) uzyskanych włókien, zyskuje ona w tym zakresie przewagę nad metodą opartą o jedynie wytłaczanie stopionego polimeru. Dodatkowo ze względu na wysoką prędkość strug wciąż częściowo plastycznego polimeru trafiającego na kolektor, co prowadzi do zderzeń i powstania trwałego połączenia pomiędzy uformowanymi włóknami, metoda rozdmuchu stopionego polimeru nie wymaga wykorzystania dodatkowych procesów mających za zadanie zapewnić strukturalną stabilność wytwarzanych włóknin [47].

Filtry wykorzystane podczas badań były to filtry włókninowe otrzymywane metodą rozdmuchu stopionego polimeru (melt-blown). Metoda ta zawdzięcza swoją popularność prostocie oraz jednocześnie stosunkowo daleko idącej możliwość kontrolowania struktury

filtrów, jak np. średniej średnicy włókien (czy też zakresu rozmiarów włókien) lub grubości samego filtra. Szczegółowy opis i schemat wytwarzania filtrów tą metodą został przedstawiony w różnych publikacjach [48–50], a idea procesu została w skrócie omówiona także w pracy A4.

3.2. Filtry włókninowe jedno- i wielowarstwowe

Cechą charakterystyczną filtrów włókninowych wytworzonych metodą rozdmuchu stopionego polimeru jest nieregularne rozmieszczenie włókien w strukturze filtra. Powstające z opuszczającego dyszę stopionego polimeru włókna mogą różnić się rozmiarami, a finalny produkt cechować się szerokim rozkładem średnic włókien. Z tego powodu często trudno jest w dokładny sposób opisać filtry włókninowe poprzez jedną wartość średnicy włókna (co byłoby użyteczne dla przewidywań z wykorzystaniem klasycznej teorii filtracji). Natomiast w przypadku materiałów tkanych, których struktura filtra jest bardziej regularna, a rozkład rozmiarów średnic jest bardziej jednorodny, opis ten jest mniej problematyczny.

Właściwości polimeru wykorzystanego do wytworzenia włókien, jak i ewentualne modyfikacje powierzchniowe włókien przekładają się na końcowe właściwości filtra. Hydrofobowość oraz chropowatość powierzchni wpływają na zdolność cieczy zatrzymanej przez filtr do przemieszczania się po powierzchni włókna i wewnątrz struktury filtra oraz na to w jaki sposób ciecz gromadzi się na włóknie. Zależnie od właściwości powierzchniowych ciecz może rozpływać się po powierzchni włókna i gromadzić w obszarach przylegających do miejsc kontaktu różnych włókien lub pozostawać nieruchoma [51].

Filtry można pogrupować ze względu na ich wewnętrzną strukturę na jednorodne, gradientowe i wielowarstwowe. Za filtr jednorodny uznaje się taką włókninę, której właściwości w różnych obszarach nie różnią się od siebie w znaczący sposób, poza niewielkimi różnicami wynikającymi z nieregularnej struktury filtra. Filtr gradientowy to taki którego właściwości zmieniają się w sposób ciągły, natomiast w filtrze wielowarstwowym zmiana taka jest nieciągła i ma charakter skokowy, co pozwala wyróżnić charakterystyczne warstwy różniące się w znaczny sposób właściwościami. Właściwością decydującą o naturze filtra może być wartość średniej średnicy włókna, gęstość upakowania lub właściwości powierzchniowe włókien. Dodatkowo kluczowym parametrem, zwłaszcza dla filtrów jednorodnych, jest również grubość takiego filtra, która ma wpływ zarówno na sprawność jak i opory przepływu przez filtr.

W rozwiązaniach praktycznych istotną rolę odgrywa także zagadnienie masy powierzchniowej, a więc masy jednostkowej powierzchni materiału (g/m^2). Łączy ona

w sobie grubość warstwy materiału oraz jego gęstość upakowania. Czyni to masę powierzchniową dobry wyznacznikiem pozwalającym na szybkie rozróżnienie włóknin w zastosowaniach praktycznych. Natomiast, gdy porównuje się próbki tego samego filtra, o takiej samej powierzchni i grubości, wygodniejszym parametrem jest sama masa filtra. Dodatkowo w zagadnieniach teoretycznego i empirycznego opisu procesu filtracji, tak jak zostanie to pokazane w dalszym rozdziale (3.4), do opisu materiału filtracyjnego powszechnie wykorzystywane są wyszczególnione wartości gęstość upakowania i grubość warstwy. Skorzystanie z parametru masy powierzchniowej może być również przydatne w przypadku badań obejmujących próbki filtrów różniące się powierzchnią.

W przypadku filtrów wielowarstwowych dla których przejście pomiędzy kolejnymi warstwami ma wyraźne granice, zwłaszcza w przypadku filtrów składanych z fizycznie oddzielnych warstw, mogą pojawić się dodatkowe efekty wynikające z nieciągłości i braku kontaktu pomiędzy włóknami, takie jak utrudnione przemieszczanie depozytów ciekłych pomiędzy warstwami. Natomiast w przypadku depozytów stałych, które mogą tworzyć przestrzennie rozbudowaną strukturę, może dochodzić do ekspansji tej struktury w obszarze pomiędzy warstwami, a także wewnątrz struktury warstwy poprzedzającej. Z takim przypadkiem możemy mieć do czynienia, kiedy sprawność filtracji warstwy poprzedzającej względem danych cząstek stałych jest wyraźnie niższa od sprawności kolejnej warstwy. Pomimo tego utrudnienia w poprawnym przewidywaniu działania filtra, taka konfiguracja filtra może być pożądana z innych względów. Jeśli celem jest osiągnięcie jak najdłuższego czasu pracy filtra, to dobranie warstw (lub gradientu) filtra w taki sposób, że na kolejnych warstwach zatrzymywane są kolejne frakcje cząstek, a obciążenie rozkładane jest równomiernie pomiędzy wszystkimi warstwami i w głębi filtra może być doskonałym rozwiązaniem. Tak zastosowana modułowość budowy to jedna z zalet filtrów wielowarstwowych, pozwalająca na zbudowanie filtra z takich warstw, które umożliwiają na optymalne przygotowanie pod dane zastosowanie.

Niezależnie od rodzaju filtra, w jego wnętrzu występować będzie obszar o największej sprawności filtracji, względem danego rodzaju cząstki lub jej rozmiaru. Pozycja tego obszaru zależeć będzie również od innych czynników, takich jak zachowanie symetryczności przestrzennej procesu, a więc identycznej sprawności w różnych punktach przekroju na danej głębokości filtra, która może być zachwiana poprzez spowodowane oddziaływaniem grawitacyjnym ociekanie cieczy we wnętrzu filtra, nieprostopadłe do kierunku przepływu umieszczenie filtra lub mechaniczne uszkodzenie struktury filtra. Pozycja tego obszaru może również zmieniać się z czasem na skutek obładowywania włókien filtra cząstkami.

W przypadku cząstek stałych, które będą tworzyć rozbudowaną przestrzennie strukturę na powierzchni włókien, mogącą z czasem podlegać ekspansji poza początkowy obrys filtra, obszar ten będzie pozostawał przy powierzchni filtra, a z czasem to ta nowopowstała struktura może charakteryzować się sprawnością przekraczającą sprawność samego filtra. Jest to zjawisko analogiczne do filtracji plackowej, występującej podczas rozdzielenia zawiesin np. z udziałem prasy filtracyjnej. Dla cząstek ciekłych natomiast, ze względu na obniżoną sprawność włókna zwilżonego cieczą, obszar najwyższej sprawności może przemieszczać się z czasem w głąb filtra. Obydwa te efekty będą występować z różną intensywnością w różnych układach, zależnie od koncentracji cząstek, sprawności filtra oraz czasu trwania filtracji. Pomimo niewielkiej zgromadzonej to tej pory wiedzy na temat tego procesu, należy się spodziewać, że w trakcie filtracji aerozoli mieszanych zawierających jednocześnie cząstki stałe i ciekłe, obydwa te efekty mogą występować równocześnie. Dodatkowo struktura cząstek stałych, może być niszczona poprzez kontakt z kroplami, a osadzanie cząstek stałych na włóknach ograniczać efekt poślizgu kropli, jeśli zdeponowane cząstki stałe pełnią niejako rolę nowych punktów zaczepienia dla kropel.

W takim skomplikowanym przypadku działanie filtra zależeć będzie silnie od dynamicznych zmian i interakcji zachodzących w danym rejonie filtra, a zwłaszcza tym rejonie, który w danej chwili jest obszarem o największej sprawności.

Poza właściwościami filtra w makroskali duży wpływ na proces filtracji mogą mieć lokalne właściwości w mikroskali, zwłaszcza w przypadku kiedy mamy do czynienia z anomalią struktury występującą w obszarze o maksymalnej sprawności. Pojedyncze włókno o odbiegającym od normy rozmiarze, może okazać się promotorem lub inhibitorem przemieszczania zdeponowanej na włóknach cieczy, jeśli znajdować się będzie ono w rejonie filtra w którym najintensywniej dochodzi do depozycji cieczy. W takim przypadku końcowe właściwości filtra podczas filtracji mogą znacznie odbiegać od przewidywań i standardowego zachowania filtra. Ryzyko wystąpienia takiej rozbieżności jest następstwem nieregularnej struktury filtra włókninowego i nieuporządkowanego umiejscowienia włókien w jego wnętrzu.

3.3. Aerozole wieloskładnikowe

Ważny wpływ na proces filtracji mają także parametry fizyczne związane z samym aerozolem, takie jak koncentracja cząstek aerozolowych, skład aerozolu, właściwości oraz rozkład rozmiaru cząstek aerozolowych. Przykładowo, im koncentracja cząstek jest wyższa, tym więcej cząstek zatrzymywanych jest przez filtr i tym szybszym zmianom ulega struktura

wewnętrzna filtra i powierzchnia włókien oraz co za tym idzie sprawność chwilowa filtra. Dokładniejszy opis tego zagadnienia znajduje się w rozdziałach 3.4 i 3.5 oraz w analizach i wnioskach wyciągniętych przy okazji poszczególnych artykułów. Natomiast kiedy mamy do czynienia z aerozolami wieloskładnikowymi to w układzie pojawiają się dodatkowe efekty wynikające z interakcji pomiędzy składnikami takiego aerozolu. Przemyślenia oraz rozważania na temat tego zagadnienia, będące podstawą do obranego kierunku badań i rozwoju modelu obliczeniowego, zebrano w poniższym fragmencie.

Tak jak już wcześniej wspomniano, efekty zachodzące wewnątrz filtra powiązane z depozycją wyłącznie cząstek stałych, wyłącznie kropel cieczy, lub jednoczesną depozycją jednych i drugich będą się od siebie różniły. Dodatkowo w przypadku jednoczesnej filtracji kropel różnych cieczy, zwłaszcza takich które różnią się właściwościami powierzchniowymi względem włókien danego filtra, w układzie uwidaczniają się następstwa interakcji pomiędzy nimi. Jeśli mamy do czynienia z kroplami np. wody oraz oleju, które różnią się wartością napięcia powierzchniowego, jedne z nich mogą w łatwiejszy sposób przemieszczać się po powierzchni włókien lub ulegać resuspensji, czyli wtórnemu porywaniu do strumienia gazu.

Kluczowym z punktu widzenia filtracji jest charakter rozkładu rozmiarów cząstek aerozolowych zawieszonych w strumieniu gazu [52]. Jeśli cząstki mają jednakowy rozmiar, lub rozkład rozmiarów jest wystarczająca wąski, zadanie dobrania optymalnego filtra, którego sprawność dla tego aerozolu jest odpowiednia, zostaje znacznie uproszczone w porównaniu z przypadkiem kiedy mierzymy się z szerokim rozkładem rozmiarów. Dodatkowo kiedy rozkład ten jest szeroki lub jak ma to miejsce w przypadku aerozoli wieloskładnikowych cząstki różnych substancji charakteryzują się różnymi rozkładami rozmiarów, zarówno dobór odpowiedniego filtra jak i teoretyczne przewidywania z wykorzystaniem modeli stają się uciążliwe [53]. Pojawia się problem odpowiedniego opisu rozkładu w modelu oraz kompromisu pomiędzy dokładnością tego odwzorowania i czasem potrzebnym na obliczenia. Ponadto część modeli może być ograniczona poprzez maksymalny dopuszczalny rozmiar cząstki oraz stosunek tego rozmiaru do rozmiaru włókna. W takim przypadku skorzystanie z uśrednionych właściwości aerozolu dla potrzeb modelu może doprowadzić do dużych rozbieżności z rzeczywistością. Jednocześnie oddzielne rozpatrywanie kilku składników, zwłaszcza z uwzględnieniem zmian zachodzących w trakcie filtracji wewnątrz filtra, staje się skomplikowanym zadaniem ze względu na interakcje pomiędzy różnymi cząstkami zdeponowanymi na filtrze.

Dodatkowo jeśli w systemie oprócz aglomeratów cząstek stałych znajdują się również krople cieczy, dochodzić może do interakcji pomiędzy nimi [54]. Interakcje te mogą mieć miejsce

zarówno w strumieniu aerozolu przed kontaktem z filtrem jak i na powierzchni włókien filtra. W przypadku interakcji zachodzących przed filtrem, objętość wolnych przestrzeni aglomeratu może być częściowo wypełniana przez ciecz z kropli, jeśli dojdzie do kontaktu między nimi, a wypadkowa gęstość efektywna takiej cząstki ulegnie zmianie. Jednocześnie zmianie może ulec kształt aglomeratu co będzie miało wpływ na jego wymiar fraktalny. Interakcje na powierzchni włókna mogą prowadzić natomiast do wspomnianych wcześniej zmian w strukturze depozytów cząstek stałych oraz mieć znaczący wpływ na zmiany zachodzące wewnątrz filtra w czasie filtracji.

Wszystkie te wspomniane efekty, mogące występować w przypadku filtracji aerozoli wieloskładnikowych, znacznie komplikują zadanie prawidłowego odzwierciedlenia rzeczywistości przez model obliczeniowy i stanowią wyzwanie na drodze do sporządzenia adekwatnego modelu obliczeniowego.

3.4. Sprawność filtracji i opory przepływu

Wpływ na przebieg procesu filtracji poza rozkładem rozmiarów cząstek aerozolowych i ich właściwościami mają również różne czynniki wynikające z budowy filtra. Związek pomiędzy nimi, a zdolnością danej włókniny filtracyjnej do efektywnego zatrzymywania cząstek aerozolowych opisuje sprawność filtracji. Jedna z popularnych metod opisu sprawności filtra, którą określić można jako klasyczną teorię filtracji, opiera się o wykorzystanie pojęcia sprawności pojedynczego włókna. Jest to sprawność z jaką włókno filtra (kolektor) zatrzymuje cząstki przemieszczające się w jego pobliżu i jest ona definiowana jako stosunek liczby cząstek zatrzymanych przez kolektor do całkowitej liczby cząstek poruszających się w jego pobliżu. Klasyczna teoria filtracji zakłada, że:

1. cząstki aerozolowe mogą być opisane jako posiadające sferyczny kształt,
2. sprawność filtra zależna jest od sprawności pojedynczego włókna i rozmiar włókna (średnica) może być opisany pojedynczą wartością,
3. sprawność pojedynczego włókna jest wypadkową sprawności poszczególnych, działających niezależnie od siebie mechanizmów filtracji,
4. każde włókno filtra niezależnie od jego pozycji we wnętrzu filtra (głębokość) charakteryzuje się taką samą sprawnością,
5. każdy kontakt cząstki z włóknem kończy się jej depozycją, nie ma możliwości odbicia cząstki od powierzchni włókna.

W przypadku włókien o cylindrycznym kształcie, sprawność filtra opisana jest zależnością uwzględniająca właściwości samego filtra i pojedynczą wartość średnicy włókna [55,56]:

$$E = 1 - \exp\left(-\frac{4 \cdot \eta \cdot \alpha \cdot Z}{(1-\alpha) \cdot \pi \cdot d_w}\right) \quad (1)$$

E - sprawność filtra (-), η - sprawność pojedynczego włókna (-), α - gęstość upakowania (-), Z - grubość filtra (m), d_w - średnica włókna (m).

Sumaryczna sprawność pojedynczego włókna jest wypadkową wartością sprawności działających niezależnie od siebie mechanizmów filtracji, które mają znaczący wpływ w danym układzie i jest dana poniższą zależnością [55]:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{in})(1 - \eta_d)(1 - \eta_i)(1 - \eta_{di}) \quad (2)$$

η_{in} - sprawność mechanizmu bezpośredniego zaczepienia (-), η_d - sprawność mechanizmu dyfuzji (-), η_i - sprawność mechanizmu bezwładności (-), η_{di} - sprawność współdziałania mechanizmów dyfuzji i bezpośredniego zaczepienia (-).

Sprawności poszczególnych mechanizmów wyznaczone są dla danego rozmiaru cząstki aerozolowej, o określonych właściwościach i dla określonej pojedynczej wartości średnicy włókna, przy założeniu stałej prędkości liniowej przepływu strumienia aerozolu przez filtr charakteryzujący się daną gęstością upakowania. W ten sposób otrzymuje się wartość sprawności frakcyjnej, a więc sprawności dla określonego rozmiaru cząstki. Wyznaczając przebieg sprawności frakcyjnych dla całego zakresu rozmiaru cząstek występujących w aerozolu i dla znanego udziału danego rozmiaru cząstek w aerozolu, obliczyć można całkowitą wypadkową sprawność filtra. Sprawności poszczególnych mechanizmów określają poniższe zależności teoretyczne:

Sprawność mechanizmu bezpośredniego zaczepienia [57]:

$$\eta_{in} = \frac{1+R}{2 \cdot Ku}\left(2 \cdot \ln(1+R) - 1 + \alpha + \left(\frac{1}{1+R}\right)^2\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) - \frac{\alpha}{2}(1+R)^2\right) \quad (3)$$

$$R = \frac{d_{cz}}{d_w} \quad (4)$$

$$Ku = \frac{4 \cdot \alpha - \alpha^2 - 3}{4} - \frac{\ln(\alpha)}{2} \quad (5)$$

R - parametr przechwycenia (-), d_{cz} - średnica cząstki (m), Ku - hydrodynamiczny współczynnik przepływu Kuwabary (-).

Sprawność mechanizmu dyfuzyjnego [40,58]:

$$\eta_d = 2{,}6\left(\frac{1-\alpha}{Ku}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot Pe^{-\frac{2}{3}} \quad (6)$$

$$Pe = \frac{u_0 \cdot d_w}{D} \quad (7)$$

$$D = \frac{k_B \cdot T \cdot C}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_{cz}} \quad (8)$$

$$C = 1 + Kn\left(1{,}142 + 0{,}558 \cdot \exp\left(-\frac{0{,}999}{Kn}\right)\right) \quad (9)$$

$$Kn = \frac{2 \cdot \lambda}{d_w} \tag{10}$$

Pe - liczba Pecleta (-), u_0 - średnia liniowa prędkość przepływu w filtrze (m/s), D - współczynnik dyfuzji (m^2/s), k_B - stała Boltzmanna (J/K), T - temperatura (K), C - współczynnik korekcyjny poślizgu Cunninghama (-), μ - lepkość płynu (Pa·s), Kn - liczba Knudsena (-), λ - średnia droga swoboda (m).

Sprawność mechanizmu bezwładnościowego [59]:

$$\eta_i = \left(\frac{Stk}{4 \cdot Ku^2}\right)\left((29{,}6 - 28 \cdot \alpha^{0{,}62}) \cdot R^2 - 27{,}5 \cdot R^{2{,}8}\right) \tag{11}$$

$$Stk = \frac{\rho_e \cdot u \cdot d_{cz}^2 \cdot C}{18 \cdot \mu \cdot d_w} \tag{12}$$

Stk - liczba Stokesa (-), ρ_e - efektywna gęstość cząstki (kg/m^3).

Sprawność współdziałania mechanizmów dyfuzji i bezpośredniego zaczepienia [60]:

$$\eta_{di} = 1{,}24\left(\frac{R^{\frac{2}{3}}}{(Ku \cdot Pe)^{0{,}5}}\right) \tag{13}$$

Poza zależnościami teoretycznymi stosowanymi w klasycznej teorii filtracji, skorzystać można również z odpowiednich zależności empirycznych i przystosować je do danego systemu i rozwiązania. Na ogół przyjmują one postać zbliżoną do zależności znanych z klasycznej teorii. Przykładowe postaci zależności empirycznych oraz ich uogólnione wersje przedstawiają poniższe wzory. Wartości współczynników A, B, C, D, E dobierane są w nich na podstawie danych eksperymentalnych uzyskanych dla danego badanego i opisywanego filtra oraz na podstawie wyznaczonych właściwości charakterystycznych badanego filtra (grubość filtra, gęstość upakowania, średnica włókien).

Mechanizm dyfuzyjny [61]:

$$\eta_{dif_e} = 0{,}84 \cdot Pe^{-0{,}43} \tag{14}$$

$$\eta_{dif_e} = A \cdot Pe^{-B} \tag{15}$$

Mechanizm bezpośredniego zaczepienia [39]:

$$\eta_{int_e} = 0{,}6\left(\frac{1-\alpha}{Ku}\right)\left(\frac{R^2}{1+R}\right) \tag{16}$$

$$\eta_{int_e} = C\left(\frac{1-\alpha}{Ku}\right)\left(\frac{R^2}{1+R}\right) \tag{17}$$

Mechanizm bezwładnościowy [62]:

$$\eta_{imp_e} = 0{,}0334 \cdot Stk^{1{,}5} \tag{18}$$

$$\eta_{imp_e} = D \cdot Stk^E \tag{19}$$

Decyzja o tym z którego opisu skorzystać zależała będzie od tego, z jakim układem mamy do czynienia. W przypadku aerozoli mieszanych, wiele z założeń klasycznej teorii nie można

uznać za spełnione, ze względów wspomnianych wcześniej, a bardziej użyteczne okazują się zależności empiryczne, które są elastyczne pod względem dostosowania do danego zastosowania, a ich użycie nie wiąże się z ograniczeniami wynikającymi z rozwiązań teoretycznych.

Z pojęciem sprawności frakcyjnej i wypadkowej sprawności wszystkich mechanizmów filtracji jest związane również zagadnienie rozmiaru cząstki o największej zdolności do penetracji filtra (zatrzymywanej przez filtr z najmniejszą sprawnością).

Istnienie tego rozmiaru wynika z faktu, że opisane wyżej mechanizmy filtracji odgrywają istotną rolę dla cząstek o różnych średnicach. Mechanizm dyfuzyjny odpowiada za zatrzymywanie najmniejszych cząstek, a jego sprawność szybko maleje wraz ze wzrostem średnicy cząstki. Mechanizmy bezwładnościowy i bezpośredniego zaczepienia odpowiadają za zatrzymywanie cząstek o średnicach zbliżonych lub przekraczających 1 μm, a ich sprawność rośnie wraz ze wzrostem średnicy cząstki. Mają one natomiast mniejszy wpływ na filtrację cząstek submikronowych. Dla cząstek o rozmiarach 100-300 nm każdy z opisanych mechanizmów charakteryzuje się stosunkowo niewielką sprawnością, dlatego też dla tego zakresu średnic obserwuje się występowanie minimum całkowitej sprawności filtra.

Na ogół wzrost gęstości upakowania filtra, przy zachowaniu pozostałych parametrów niezmiennymi, prowadzi do wzrostu sprawności frakcyjnej dla całego zakresu rozmiarów cząstek niezależnie od ich rodzaju. Wzrost średnicy włókna prowadzi do spadku sprawności frakcyjnej w całym zakresie. Wraz ze wzrostem prędkości liniowej sprawność mechanizmu dyfuzyjnego maleje, a mechanizmu bezwładnościowego rośnie, zarówno w zależnościach teoretycznych jak i empirycznych. Mechanizm dyfuzyjny charakteryzuje się wysoką sprawnością usuwania cząstek odpowiednio małych (o średnicy do kilkuset nanometrów), a mechanizm bezwładnościowy wysoką sprawnością usuwania cząstek odpowiednio dużych (o odpowiedniej ciężkości i bezwładności – zwykle o średnicy rzędu jednego mikrometra i większej). Natomiast kiedy zmiana prędkości linowej wynika ze zmian struktury wewnętrznej filtra, na skutek jego obładowania, to efekt zmiany prędkości sprzężony jest ze zmianami zarówno gęstości upakowania filtra jak i rozmiaru włókien tego filtra. W takim przypadku, który ma najczęściej miejsce w rzeczywistych zastosowaniach, wypadkowa zmiana sprawności usuwania poszczególnej frakcji cząstek (cząstek o danym zakresie rozmiarów) ma bardziej skomplikowany charakter i zachodzić będzie inaczej zależnie od danego przypadku. Z tego względu model, który ma posłużyć do przewidywania pracy filtra musi w prawidłowy sposób opisywać przebieg sprawności frakcyjnej filtra, uwzględniać występowanie minimum sprawności oraz ich zmiany w czasie. Jak już wcześniej

wspomniano, zmiany te obejmują zmianę średnicy włókna lub wielu włókien niezależnie od siebie, jeśli filtr opisywany jest rozkładem rozmiarów włókien zamiast pojedynczą wartością, gęstość upakowania filtra oraz zależną od niej prędkość liniową przepływu aerozolu przez filtr.

Doświadczenia zebrane w trakcie prowadzonych przeze mnie eksperymentów zaowocowały zaproponowanym, w prezentowanym cyklu recenzowanych prac, rozwinięciem opisanego powyżej modelu. W celu uwzględnienia wymienionych zmian zachodzących w czasie, do modelu klasycznej teorii filtracji, wprowadzono poniższe wyrażenia zależne od czasu trwania procesu filtracji poprzez objętość depozytów zatrzymanych na filtrze.

Zmiana gęstości upakowania filtra:

$$\alpha = \frac{V_w + V_d}{V_c} \tag{20}$$

Zmiana liniowej prędkości przepływu przez filtr:

$$u = \frac{u_0}{1-\alpha} \tag{21}$$

Zmiana średnicy włókien filtra:

$$d_w = d_{wp}\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^{0,5} \tag{22}$$

α - gęstość upakowania (-), V_w - objętość włókien (m^3), V_d - objętość depozytów (m^3), V_c - całkowita objętość czystego filtra (m^3), u - średnia liniowa prędkość przepływu w filtrze z depozytami (m/s), u_0 - średnia liniowa prędkość przepływu w czystym filtrze (m/s), d_w - średnica włókna z depozytami (m), d_{wp} - średnica czystego włókna (m), α_0 - gęstość upakowania czystego filtra (-).

Korzystając z powyższych zależności dla danego kroku czasowego możliwe jest wyznaczenie sprawności frakcyjnej filtra, a przy znajomości składu, koncentracji i udziału poszczególnej frakcji cząstek w aerozolu, również liczby i masy depozytów zatrzymanych na filtrze. Po wyznaczeniu objętości depozytów można następnie obliczyć zmianę średnicy włókien oraz gęstości upakowania i prędkości liniowej. W ten sposób możliwym staje się uwzględnienie wpływu depozytów na zmianę właściwości filtra w czasie trwania procesu filtracji.

Dodatkowo znając sprawność frakcyjną filtra, dla znanego rozkładu rozmiarów cząstek aerozolu, możliwe jest wyznaczenie frakcji cząstek zatrzymanych na filtrze oraz średniego rozmiaru cząstki pozostałej za filtrem. Przeprowadzając taką analizę z uwzględnieniem zmian zachodzących w czasie filtracji możliwym staje się przewidywanie zachowania pojedynczej warstwy filtracyjnej. Umożliwia to dobranie odpowiednich kolejnych warstw filtra, których

współdziałanie prowadzi do efektywnego usunięcia cząstek ze strumienia gazu i jednocześnie nie obciąża nadmiernie pojedynczej warstwy ładunkiem depozytów.

Osobnym zagadnieniem ściśle powiązanym ze zmianami zachodzącymi we wnętrzu filtra jest tematyka oporów przepływu strumienia aerozolu przez filtr. Na skutek depozycji cząstek aerozolowych na powierzchni włókien dochodzi do wzrostu ich efektywnego rozmiaru wynikającego z objętości zatrzymanych depozytów. Prowadzi to do zmniejszenia pola przekroju dostępnego dla przepływu strumienia aerozolu. Skutkiem takich zmian zachodzących w strukturze filtra jest wzrost oporów przepływu. Charakter i szybkość tych zmian zależeć będzie od szybkości osadzania i rodzaju depozytów [63–65], a także właściwości filtra (gęstości upakowania filtra, rozmiaru włókien, zwilżalności włókien przez ciecz [31,37,66,67]). W przypadku depozytów stałych, które często mają tendencję do formowania na powierzchni filtra przestrzennie rozbudowanej hierarchicznej struktury to ona, podobnie jak w przypadku zmian sprawności filtracji, może po odpowiednio długim czasie trwania filtracji przejąć odpowiedzialność za wzrost oporów przepływu przez filtr [36]. Natomiast jeśli sprawność filtra jest niska, lub ze względu na charakterystykę aerozolu, depozyty rozłożone są równomiernie w całej jego objętości, obserwowane zmiany sprawności oraz oporów przepływu będą mniej wyraźne. Podobny charakter zmian można czasami zaobserwować w przypadku filtracji aerozolu zawierającego krople cieczy, która ma możliwość swobodnego przemieszczania się po powierzchni włókien filtra. Powodowane przepływem strumienia aerozolu niezaburzone przemieszczanie się depozytów ciekłych do obszarów powodujących najmniejszy opór przepływu (np. obszary martwe dla przepływu w filtrze), albo na część lub stronę włókna, która nie jest obmywana strumieniem i nie ma wpływu na efektywny rozmiar włókna, skutkować będzie niewielkimi lub czasowym brakiem zmian w oporze przepływu przez filtr, aż wyczerpaniu ulegnie zdolność cieczy i filtra do minimalizacji wpływu nowo zdeponowanej cieczy na zmiany oporu przepływu. Natomiast w przypadku filtracji aerozolu o wysokiej koncentracji kropel zawieszonych w strumieniu gazu lub filtracji aerozolu zawierającego krople o właściwościach powierzchniowych uniemożliwiających lub utrudniających ich swobodne przemieszczanie się po powierzchni włókien filtra, efekt wymuszonego przemieszczania zdeponowanej w strukturze filtra cieczy może nie być wystarczający, aby pokonać efekty związane z zatrzymaniem nowych depozytów ciekłych. W filtrze nie utworzy się stan równowagi dynamicznej, a skutkiem tego będzie szybki wzrost oporów przepływu. Główna różnica pomiędzy cieczą mogącą przemieszczać się po powierzchni włókna i cieczą, której przemieszczanie się jest utrudnione

wynika ze zwilżalności włókna przez daną ciecz. W przypadku włókien polimerowych na przykład polipropylenowych, które były wykorzystane w tej pracy, będą one wykazywały różną zdolność do bycia zwilżalnymi przez wodę i olej. Dlatego właśnie aerozolami wykorzystanymi w badaniach był aerozol kropel wody i aerozol kropel oleju. Dodatkowymi efektami które mogą pomóc zahamować wzrost oporów jest efekty wtórnego porywania depozytów z powierzchni włókien (resuspensja kropel) oraz ociekanie cieczy zebranej w strukturze filtra na skutek oddziaływania grawitacyjnego lub wymuszone przepływem strumienia aerozolu, które również będą zależne od właściwości powierzchniowych filtra i filtrowanych kropel aerozolu.

Zmiany spadku ciśnienia na filtrze związane z przepływem strumienia gazu opisać można z wykorzystaniem różnych zależności, które uwzględniają najczęściej właściwości filtra i aerozolu. Zależności takie pozwalają wyznaczyć wartość spadku ciśnienia dla danego stanu filtra w danej chwili czasowej. Przykładowa tego typu zależność (Równanie 23), która stała się podstawą do dalszych modyfikacji wykorzystanych w tej pracy, została uzyskana na podstawie danych doświadczalnych przez Mead-Hunter i in. [31]. Uogólnioną wersję tej zależności, w której eksperymentalnie dobrane wartości współczynników zostały zastąpione przez ogólną postać współczynników przedstawia równanie 24.

$$P = 1{,}5842 \cdot \mu \cdot u \cdot Z \cdot \frac{\alpha^{1,2271}}{d^{2,4434}} \tag{23}$$

$$P = F \cdot \mu \cdot u \cdot Z \cdot \frac{\alpha^{G}}{d^{H}} \tag{24}$$

P – spadek ciśnienia (Pa), μ – lepkość płynu (Pa·s), u – średnia liniowa prędkość przepływu w filtrze (m/s), Z – grubość filtra (m), α – gęstość upakowania (-), d – średnica włókna (m).

Idea wykorzystania uogólnionej postaci zależności opiera się na dobraniu odpowiednich wartości współczynników F, G, H, pozwalających na uzyskanie obliczonej wartości spadku ciśnienia na filtrze zgodnej z wartością doświadczalną otrzymaną na drodze pomiaru eksperymentalnego. Współczynniki dobierane są dla znanych i zmierzonych wartości parametrów opisujących badany filtr - gęstość upakowania, grubość filtra i średnica włókna oraz dla znanej prędkości liniowej przepływu przez filtr oraz lepkości płynu. Zmiany spadku ciśnienia na filtrze w czasie trwania procesu filtracji uwzględniane są poprzez zmiany właściwości filtra - gęstości upakowania i średnicy włókna oraz poprzez wynikającą ze zmiany gęstości upakowania zmianę prędkości przepływu przez filtr. Z tego względu, zarówno model do przewidywania sprawności i zmian sprawności oraz model do przewidywania oporów przepływu i zmian oporów, powiązane są ze sobą poprzez masę i objętość depozytów zatrzymanych na filtrze w danej chwili czasowej.

3.5. Schemat obliczeń

Poniższy schemat obliczeń, którego algorytm został zobrazowany na Rys. 1, opisany jest w oparciu o najnowszy i wykorzystany w A4 algorytm wyznaczania sprawności filtra oraz oporów przepływu przez filtr. Wcześniejsze prace zawierają ideowo podobne, lecz mniej kompletne i uwzględniające mniej efektów modele, których założenia i koncepcja wyjaśniona jest przy okazji poszczególnych prac (A1-A3). W toku prowadzonych eksperymentów i analiz, sporządzone wcześniej modele zostały poprawione i udoskonalone, co zaowocowało modelem wykorzystanym w A4.

W pierwszym etapie wyznaczono właściwości filtra - gęstości upakowania, grubości warstwy filtracyjnej oraz rozkład rozmiarów włókien filtra. Następnie na podstawie koncentracji danego zakresu rozmiarów cząstek aerozolowych zmierzonej za filtrem oraz koncentracji zmierzonej w tym samym miejscu układu, ale bez filtra obecnego w adapterze obliczono początkową sprawność frakcyjną filtra względem cząstek o danym rozmiarze. Na tej podstawie, w zależnościach empirycznych (Równania 15, 17, 19), opisujących sprawność poszczególnych mechanizmów filtracji, dobrano odpowiednie wartości współczynników, pozwalające na uzyskanie obliczonej sprawności frakcyjnej odpowiadającej jak najlepiej wartości zmierzonej. Dopasowanie współczynników przeprowadzono wykorzystując do tego metodę najmniejszych kwadratów. Na tym etapie obliczona sprawność filtra (Równanie 1) była składową sprawności poszczególnych frakcji włókien, a każda frakcja odpowiadała za równy udział w całości rozpatrywanych włókien. Natomiast jej udział w wypadkowej sprawności filtra był zależny i proporcjonalny do sprawności danego rozpatrywanego rozmiaru włókien. Włókna o mniejszych rozmiarach i większej sprawności odpowiadały za większą część sprawności całego filtra, pomimo identycznego udziału liczbowego w całym rozkładzie rozmiarów włókien. Dodatkowo w obliczeniach sprawności frakcyjnej uwzględniano gęstość efektywną danego rozmiaru cząstek aerozolowych, a w przypadku aerozolu mieszanego oddzielnie rozpatrywano właściwości poszczególnych składników aerozolu wieloskładnikowego.

W drugim etapie na podstawie zmierzonego wcześniej rozkładu rozmiarów i koncentracji cząstek aerozolowych, dla znanego przepływu strumienia aerozolu i założonego kroku czasowego (wynoszącego jedną sekundę), wyznaczono potencjalną maksymalną liczbę cząstek aerozolowych, które mogłyby zostać zatrzymane przez filtr w danym okresie trwania procesu filtracji, równym przyjętej wartości kroku czasowego.

W trzecim etapie dla ustalonej wcześniej sprawności frakcyjnej filtra obliczono liczbę cząstek aerozolowych zatrzymanych na danej frakcji rozmiarów włókien. Następnie na podstawie

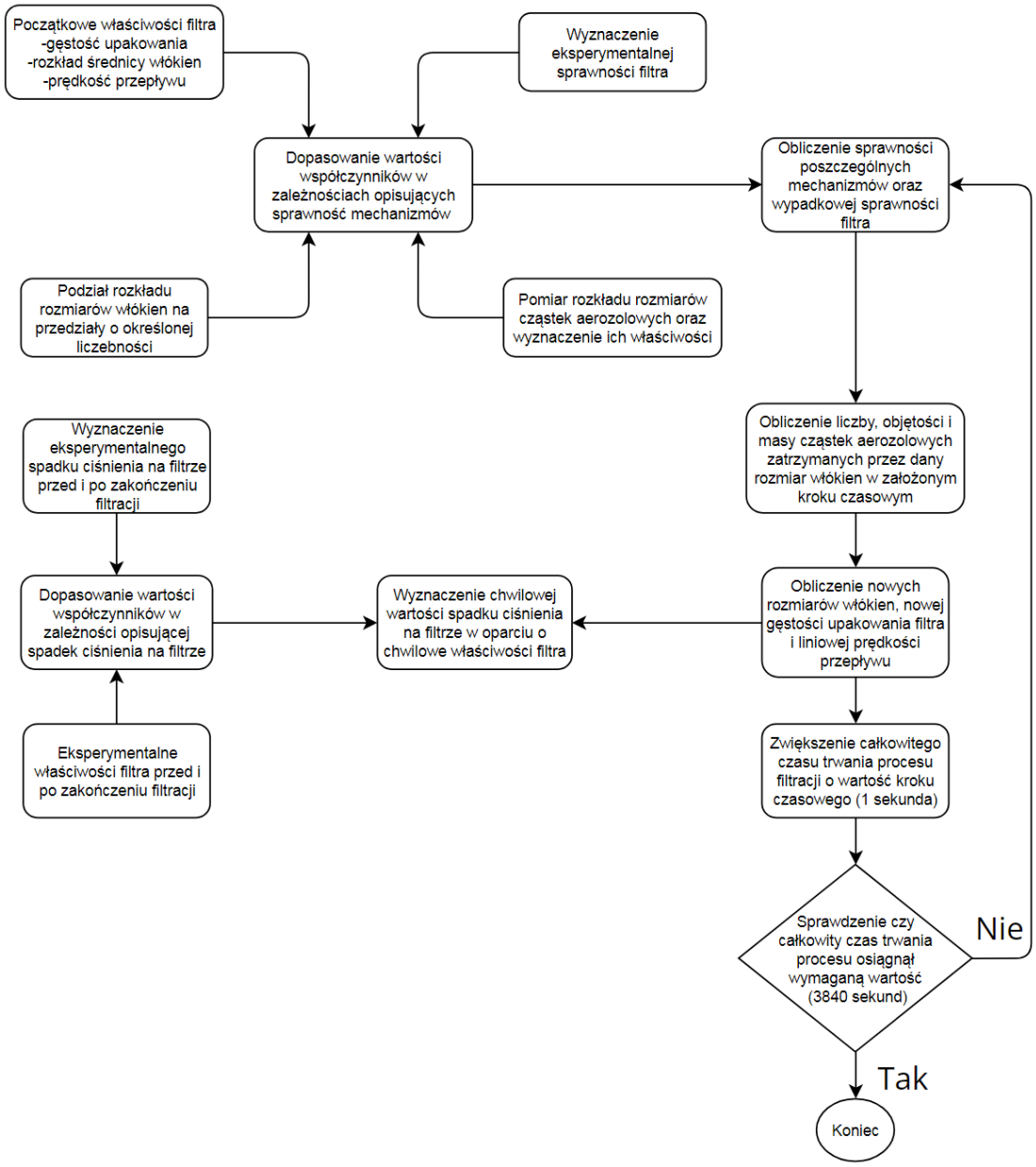
założonej gęstości efektywnej dla każdego rozmiaru cząstek wyznaczono ich objętość oraz masę zatrzymaną na filtrze i na poszczególnej frakcji włókien. Objętość zatrzymanych depozytów była następnie przeliczana na zmianę gęstości upakowania (Równanie 20) filtra, a nowa wartość gęstości upakowania była wykorzystana do wyznaczenia nowej liniowej prędkości przepływu przez filtr (Równanie 21). Jednocześnie objętość depozytów zatrzymanych przez daną frakcję włókien przeliczana była na zmianę średnicy danej frakcji włókien (Równanie 22). Podobnie jak poprzednio, włókna o większej sprawności zatrzymywały więcej depozytów i ich rozmiar zmieniał się szybciej w porównaniu z innymi. Dlatego ważne w obliczeniach było rozpatrywanie każdego rozmiaru włókien niezależnie od siebie. W tym celu w modelu wprowadzono koncepcję efektywnej długości włókna o danym rozmiarze, która opiera się o założenie, że każda frakcja włókien o danym rozmiarze jest powiązana z początkową gęstością upakowania filtra poprzez objętość włókna. Objętość ta wynika natomiast z jego średnicy, przy założeniu cylindrycznego kształtu włókien, całkowitej długości włókna i udział danego rozmiaru w całym rozkładzie rozmiarów włókien.

Następnie dla nowych rozmiarów włókien, nowej gęstości upakowania oraz prędkości liniowej przepływu przez filtr oraz niezmiennych wartości współczynników w zależnościach na sprawność poszczególnych mechanizmów, wyznaczano nowe sprawności mechanizmów filtracji, wypadkową sprawność wszystkich mechanizmów oraz całkowitą sprawność filtra. Dla nowo uzyskanych wartości sprawności frakcyjnych filtra wyznaczano następnie liczbę cząstek aerozolowych zatrzymanych przez filtr w następnym kroku czasowym. Całość obliczeń powtarzano tyle razy, że przy założonym kroku czasowym (jedna sekunda), całkowity rozpatrywany czas trwania procesu filtracji osiągnął pożądaną wartość wynoszącą 3840 sekund (jest to wartość odpowiadająca czasowi trwania pojedynczego pomiaru eksperymentalnego).

Równocześnie na podstawie zmierzonego początkowego spadku ciśnienia na filtrze oraz końcowego spadku ciśnienia, a także wyznaczonych dla tych punktów czasowych wartości parametrów filtra - gęstości upakowania, średnicy włókien (z uwzględnieniem udziału poszczególnej frakcji), prędkości przepływu, dobierano wartości współczynników w równaniu opisującym spadek ciśnienia (Równanie 24). Wartości te były dobierane tak, aby zminimalizować różnicę pomiędzy wartościami zmierzonymi i obliczonymi, korzystając z metody najmniejszych kwadratów. Zmianę obliczonego spadku ciśnienia w czasie trwania procesu filtracji oraz przebieg tej zmiany dla każdego kroku czasowego wyznaczano równolegle w oparciu o zmiany parametrów filtra, które były wyznaczone z wykorzystaniem opisanego wcześniej algorytmu przewidywania zmian sprawności filtra.

W przypadku obydwu modeli, sprawności i spadku ciśnienia, aktywne podczas obliczeń były ograniczenia maksymalnej dopuszczalnej zmiany rozmiaru każdej frakcji włókien (25% początkowego rozmiaru w przypadku A4) oraz objętości depozytów mającej efektywny wpływ na zmianę gęstości upakowania filtra (15% w przypadku A4).

Prawidłowość działania modelu obliczeniowego weryfikowana była bezpośrednio poprzez porównanie wyników doświadczalnych z wynikami obliczeń. Dokładna metoda weryfikacji różniła się pomiędzy poszczególnymi artykułami w zależności od etapu rozwoju modelu. W przypadku pierwszego artykułu porównywano zmianę sprawności filtra w czasie trwania procesu filtracji (A1 Fig. 3). W drugim artykule porównano sprawność początkową filtrów jednowarstwowych (A2 Table 3) i filtrów wielowarstwowych (A2 Table 4) oraz zmianę masy filtra po zakończeniu trwania procesu filtracji (A2 Table 5). W artykule trzecim dokonano porównania średniego początkowego rozmiaru cząstki za filtrem (A3 Fig. 5b) oraz ewolucję w czasie tego rozmiaru (A3 Fig. 6-10). W ostatnim artykule z serii, ponownie porównano całkowitą zmianę masy filtra (A4 Table 4) oraz zmianę w czasie oporów przepływu przez filtr (A4 Fig. 12).



Rys. 1. Ogólny schemat algorytmu wykorzystanego do przeprowadzonych w A4 obliczeń zmian sprawności filtra oraz zmian spadku ciśnienia na filtrze

4. Uzupełnienie przedstawionej w artykułach metodyki badawczej

Poniższa część pracy zawiera nowe informacje dotyczące metodyki prowadzonych badań, która częściowo przedstawiona została w odpowiednich rozdziałach artykułów stanowiących podstawę tej pracy. Natomiast niektóre elementy metodyki nie znalazły się w nich ze względu na ograniczenia tematyczne artykułów oraz wymagania edytorskie. Nie jest to kompleksowe przedstawienie nowego sposobu prowadzenia badań, które mogłoby stać się podstawą unormowanego nowatorskiego procesu badawczego, a jedynie uzupełnienie i komentarz do informacji zawartych już w artykułach. W kolejnych podrozdziałach przedstawione zostały: sposób modyfikacji stanowiska pomiarowego, tak aby możliwe było prowadzenie badań z wykorzystaniem aerozoli wieloskładnikowych; wpływ izokinetyczności poboru próbki aerozolu na prawidłowość opisu jego koncentracji; sposób łączenia strumieni aerozoli pochodzących z różnych generatorów oraz czas przebywania cząstek aerozolowych w układzie; dobór parametrów pozwalających na wyznaczenie efektywnej gęstości aglomeratów cząstek stałych; konieczność i metoda prawidłowego opisu rozkładu rozmiarów włókien filtra oraz cząstek aerozolowych w modelu obliczeniowym; wpływ wartości kroku czasowego na otrzymane modelem obliczeniowym wyniki; komentarz odnośnie powtarzalności wyników i analizy statystycznej.

4.1. Stanowisko pomiarowe

Na Rys. 2 przedstawiono schemat stanowiska badawczego wykorzystanego do przeprowadzenia pomiarów sprawności oraz oporów przepływu przez badane próbki filtrów podczas filtracji różnych aerozoli jedno- i wieloskładnikowych. Pierwotna postać stanowiska powstała w oparciu o normę ISO 21083 w wersji do badania materiałów włókninowych podczas obładowywania aerozolem o polidyspersyjnym rozkładzie wielkości cząstek [68,69]. Norma ta nie narzuca ograniczeń w odniesieniu do minimalnej skuteczności zatrzymywania cząstek aerozolowych przez badany materiał filtracyjny. Ma to kluczowe znaczenie w przypadku badań aerozoli wieloskładnikowych, składających się z aerozoli różnych cząstek, mogących różnić się znacznie sprawnością usuwania przez filtr.

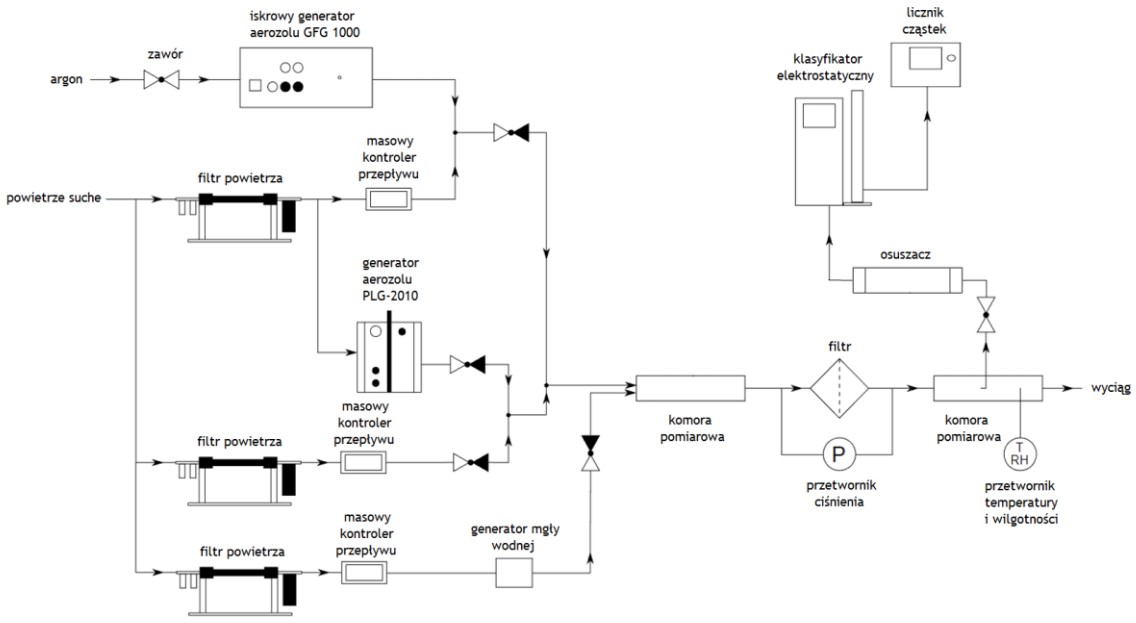
W celu dostosowania tego stanowiska do badań aerozoli wieloskładnikowych do części znajdującej się przed komorą pomiarową dodano odpowiednie generatory cząstek aerozolowych oraz połączenia przewodów, umożliwiające łączenie strumieni z różnych, działających niezależnie od siebie, generatorów. Sposób łączenia strumieni opisano w rozdziale 4.3. Aerozol cząstek stałych generowany był w generatorze iskrowym GFG 1000 [70] z wykorzystaniem elektrod grafitowych. Aerozol kropel oleju generowany był

w generatorze PLG-2010 wykorzystującym dyszę Laskina [71,72] przy użyciu oleju - sebacynianu bis(2-etyloheksylu) (DEHS). Aerozol kropel wody generowany był w ultradźwiękowym generatorze mgły wodnej [73,74]. Dodatkowe informacje na temat wykorzystanych aerozoli znajdują się w rozdziale 4.6. Ponadto, pierwotnie znajdujący się przed komorą pomiarową osuszacz, przeniesiono do części układu łączącej komorę pomiarową z układem pomiaru koncentracji cząstek aerozolowych. Zrobiono to w celu umożliwienia pomiaru koncentracji cząstek w przypadku badań aerozolu zawierającego krople wody (podyktowana wymaganiami sprzętowymi ochrona klasyfikatora i licznika przed wysoką koncentracją kropel wody). Jednakże w pracach (A2-A4) całkowicie zrezygnowano z wykorzystania osuszacza, ponieważ wpływał on negatywnie na uzyskane wyniki koncentracji cząstek aerozolowych, o czym więcej przy okazji omówienia pierwszego artykułu (rozdział 5.1).

W celu umożliwienia ciągłego śledzenia zmian sprawności filtra, podczas obładowywania cząstkami aerozolowymi, zrezygnowano z pomiaru koncentracji cząstek aerozolowych przed filtrem. Metoda przedstawiona w normie ISO 21083, zaleca przełączanie się pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi w trakcie trwania pomiaru, tak aby możliwy był jednoczesny pomiar koncentracji zarówno przed jak i za filtrem. W oparciu o znajomość tych koncentracji możliwe jest wyznaczenie sprawności filtra. Jednakże takie prowadzenie pomiarów, ze względu na czas wymagany przez układ pomiarowy koncentracji na zbadanie szerokiego zakresu rozmiarów cząstek aerozolowych (od 30 nm do 750 nm) oraz czas potrzebny na ustabilizowanie się wskazań licznika po zmianie punktu pomiarowego (czas przemywania przewodów klasyfikatora i licznika), prowadził do długiego okresu w którym rzeczywista koncentracja cząstek aerozolowych nie była możliwa do zmierzenia. Z tych powodów, całkowity czas pomiędzy prawidłowymi pomiarami w tym samym punkcie wynosiłby około 600 sekund, przy czasie trwania pomiaru równym 64 sekundy i całkowitym czasie trwania obładowywania danej próbki filtra równym 3840 sekund. Z tego względu, aby poprawić rozdzielczość czasową i dla każdej badanej próbki dokładniej oddać zmiany sprawności w czasie trwania pomiaru, konieczne było wyznaczanie sprawności filtracji w oparciu o porównanie koncentracji cząstek aerozolowych, zmierzonej zawsze w tym samym punkcie pomiaru (za filtrem). Porównywano, zmieniającą się w czasie, koncentrację zmierzoną z umieszczonym w komorze pomiarowej filtrem oraz stałą koncentrację bez niego.

Ostatecznie, pomiar sprawności filtra polegał na pomiarze stałej koncentracji cząstek aerozolowych w punkcie pomiarowym za filtrem, kiedy filtr nie był umieszczony w komorze (po ustabilizowaniu się działania generatorów) i porównaniu jej ze zmierzną, zmienną

w czasie (zależną od zmiennej w czasie sprawności filtra), koncentracją w tym samym punkcie, kiedy filtr był umieszczony w komorze pomiarowej.



Rys. 2. Ogólny schemat stanowiska pomiarowego

4.2. Izokinetyczność

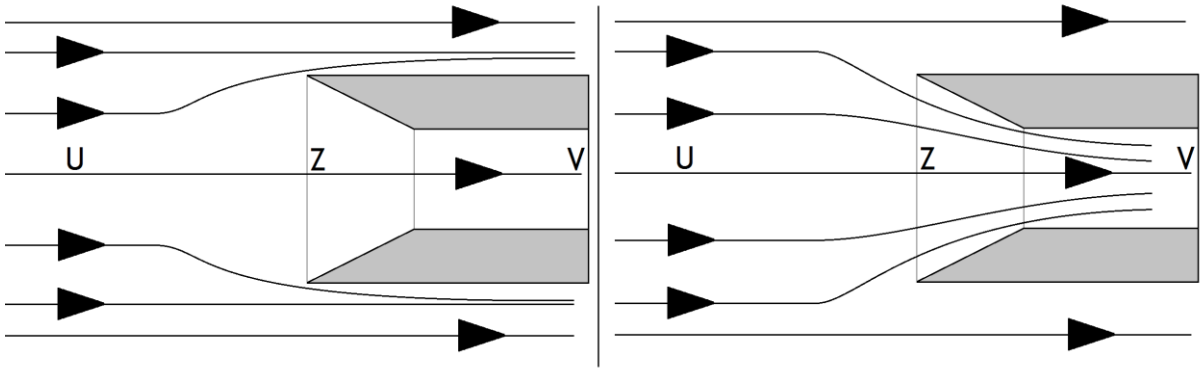
Istotną cechą, wykorzystanego w badaniach układu pomiarowego, było zachowanie izokinetyczności poboru próbki strumienia aerozolu przypływającego w układzie. Sprawność frakcyjna filtracji dla danej włókniny wyznaczana była na podstawie porównania koncentracji cząstek lub kropel o danym rozmiarze z ich koncentracją w tym samym punkcie układu pomiarowego, ale bez filtra umieszczonego na drodze aerozolu. Na podstawie uzyskanych sprawności frakcyjnych i na podstawie znanych koncentracji oraz udziału poszczególnych frakcji rozmiarów cząstek aerozolowych w całkowitej koncentracji aerozolu, możliwe było wyznaczenie całkowitej wypadkowej sprawności filtra względem danego aerozolu. Ze względu na oparcie wyznaczenia sprawności filtracji o pomiary koncentracji, kluczowym jest jak najdokładniejsze odzwierciedlenie przez pomiar rzeczywistej koncentracji cząstek aerozolowych przepływających we wnętrzu komory pomiarowej. Jednocześnie zachodzące w czasie, zmiany struktury filtra wynikają z depozycji na włóknach cząstek aerozolowych, dlatego dokładna znajomość koncentracji poszczególnych frakcji cząstek jest kluczowa w celu prawidłowego opisu i przewidywania zachodzących zmian. Dlatego właśnie, poprawny pobór próbki musi odbywać się z zachowaniem warunków izokinetyczności,

a więc równości prędkości we wnętrzu komory pomiarowej oraz na wlocie do sondy pomiarowej prowadzącej do klasyfikatora oraz licznika cząstek [75–77].

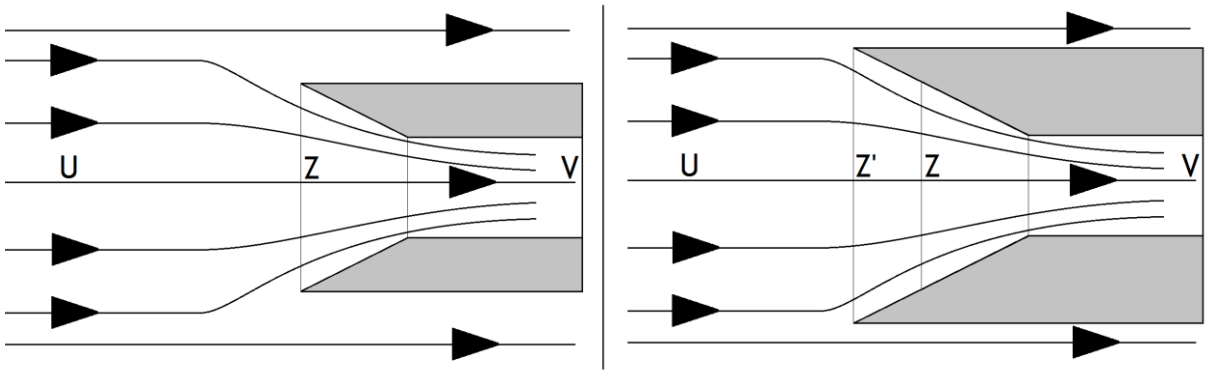
Strumień przepływający przez układ służący do pomiaru koncentracji cząstek aerozolowych, a więc i prędkość we wnętrzu sondy i na wlocie do niej, wynika z wymagań układu pomiarowego. Są one ściśle powiązane z tym, dla jakiego zakresu rozmiarów cząstek aerozolowych oraz z jaką dokładnością i rozdzielczością czasową będziemy obserwować i mierzyć ich koncentrację. Jednocześnie prędkość przepływu we wnętrzu komory pomiarowej, w której umieszczony jest badany filtr oraz prędkość przepływu strumienia aerozolu przez badany filtr, zależą od tego dla jakiej wartości prędkości liniowej przepływu przez filtr prowadzić będziemy badania. Z tego powodu może dojść do pojawienia się konfliktu pomiędzy podyktowaną przez wymagania układu pomiarowego prędkością we wnętrzu sondy, a prędkością przepływu w komorze pomiarowej dla której prowadzić chcemy obserwacje. W przypadku gdy prędkość przepływu we wnętrzu komory U jest wyższa niż prędkość na wlocie do sondy pomiarowej Z, która to wynika z prędkości we wnętrzu sondy V (Rys. 3), strumień aerozolu będzie częściowo omijał sondę pomiarową, a cząstki i krople o odpowiednio wysokim rozmiarze, ze względu na swoją bezwładność, mogą nie nadążać za zmianami linii prądu i trafiać do wnętrza sondy. Prowadziłoby to do zawyżenia wskazań koncentracji cząstek i kropel o największych rozmiarach oraz do przesunięcia zmierzonego rozkładu rozmiarów w stronę rozmiarów o większych wartościach. Natomiast w przypadku odwrotnym, kiedy prędkość w komorze jest niższa od tej na wlocie to sondy pomiarowej, cząstki i krople o odpowiednio dużych rozmiarach nie nadążając za zmianami kierunku przepływu strumienia gazu mogą omijać wlot do sondy pomiarowej, a wskazania koncentracji dla nich mogą być zaniżone [78].

Zachodziłaby wtedy konieczność odpowiedniego przeliczenia uzyskanych wyników pomiarowych koncentracji, co mogłoby być problematyczne lub wręcz niemożliwe. Dlatego ważne jest dobranie sondy pomiarowej o polu przekroju wlotu, odpowiednim dla danej prędkości przepływu we wnętrzu komory (prędkość we wnętrzu komory i sondy równa była 0,2 m/s we wszystkich pomiarach) (Rys. 4). Zachowanie warunków izokinetyczności pozwala zapewnić, że zmierzona koncentracja cząstek i kropel jest bezpośrednim odwzorowaniem stanu rzeczywistego we wnętrzu komory pomiarowej [79,80]. Oczywiście poza dobraniem odpowiedniego rozmiaru sondy (średnica wewnętrzna wlotu do sondy wynosiła 5,6 mm dla, narzuconego przez układ pomiarowy koncentracji, przepływu przez sondę wynoszącego 0,3 dm^3/min), koniecznym jest również zapewnienie stałego strumienia przepływu w komorze pomiarowej, a co za tym idzie w całym układzie przed sondą. Z tego względu należy

kontrolować strumienie przepływające przez generatory oraz strumień powietrza rozcieńczającego. W wykorzystanym w badaniach układzie pomiarowym, stałość strumieni zapewniona była poprzez kontrolery masowe przepływu gazu (Rys. 2) sterujące przepływem powietrza rozcieńczającego oraz pomiar strumieni opuszczających generatory cząstek aerozolowych realizowany przy użyciu przepływomierza błonkowego (Gilibrator - firmy Sensidyne). Po ustaleniu stałych przepływów, strumienie pozostawały niezmienione aż do czasu zakończenia pomiaru.



Rys. 3. Przebieg linii prądu w przypadku, gdy prędkość przepływu w komorze pomiarowej jest większa (po lewej) i mniejsza (po prawej) od tej we wnętrzu sondy



Rys. 4. Ograniczenie wpływu różnicy w prędkościach poprzez dobranie odpowiedniego rozmiaru sondy

4.3. Czas przebywania oraz łączenie strumieni w przypadku aerozoli mieszanych

Aerozole mieszane zostały uzyskane poprzez połączenie biegnących równolegle strumieni aerozoli jednoskładnikowych wychodzących z generatorów. Schemat zastosowanego połączenia przedstawia Rys. 5.

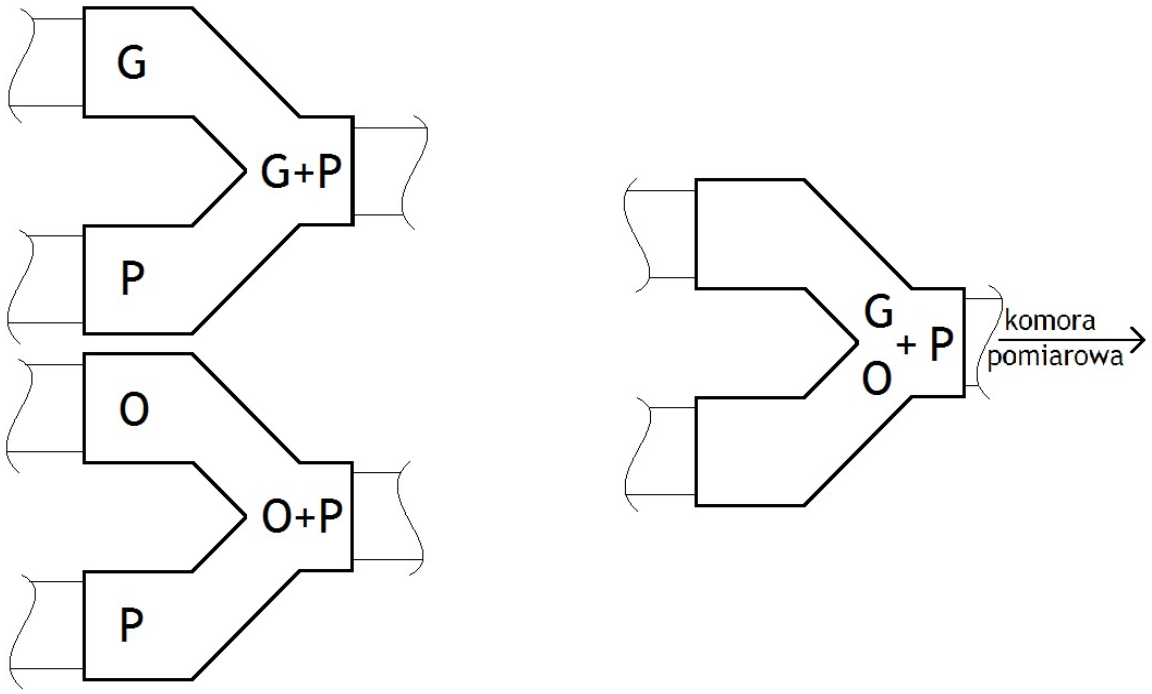
W przypadku aerozolu cząstek stałych, pochodzące z generatora iskrowego [70] grafitowe cząstki stałe zawieszone były w strumieniu, wymaganego przez generator, gazu obojętnego - argonu. Strumień argonu był stały we wszystkich pomiarach i wynosił 5 dm^3/min.

Generowane, w generatorze działającym w oparciu o wykorzystanie dyszy Laskina [71,72], krople oleju zawieszone były w strumieniu powietrza zasilającego generator. Strumień powietrza przepływającego przez generator zmieniał się w zależności od potrzeb i zależny był od ustawień generatora, a więc od tego jaką koncentrację aerozolu wykorzystywano w badaniach. Każdy ze strumieni aerozolu jednoskładnikowego, przed trafieniem do komory pomiarowej, łączony był w pierwszym stopniu ze strumieniem powietrza rozcieńczającego. Wartość strumienia powietrza rozcieńczającego łączonego z każdym strumieniem aerozolu jednoskładnikowego dobierana była tak, aby w następnym stopniu odbywało się łączenie strumieni o równych sobie wartościach (wynoszących 30 dm^3/min). Do komory pomiarowej trafiał zawsze sumaryczny strumień o stałej w czasie trwania pomiaru wartości (wynoszący 60 dm^3/min), co pozwalało zapewnić stałą liniową prędkość przepływu aerozolu w układzie (wynoszącą 0,2 m/s w miejscu kontaktu z filtrem) oraz izokinetyczność poboru próbki aerozolu do pomiaru koncentracji cząstek aerozolowych. W przypadku badań aerozoli jednoskładnikowych, kiedy jeden lub więcej generatorów było wyłączonych, przez układ przepływał odpowiednio zwiększony strumień powietrza rozcieńczającego.

Aerozol jednoskładnikowy zawierający krople wody, generowany był z wykorzystaniem ultradźwiękowego generatora mgły wodnej [73,74]. Wartość strumienia masowego generowanego aerozolu była w tym przypadku stała i zależna od działania generatora, natomiast niezależna od strumienia powietrza rozcieńczającego (dla odpowiednio wysokiej wartości tego strumienia). Ze względu na wysoką wartość strumienia masowego zawieszonych w nim kropel (A1 i A4), strumień ten doprowadzany był do komory pomiarowej osobnym króćcem. Wlot ten umieszczony był podobnie jak wlot pozostałych dwóch aerozoli na początku komory pomiarowej, ale dodatkowo w dolnej jej części i skierowany był on w dół. Pozwoliło to zapewnić możliwość grawitacyjnego ociekania cieczy zgromadzonej na ściankach. Gromadzenie i ociekanie cieczy mogło występować ze względu na wspomnianą wysoką wartość strumienia masowego. Konstrukcja taka pomogła uchronić badaną próbkę filtra od ekspozycji na potencjalnie przemieszczającą się w komorze pomiarowej wodę, zatrzymaną na ściankach komory. Oczywiście w przypadku badań z wykorzystaniem aerozolu kropel wody, strumienie powietrza rozcieńczającego wykorzystywane dla pozostałych aerozoli jednoskładnikowych były odpowiednio zmniejszane.

Całkowity czas przebywania cząstek aerozolowych w układzie wynosił około 11 sekund. Był on niezmienny dla cząstek stałych, w przypadku których strumień gazu obojętnego przepływającego przez generator był stały i niepowiązany z koncentracją badanych cząstek.

Czas przebywania kropel oleju zmieniał się nieznacznie w zależności od badanej koncentracji kropel oleju (ze względu na konstrukcję generatora, przepływ powietrza zasilającego generator powiązany jest z koncentracją otrzymanego aerozolu). Zależność ta prowadziła do wzrostu czasu przebywania kropel oleju w układzie, w przypadku badań z wykorzystaniem aerozolu o niskiej koncentracji, o około 0,25 sekundy. Jednakże nawet w tym przypadku całkowity czas przebywania dla kropel oleju nie był wyższy niż dla cząstek stałych (11 sekund). Czas ten jest czasem potrzebnym na pokonanie całej drogi od wylotu z generatora, przez komorę pomiarową, próbkę filtra i sondę pomiarową, aż do wlotu do połączonych szeregowo klasyfikatora i licznika. Czas przebywania w komorze pomiarowej wszystkich aerozoli wynosił około 6 sekund przy zachowaniu w komorze przepływu tłokowego, a czas potrzebny na pokonanie drogi od wlotu sondy do klasyfikatora wynosił 4,5 sekundy. Pozostały czas, wynoszący około 0,5 sekundy, w przypadku cząstek stałych i kropel oleju oraz około 1 sekundy w przypadku kropel wody, był czasem przebywania strumienia opuszczającego generator przed połączeniem z innymi strumieniami.



Rys. 5. Schemat połączeń strumieni w przypadku aerozolu mieszanego cząstek stałych grafitu (G) i kropel oleju (O) łączonych ze strumieniami powietrza rozcieńczającego (P)

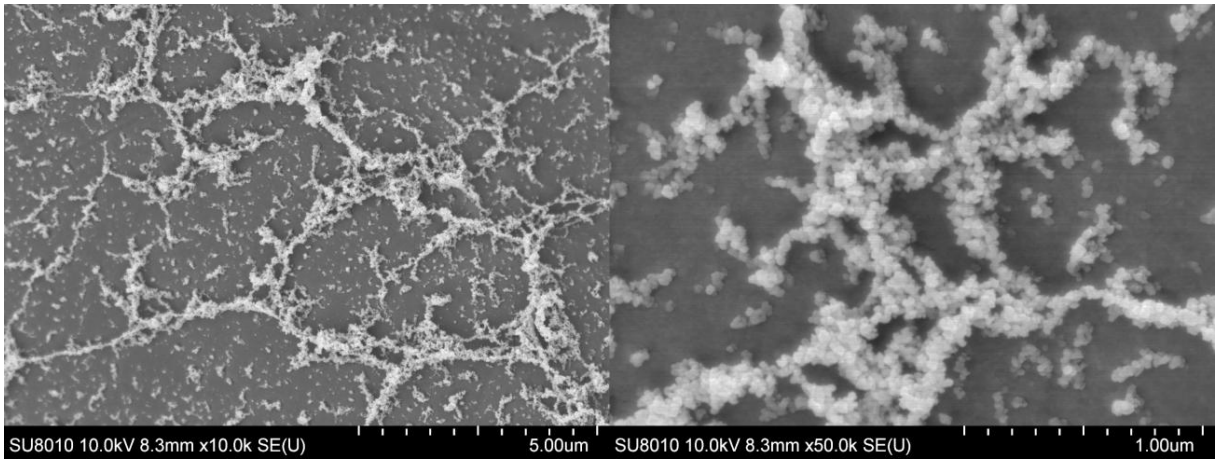
4.4. Gęstość efektywna grafitowych cząstek stałych

Innym ważnym zagadnieniem, które odnosi się głównie do cząstek stałych i ma wpływ na ich właściwości jest ich gęstość efektywna [81–83]. Jeśli aerozolowe cząstki stałe są w rzeczywistości niejednolite strukturalnie, ich kształt odbiega od kształtu kuli w znaczny sposób lub są one aglomeratami zbudowanymi z mniejszych cząstek pierwotnych, to dodatkowo w modelu i przewidywaniach należy uwzględnić ich efektywną gęstość [84]. Aglomeraty o skomplikowanej przestrzennej strukturze będą charakteryzowały się odmienną od jednolitych cząstek sprawnością, zwłaszcza w zakresie rozmiarów dla których dominującym mechanizmem filtracji jest mechanizm bezwładnościowy. Do wyznaczenia sprawności tego mechanizmu potrzebna jest informacja na temat rzeczywistej gęstości cząstek o danym rozmiarze. W przypadku aglomeratów zbudowanych z cząstek pierwotnych o jednakowym rozmiarze do wyznaczenia ich efektywnej gęstości posłużyć może poniższe równanie (25). Gęstość efektywna ρ_e (kg/m^3) zależna jest od zmierzonego rozmiaru cząstki d_{cz} (m), rozmiaru cząstek pierwotnych d_{pcz} (m), gęstości litego materiału ρ_0 (kg/m^3) oraz wymiaru fraktalnego f (-) [85,86].

$$\rho_e = \rho_0 \cdot \left(\frac{d_{cz}}{d_{pcz}}\right)^{f-3} \tag{25}$$

Zgodnie z danymi producenta, gęstość grafitu który posłużył do wytworzenia elektrod, wykorzystanych do wygenerowania aerozolu grafitowych cząstek stałych, wynosiła 2090 kg/m^3. Wartość rozmiaru cząstki d_{cz} oraz rozkład rozmiarów cząstek były wartościami zmierzonymi przez układ pomiarowy koncentracji - klasyfikator i licznik. Wyznaczenie rzeczywistego rozmiaru cząstek pierwotnych w oparciu o zdjęcia SEM (Rys. 6) okazało się niemożliwe do zrealizowania w rzetelny sposób, ze względu na ograniczenia sprzętowe - niewystarczające możliwe do uzyskania powiększenie przy zachowaniu ostrości obrazu oraz konieczność pokrycia próbek przewodzącą warstwą złota. Napylenie próbki warstwą przewodzącą, konieczne w celu ustabilizowania próbki oraz uniknięcia artefaktów pomiarowych powiązanych z ładowaniem próbki w trakcie obserwacji, może wpływać w znaczący sposób na obserwowany i mierzony rozmiar cząstek. Dodatkowo obserwacja pojedynczych cząstek była niemożliwa ze względu na ich tendencję do formowania aglomeratów. Z tego względu zdecydowano się na przyjęcie za rozmiar cząstki pierwotnej, wartości wyznaczonej w oparciu o dane producenta (producent podaje zakres rozmiaru cząstki pierwotnej wynoszący 3-10 nm [87], zależnie od ustawień generatora) oraz literaturową wartość wymiaru fraktalnego [86]. Pozwoliło to na uzyskanie zadowalającej zgodności z wynikami eksperymentalnymi. Porównanie zmiany masy próbki, podczas filtracji

aerozolu cząstek stałych, zmierzonej eksperymentalnie i wyznaczonej na drodze obliczeń z wykorzystaniem modelu obliczeniowego uwzględniającego koncepcję gęstości efektywnej, doprowadziło do uzyskania błędu względnego wynoszącego 8-30% zależnie od filtra (tak jak zostało to opisane w A2 Table 5). Ostatecznie, do obliczeń przyjęto wartość wymiaru fraktalnego równą $f = 2{,}3$, zgodną z wynikami literaturowymi [86,88–90] oraz dopasowaną wartość średnicy cząstki pierwotnej $d_{pcz} = 5\ nm$.



Rys. 6. Zdjęcia SEM struktur stałych powstałych z zatrzymanych na powierzchni włókien cząstek stałych grafitu

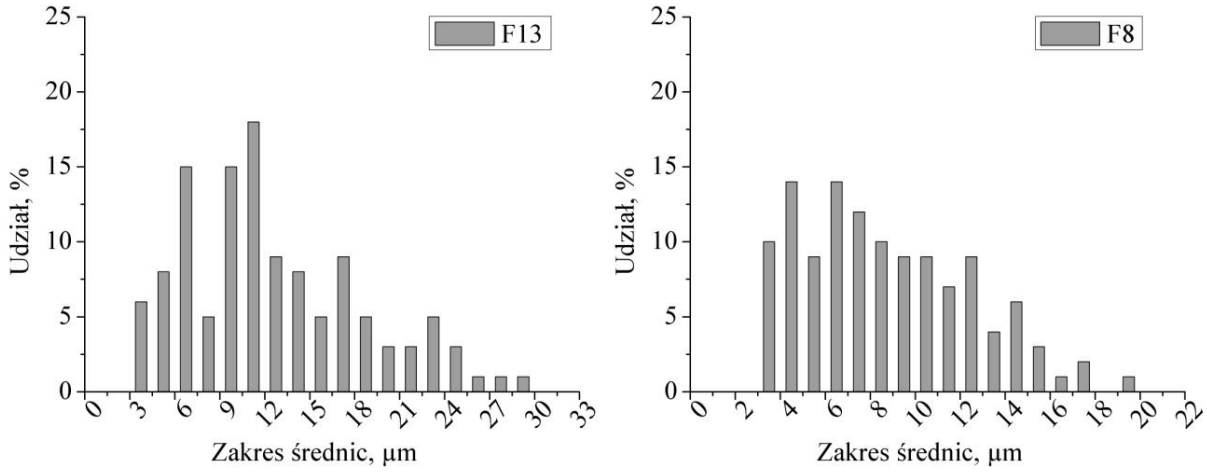
4.5. Rozkład rozmiarów włókien filtrów

W pracy tej szczególną uwagę poświęcono filtrom włókninowym wykonanym z polipropylenu metodą rozdmuchu stopionego polimeru. Wyniki doświadczeń potwierdzono w oparciu o filtry wykonane z polipropylenu i poli(tereftalanu butylenu) wyprodukowane z wykorzystaniem innego, dodatkowego układu wytwórczego również działającego w oparciu o metodę rozdmuchu stopionego polimeru [91]. Filtry te zostały wykonane w taki sposób, aby właściwości charakterystyczne oraz sprawność filtrów pochodzących z różnych układów wytwórczych były zbliżone do siebie (Tabela 1, A2 Table 1). Pozwoliło to na porównanie jakościowe wyników (obecność maksimum w przypadku aerozolu wieloskładnikowego) otrzymanych dla filtrów pochodzących z niezależnych od siebie źródeł.

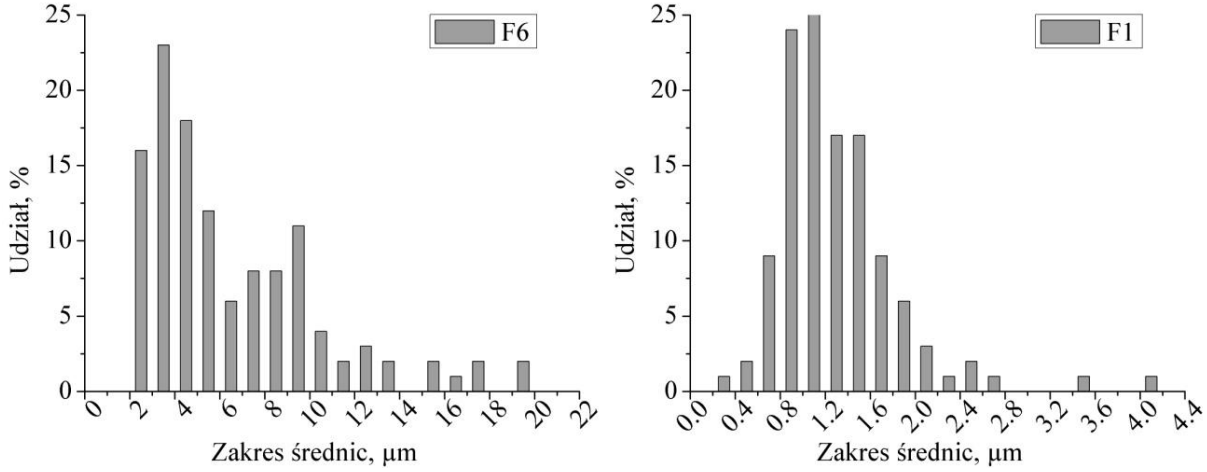
W badaniach wykorzystano filtry włókninowe różniące się średnią wartością średnicy włókien budujących dany filtr. Oznaczenie danego filtra (F13, F8, F6, F1) pochodzi właśnie od tej średniej wartości (wyrażonej w mikrometrach). Poza podstawowymi warstwami w badaniach wykorzystano również filtry charakteryzujące się większą grubością warstwy oraz filtrami wielowarstwowymi zbudowanymi z połączenia warstw podstawowych (A1-A4). Średnia wartość średnicy włókien otrzymana została w oparciu o rozkład rozmiarów średnicy

włókien, który sporządzony został z wykorzystaniem technik mikroskopowych. W oparciu o zdjęcia różnych rejonów filtrów, wykonanych przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego, dokonano pomiaru średnicy włókien tworzący dany filtr. Dokładniejszy opis tej metody znajduje się w pracy A4. Otrzymane dla różnych filtrów rozkłady rozmiarów przedstawione są na wykresach Rys. 7 i Rys. 8. We wszystkich przypadkach, uzyskanych rozkładów rozmiarów włókien nie da się opisać w dokładny i prosty sposób z wykorzystaniem rozkładu normalnego lub innych standardowych rozkładów statystycznych. Jednocześnie wykorzystanie jedynie pojedynczej wartości średnicy włókna opisującej cały rozkład rozmiarów nie byłby wystarczająco dokładnym rozwiązaniem. Efekt ten widać wyraźne w przypadku wyników obliczeń otrzymanych w A2, gdzie we wstępnych obliczeniach wykorzystano pojedynczą wartość średniej średnicy włókna. Najlepszą zgodność pomiędzy wynikami doświadczalnymi oraz wynikami modelowania otrzymano dla filtra F1, którego charakter rozkładu rozmiarów włókien najlepiej wpisuje się w symetryczną postać rozkładu normalnego. Taki dokładny opis rozkładu rozmiarów potrzebny jest, aby móc z wykorzystaniem zależności klasycznej teorii filtracji przewidywać działanie danego filtra podczas filtracji cząstek aerozolowych oraz zmiany zachodzące w strukturze filtra w czasie trwania procesu filtracji. Dodatkowo w przypadku zależności teoretycznej wykorzystywanej do opisu sprawności mechanizmu bezwładnościowego, podczas rozpatrywania włókien o rozmiarach mniejszych od rozmiaru cząstki lub kropli zatrzymywanej przez te włókna, wynik takiego rozwiązania może nie mieć sensu fizycznego (ujemne wartości sprawności dla tego mechanizmu). Z tego względu w celu zapewnienia kompromisu pomiędzy dokładnością, a łatwością implementacji w modelu obliczeniowym, zdecydowano się na opis rzeczywistego rozkładu rozmiarów poprzez rozpatrywanie poszczególnych frakcji włókien oddzielnie i niezależnie od siebie. W tym celu tworzące rozkład rozmiarów wartości uszeregowano rosnąco i podzielono na przedziały o określonej liczebności. Każdy przedział opisywany był przez pojedynczą, średnią wartość średnicy włókien. Wpływ liczebności przedziału na obliczoną sprawność filtra w przypadku zależności teoretycznych oraz empirycznych opisano w pracy A3. Zależność ta stabilizuje się dla liczby przedziałów równej i większej od dziesięciu. Dlatego w dalszych rozważaniach i obliczeniach rozkład rozmiarów opisywany był przez dziesięć wartości średnic, każda odwzorowująca równy udział włókien w całym rozkładzie. Każda średnica rozpatrywana była oddzielnie i zmieniała się niezależnie od pozostałych, kiedy rozpatrywane były zmiany rozmiarów włókien na skutek depozycji na nich cząstek aerozolowych.

Niewielkie różnice w wartościach rozmiarów włókien przedstawionych w różnych artykułach wynikają z konieczności uporządkowania wyników i zapewnienia ciągłości wartości (obcięcie skrajnych wartości, odbiegających znacznie od wartości średniej) oraz odpowiedniego odwzorowania wartości wykorzystanych podczas modelowania, która to stała się ewidentna w późniejszej fazie prowadzonych badań i implementacji rozkładów rozmiarów podczas modelowania.



Rys. 7. Rozkład rozmiarów średnic włókien dla filtrów F13 i F8



Rys. 8. Rozkład rozmiarów średnic włókien dla filtrów F6 i F1

Podobną konwencję oznaczeń przyjęto w przypadku filtrów otrzymanych z wykorzystaniem alternatywnego układu wytwórczego [91]. Filtr „nano" składa się z włókien w zakresie rozmiarów nanometrycznych, nazwy filtrów f5/X i f13/X pochodzą od średniego rozmiaru włókien je budujących, natomiast X oznacza liczbę przebiegów głowicy układu wytwórczego, a większa wartość związana jest z większa grubością filtra. Filtr PBT wytworzony został z poli(tereftalanu butylenu) w przeciwieństwie do poprzednio wymienionych wytworzonych

z polipropylenu (PP). Filtr ten wykorzystano ze względu na odmienne właściwości powierzchniowe tego materiału (kąt zwilżania przez wodę równy 84º dla PBT i 108º dla PP [92,93]), tak aby możliwe było sprawdzenie wpływu zwilżalności włókien na wystąpienie maksimum sprawności filtra podczas filtracji aerozolu mieszanego cząstek stałych i kropel oleju. Charakterystyka wspomnianych warstw przedstawiona została poniżej w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości filtrów otrzymanych na alternatywnym układzie wytwórczym

Warstwa	Średnia średnica włókien (μm)	Grubość warstwy (mm)	Średnia masa warstwy (g)	Masa powierzchniowa (g/m^2)	Gęstość upakowania (-)
nano	1,2 ± 0,9	1,43 ± 0,28	0,340 ± 0,040	43,29 ± 5,09	0,03202 ± 0,00006
PBT	8,9 ± 5,2	2,36 ± 0,11	1,459 ± 0,029	185,77 ± 3,69	0,06007 ± 0,00002
f5/50	5,9 ± 3,9	3,10 ± 0,14	0,947 ± 0,017	120,58 ± 2,16	0,04114 ± 0,00002
f5/100	5,9 ± 3,9	7,96 ± 0,17	1,860 ± 0,060	236,82 ± 7,64	0,03147 ± 0,00001
f13/50	13,8 ± 8,9	3,45 ± 0,19	1,610 ± 0,060	204,99 ± 7,64	0,06284 ± 0,00003
f13/100	13,8 ± 8,9	9,90 ± 0,40	3,420 ± 0,110	435,45 ± 14,01	0,04644 ± 0,00002

4.6. Rozkład rozmiarów cząstek aerozolowych

Podczas eksperymentów wykorzystano głównie trzy aerozole, których koncentracje frakcyjne przedstawia Rys. 9, a ich charakterystyka zaprezentowana została w tabeli 2. Dodatkowe aerozole o innych koncentracjach cząstek aerozolowych oraz dokładniejsze informacje odnośnie konkretnych aerozoli wykorzystanych w danych badaniach znajdują się w odpowiednich artykułach (A1-A4). Cząstkami aerozolowymi wykorzystanymi w badaniach były: cząstki stałe grafitu, ze względu na ich tendencję do formowania aglomeratów przypominających te powstałe na skutek spalania w silnikach diesla [94–97], krople sebacynianu bis(2-etyloheksylu) (DEHS), ze względu na stabilność formowanych kropel oraz popularność tego oleju w badaniach aerozolu co umożliwia na weryfikację wyników z wykorzystaniem dostępnej literatury [98–100], a także krople wody, ze względu na odmienne od kropel oleju właściwości powierzchniowe - zwilżalność włókien polimerowych filtrów włókninowych [31,101–105] oraz obecność wody w różnych systemach filtracji pod postacią kondensatu pary wodnej [106–108].

Wykorzystany w badaniach aerozol zwykłej wody charakteryzował się strumieniem masowym o dwa rzędy wielkości większym od strumienia masowego aerozolu kropel oleju i o cztery rzędy wielkości większym od strumienia masowego aerozolu cząstek stałych (A4, Table 1). Zabieg ten był celowy, tak aby to głównie woda odpowiadała za zapełniania struktury wewnętrznej filtra, a szybkość zapełniania zapewniła rozsądną długość trwania

pojedynczego pomiaru (około jednej godziny). Wykorzystanie wody w charakterze głównego ładunku (masowego i objętościowego) trafiającego na filtr miało znaczenie zwłaszcza w przypadku badań oporu przepływu i umożliwiło wskazanie wpływu obecności innego rodzaju cząstek aerozolowych (cząstki stałe i krople oleju) na zmiany oporu, podczas obładowywania filtra w trakcie trwania procesu filtracji. Krople oleju, ze względu na jego tendencję do rozpływania się po powierzchni włókien (A2, Fig. 3), w badaniach aerozoli mieszany (bez dodatku wody) miały za zadanie utrudnić lub uniemożliwić formowanie się na powierzchni włókien przestrzennej struktury cząstek stałych.

W poniższej tabeli 2 przedstawiono wartości średniego rozmiaru cząstek aerozolowych oraz odchylenia standardowego (są to średnie geometryczne, ważone udziałami poszczególnych frakcji rozmiarów), a także koncentrację i strumień masowy poszczególnych aerozoli. Dane eksperymentalne dla każdego aerozolu pochodziły z serii pomiarowej składającej się z sześćdziesięciu następujących bezpośrednio po sobie pomiarów. Występowały niewielkie odchylenia od tej wartości w przypadku niestabilnej pracy generatorów tuż po ich uruchomieniu, tak jak zostało to wspomniane przy okazji opisu aerozoli w odpowiednich artykułach. Każdy pomiar w serii trwał sześćdziesiąt cztery sekundy. Rozkład logarytmiczno normalny najlepiej oddaje charakter rozkładów w przypadku wszystkich badanych aerozoli również aerozoli mieszanych. Jednakże, we wszystkich przypadkach, nie można powiedzieć, że dane eksperymentalne należą do rozkładu logarytmiczno normalnego (poziom istotności równy $\alpha = 0{,}05$, prawdopodobieństwo testowe $p < 0{,}05$). W przypadku aerozolu mieszanego zawierającego jednocześnie cząstki stałe i ciekłe (grafit i olej), zaobserwowano wyraźnie niższą całkowitą koncentrację cząstek aerozolowych niż wynikałoby to z prostej sumy koncentracji składników wchodzących w skład aerozolu wieloskładnikowego (grafit+olej, również widoczne w A2 - Supplementary Data). Skomplikowany charakter rozkładów, zwłaszcza dla aerozolu mieszanego wymusza rozpatrywanie w modelu obliczeniowym poszczególnych frakcji cząstek niezależnie i oddzielnie od siebie.

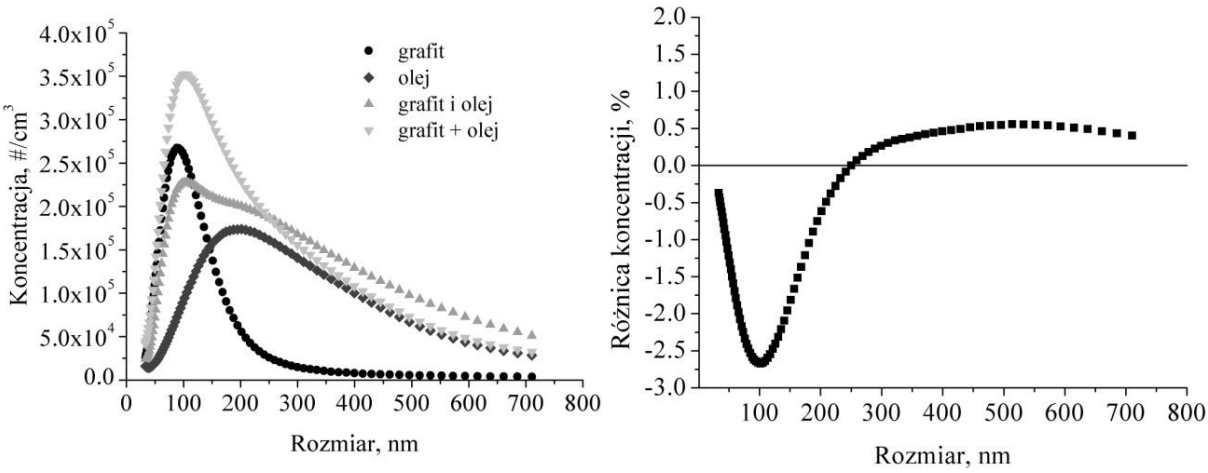
Tabela 2. Charakterystyka wykorzystanych w badaniach aerozoli

Aerozol	Średnia geometryczna rozmiaru (nm)	Geometryczne odchylenie standardowe (-)	Mediana (nm)	Koncentracja (#/cm^3) $\cdot 10^{-6}$	Strumień masowy (g/s)
grafit	94,5	1,61	91,4	8,46 ± 0,07	$1{,}4 \cdot 10^{-6}$
olej	193,1	1,86	194,6	7,82 ± 0,16	$3{,}3 \cdot 10^{-4}$
grafit i olej	158,4	2,01	151,2	12,56 ± 0,12	$3{,}3 \cdot 10^{-4}$
grafit + olej	132,7	1,93	126,3	16,27 ± 0,17	$3{,}3 \cdot 10^{-4}$
woda	3057,5	1,43	2928,7	1,39 ± 0,05	$2{,}9 \cdot 10^{-2}$

Wykres po prawej stronie na Rys. 9 przedstawia procentową zmianę koncentracji poszczególnych frakcji rozmiarów cząstek aerozolowych w przypadku aerozolu mieszanego. Zmiana ta jest odniesiona do całkowitej koncentracji wszystkich cząstek aerozolowych. Wyraźnie widać, że w tym przypadku, największy liczbowy ubytek cząstek miał miejsce dla cząstek o rozmiarach odpowiadających najpopularniejszym rozmiarom aerozolu cząstek stałych. Można z tego wnioskować, że cząstki stałe na skutek kontaktu z kroplami oleju ulegały deformacji. Przyczyną zmiany rozmiaru tych cząstek mogło być zarówno łączenie z innymi cząstkami stałymi, w przypadku którego kropla była jedynie inicjatorem połączenia pomiędzy dwoma aglomeratami, jak i wchłonięcie przez kroplę struktury stałej skutkujące powiększeniem jej objętości i rozmiaru (alternatywnie pokrycie stałej struktury warstwą cieczy). Interakcje te skutkowały wzrostem koncentracji cząstek aerozolowych o rozmiarach powyżej 250 nm, dla których różnica przyjmuje wartość dodatnią.

Ze względu na ograniczenia sprzętowe, obserwacje dla rozmiarów poniżej 30 nm i powyżej 750 nm nie były w tym przypadku możliwe do zrealizowania. Wykonano natomiast analizę wpływu czasu przebywania cząstek aerozolowych w układzie na zmianę ich koncentracji (A2, Supplementary data). Celem tych eksperymentów było określenie, czy za zmianę koncentracji w przypadku aerozoli wieloskładnikowych odpowiadają interakcje pomiędzy cząstkami stałymi i kroplami zależne od czasu ich współistnienia w komorze pomiarowej, czy sam akt łączenia strumieni. Wyniki tej analizy, opartej o metodę momentów, wskazują na brak wyraźnego wpływu czasu przebywania w układzie, zależnego od długości odcinka komory pomiarowej przed filtrem, na zmianę koncentracji cząstek. Na tej podstawie efekt zmiany koncentracji frakcyjnej przypisano aktowi łączenia strumieni aerozoli jednoskładnikowych w celu uzyskania aerozolu wieloskładnikowego. Jednakże, analiza ta również nie uwzględniała cząstek z poza obserwowalnego zakresu.

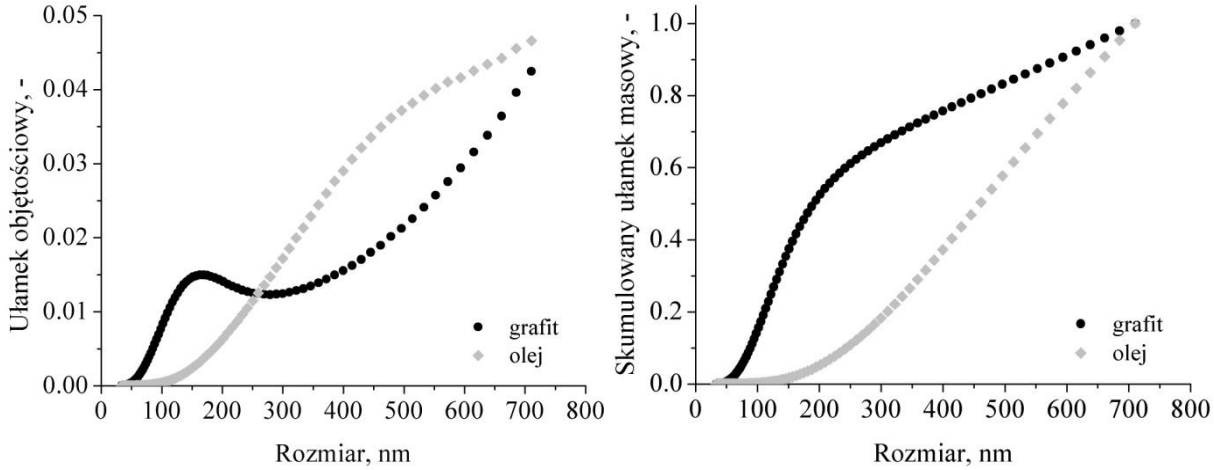
Dodatkowo w badaniach wykorzystano także aerozole wieloskładnikowe zawierające krople wody (A1, A4) oraz aerozole wieloskładnikowe o różnych koncentracjach grafitowych cząstek stałych i kropel oleju (A2, A3). Eksperymenty z wykorzystaniem kropel wody realizowane były z pominięciem wyników odnośnie sprawności filtracji (klasyfikator nie zezwalał na analizę strumieni aerozolowych zawierających krople wody), a skupiały się na wykorzystaniu wody jako inicjatora i głównej siły napędowej zmian strukturalnych zachodzących we wnętrzu filtra na skutek zapełniania filtra depozytami.



Rys. 9. Koncentracja poszczególnych frakcji cząstek aerozolowych oraz zmiana koncentracji w przypadku aerozolu mieszanego

Koncentracja liczbowa poszczególnych frakcji cząstek aerozolowych, pomimo swojej użyteczności w przypadku wyznaczania sprawności frakcyjnej filtra, nie jest najlepszym wskaźnikiem w przypadku rozpatrywania zmian zachodzących we wnętrzu filtra. W tym celu znacznie lepiej sprawdza się ułamek objętościowy, który bezpośrednio przedstawia potencjał poszczególnej frakcji cząstek do wpływania na strukturę depozytów we wnętrzu filtra. To właśnie objętość zatrzymanych na filtrze depozytów ma wpływ na zmiany strukturalne zachodzące w jego wnętrzu i wpływa na zmiany gęstości upakowania, prędkości przepływu i średnicy włókien. Wykres Rys. 10 przedstawia ułamek objętościowy poszczególnych frakcji rozmiarów cząstek znajdujących się w aerozolach jednoskładnikowych grafitu i oleju. Ułamki objętościowe wyznaczone zostały na podstawie koncentracji poszczególnych frakcji oraz objętości cząstki o odpowiednim dla danej frakcji rozmiarze, przy założeniu jej kulistego kształtu. W przypadku kropel oleju, udział każdej kolejnej frakcji rozmiarów rośnie wraz ze wzrostem rozmiarów rozpatrywanych kropel. Natomiast w przypadku cząstek stałych istnieje wyraźne maksimum lokalne wynikające z kształtu rozkładu rozmiarów, który w przypadku cząstek grafitu jest wyraźnie węższy niż w przypadku kropel oleju (Rys. 9). Dodatkowo na podstawie kształtu rozkładu rozmiarów dla kropel oleju (Rys. 9) oraz na podstawie skumulowanego ułamka masowego (nachylenie krzywej w jej końcowej części, Rys. 10) zaobserwować można, że udział liczbowy, objętościowy i masowy kropel o rozmiarach poza obserwowalnym zakresem (powyżej 750 nm) jest znaczący i ma wpływy na zmiany zachodzące w filtrze. W pracy A4 uwzględniono ekstrapolację rozkładu rozmiarów dla tego aerozolu do rozmiaru cząstek sięgającego 3000 nm.

Ponadto wpływ cząstek o rozmiarach poniżej 30 nm, ze względu na ich niewielki udział liczbowy oraz objętość, miałby znikomy efekt na zmiany masy filtra oraz zmiany strukturalne wynikające z objętości depozytów, dlatego w przypadku obydwu rozpatrywanych aerozoli zdecydowano się nie ekstrapolować rozkładu dla tych rozmiarów.

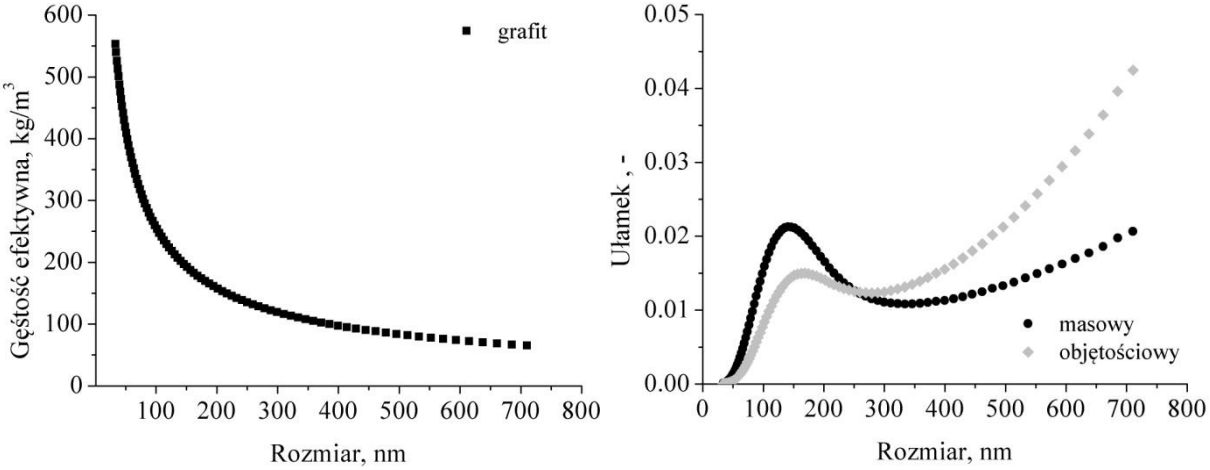


Rys. 10. Porównanie ułamka objętościowego dla cząstek stałych grafitu i kropel oleju oraz porównanie skumulowanego ułamka masowego

Prawidłowość działania modelu obliczeniowego weryfikowana była na podstawie porównania, między innymi, zmian masy filtra będących skutkiem depozycji cząstek o określonej objętości i masie. Dlatego w przypadku cząstek stałych uwzględnić należało w modelu ich efektywną gęstość. Wyznaczoną równaniem 25 zależność gęstości efektywnej obserwowanych aglomeratów grafitowych cząstek stałych od ich rozmiaru przedstawia Rys. 11. Obok przedstawiono również porównanie pomiędzy ułamkiem masowym i objętościowym dla cząstek grafitowych. Ponieważ zależność gęstości efektywnej od rozmiaru aglomeratu jest funkcją malejącą, bardziej wyraźne staje się istnienie lokalnego maksimum wartości ułamka i rośnie znaczenie prawidłowego przewidywania sprawności filtra dla rozmiarów w zakresie tego maksimum.

W przypadku rozpatrywania aerozoli mieszanych, pojawia się problem odpowiedniego opisu gęstości cząstek aerozolowych oraz dodatkowo uwzględnić należy wspomnianą wcześniej rozbieżność koncentracji. W przypadku pracy A2, dla celów obliczeniowych za gęstość efektywną grafitowych cząstek stałych przyjęto gęstość efektywną wyznaczoną dla średniego rozmiaru cząstki stałej, co pozwoliło na uzyskanie dość dobrej zgodności pomiędzy wynikiem pomiaru oraz wartością obliczoną. Natomiast gęstość efektywna w układach mieszanych, została wyznaczona na podstawie przewidywanego udziału cząstek grafitowych i kropel oleju w zmianie masy filtra (udział gęstości danego typu cząstek w gęstości efektywnej odpowiadał

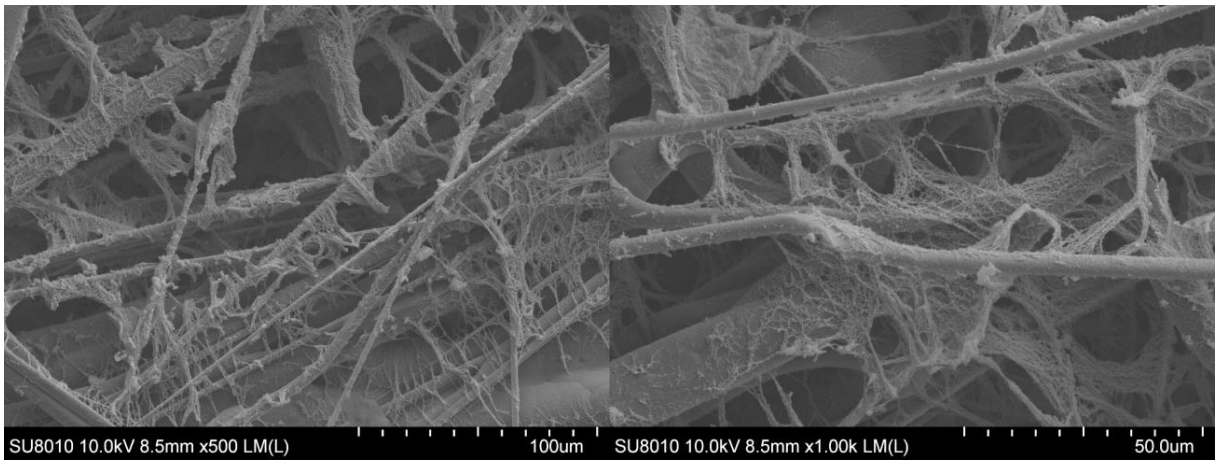
udziałowi danego typu cząstek w koncentracji danej frakcji rozmiarów). W dalszych pracach, gęstość efektywna każdej frakcji cząstek stałych rozpatrywana była oddzielnie, w oparciu o udział danej frakcji cząstek w aerozolu mieszanym (udział cząstek o danym rozmiarze w wypadkowej sumie koncentracji). Cząstki stałe i ciekłe rozpatrywane były oddzielnie od siebie, a ich gęstość efektywna powiązana była jedynie z ich rozmiarem (w przypadku kropel była ona stała).



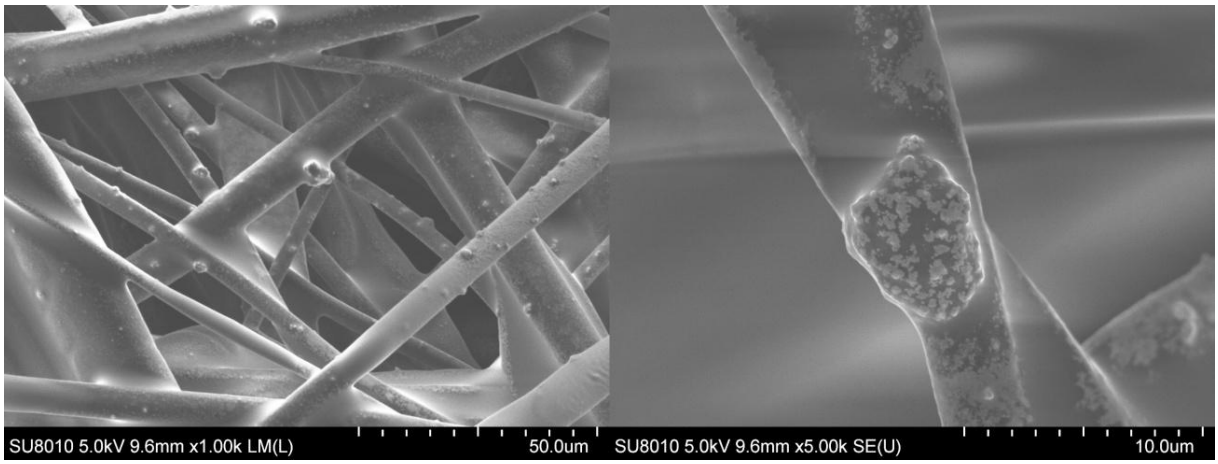
Rys. 11. Gęstość efektywna danego rozmiaru cząstek stałych oraz różnica w ułamku masowym i objętościowym dla cząstek grafitu

Osobnym zagadnieniem, powiązanym z gęstością efektywną i udziałem poszczególnych frakcji w rozkładzie rozmiarów jest w przypadku cząstek stałych, zagadnienie mechanizmu elektrostatycznego filtracji. Mechanizm ten, został pominięty w modelu obliczeniowym, ponieważ zarówno w przypadku kropel oleju i wody oraz w przypadku układów mieszanych ładunek niesiony przez krople lub cząstki które weszły w interakcje z kroplami jest nieistotny. Natomiast w przypadku filtracji jedynie cząstek stałych, na podstawie analizy zdjęć SEM, zaobserwować można występowanie hierarchicznych struktur powstałych na włóknach filtra i zbudowanych ze zdeponowanych grafitowych cząstek stałych (Rys. 12). Struktury te wyglądem przypominają pajęczynę, co wskazuje na istnienie w układzie ładunków elektrostatycznych, powiązanych z wykorzystaniem do generowania cząstek stałych generatora iskrowego. Powodem nieuwzględnienia tego mechanizmu w przypadku filtracji wyłącznie cząstek stałych jest konieczność wprowadzenia do modelu uproszczeń, tak aby był on stosowalny w przypadku różnych układów. Celem pracy jest opis układów mieszanych w przypadku których zbudowana z cząstek stałych struktura nie ma możliwości w pełni uformować się (Rys. 13), a więc wynikające z jej obecności zmiany w sprawności filtracji nie muszą być uwzględniane. Istnieją dokładniejsze modele, dostosowane i ograniczone

wyłącznie do opisu zmian podczas filtracji cząstek stałych, uwzględniające występowanie tej struktury, poprzez koncepcję włókien wtórnych [36,109]. Ze względu na niewielki ułamek masowy, najmniejszych cząstek stałych, pomimo braku uwzględnienia w modelu mechanizmu elektrostatycznego możliwe było osiągnięcie zadowalającej zgodności, pomiędzy obliczoną i zmierzoną doświadczalnie zmianą masy filtra, tak jak zostało to przedstawione w A2. Dodatkowo wpływ na zmiany we wnętrzu filtra, cząstek stałych o najmniejszych rozmiarach, na które mechanizm elektrostatyczny miałby największy wpływ, może być po części kompensowany odpowiednim dostosowaniem współczynników w zależnościach empirycznych, które stały się obszarem zainteresowania późniejszych prac (A3, A4).



Rys. 12. Struktura depozytów stałych utworzonych na włóknach filtra podczas filtracji aerozolu zawierającego jedynie cząstki stałe

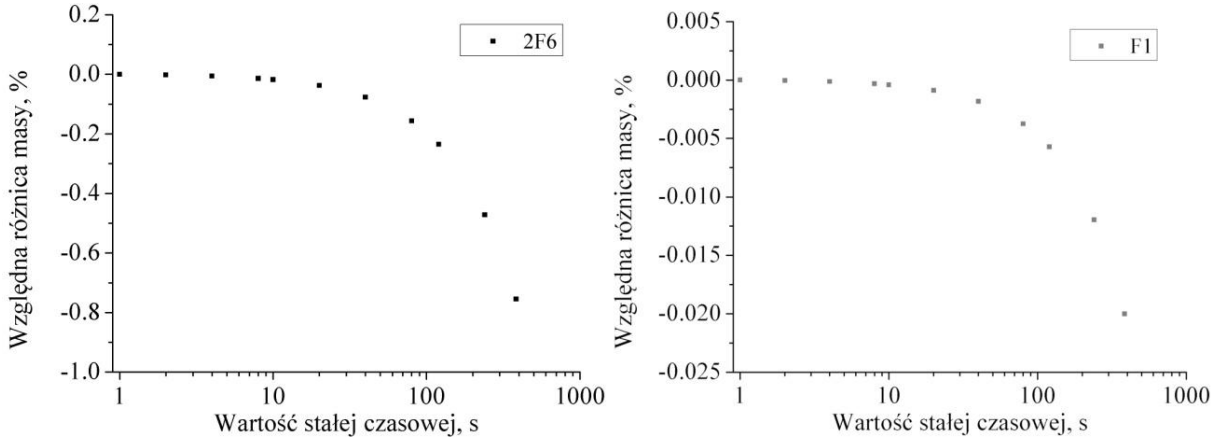


Rys. 13. Struktura depozytów stałych utworzonych na włóknach filtra podczas filtracji aerozolu zawierającego cząstki stałe i krople oleju

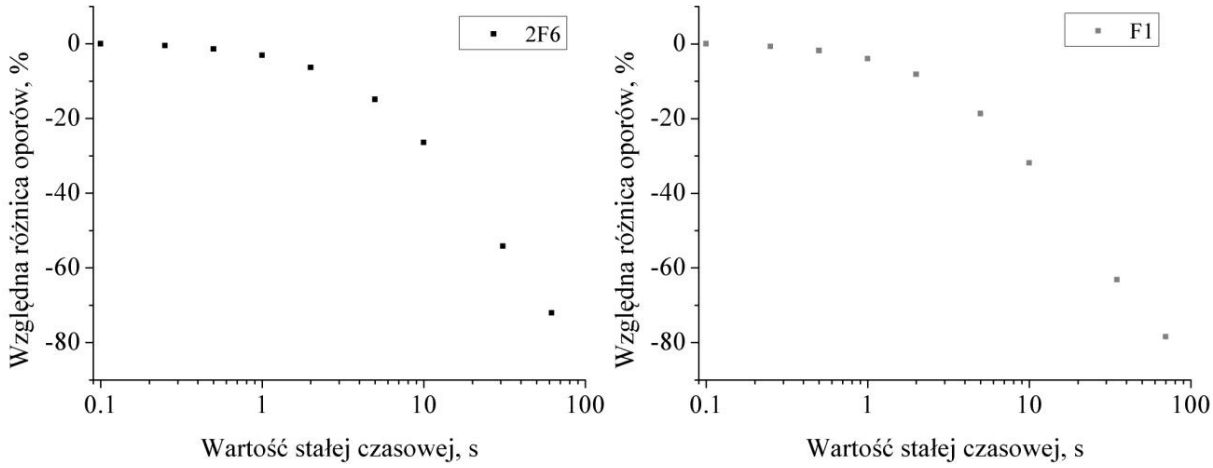
4.7. Krok czasowy

Krok czasowy zdefiniowany został jako czas trwania depozycji cząstek aerozolowych na powierzchni włókien filtra, po którego upływie następuje przeliczenie i wyznaczenie nowych, zmienionych wartości parametrów filtra. W rzeczywistości zmiana tych parametrów ma charakter ciągły i związana jest z aktem depozycji każdej kolejnej cząstki zatrzymanej przez włókna filtra. Rozdzielczość czasowa procesu musi zostać ograniczona, poprzez odpowiednio wysoką wartość kroku, tak aby możliwe było wystarczająco szybkie przeprowadzenie całości obliczeń. Jednocześnie, większa wartość kroku czasowego może oddziaływać negatywnie na dokładność przeprowadzonych obliczeń, dlatego zdecydowano się ten efekt sprawdzić. Wpływ wartości kroku czasowego, na otrzymany modelem wynik zmiany masy filtra, podczas filtracji aerozolu zawierającego jedynie krople oleju przedstawia Rys. 14. Przedstawiona na wykresach wartość względnej różnicy wyznaczona była w odniesieniu do wartości zmiany masy filtra, którą otrzymano dla najmniejszej wartości kroku (najmniejsza wartość kroku czasowego prowadzi do największej rozdzielczości czasowej procesu i dokładności obliczonej zmiany masy filtra). Całkowity rozpatrywany czas trwania procesu filtracji oraz zmiany masy filtra, wynosił we wszystkich omawianych przypadkach 3840 sekund, podobnie jak miało to miejsce w analizach przeprowadzonych w A4. Wpływ wartości kroku czasowego jest w tym wypadku niewielki i nieznacznie wyższy dla filtra 2F6. W obydwu przypadkach zależność względnej różnicy masy filtra stabilizuje się dla wartości kroku czasowego poniżej 10 sekund. Natomiast wpływ kroku czasowego w przypadku wyznaczonej końcowej wartości oporów przepływu przez filtr jest wyraźny dla obu filtrów (Rys. 15). W tym przypadku rozpatrywany czas filtracji i zmiany oporów przepływu przez filtr był analogiczny dla wartości zastosowanych w A4, a więc był to czas potrzebny na całkowite zapełnienie filtra depozytami ciekłymi. Zwiększenie wartości kroku do 10 sekund prowadzi w obu przypadkach do niedoszacowania oporów o około trzydzieści procent, względem wartości otrzymanej dla najmniejszej wartości kroku (największej dokładności). Równocześnie zmniejszenie wartości kroku poniżej jednej sekundy pozwala na poprawę dokładności wyznaczenia o niecałe pięć procent przy jednoczesnym kilkukrotnym wydłużeniu czasu potrzebnego na wykonanie obliczeń z wykorzystaniem modelu obliczeniowego. We wszystkich przytoczonych przypadkach i obliczeniach aktywne były również narzucone w A4 ograniczenia.

Z tego względu wartość kroku czasowego, wynosząca jedną sekundę, została uznana za odpowiednią do zapewnienia kompromisu pomiędzy wystarczającą dokładnością wyników, a czasem potrzebnym na ich otrzymanie.



Rys. 14. Wpływ wartości kroku czasowego na względną różnicę obliczonej zmiany masy filtra podczas filtracji aerozolu zawierającego jedynie krople oleju



Rys. 15. Wpływ wartości kroku czasowego na względną różnicę obliczonej końcowej zmiany oporów przepływu przez filtr podczas filtracji aerozolu zawierającego jedynie krople wody

4.8. Powtarzalność wyników i analiza statystyczna

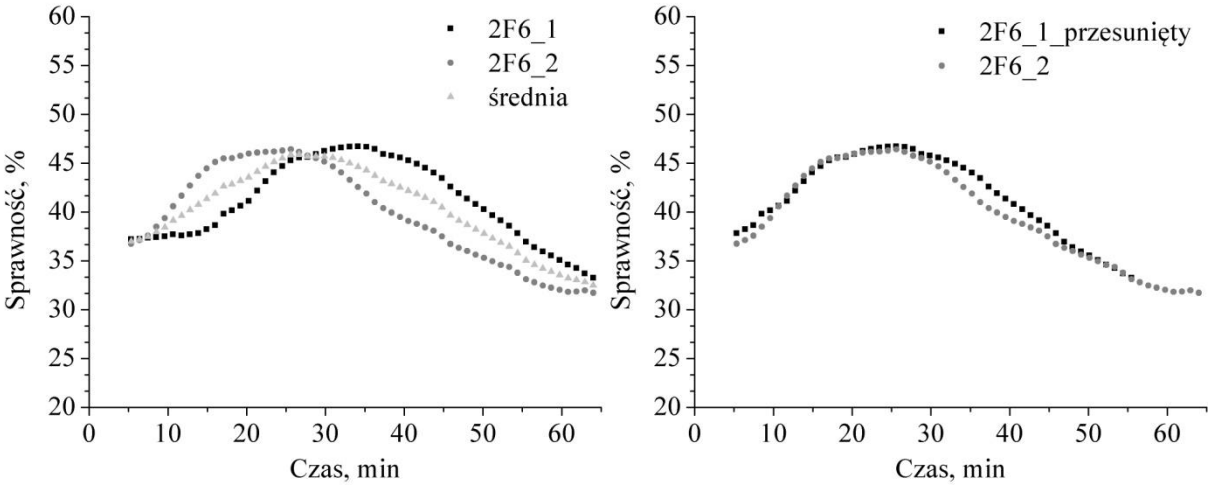
Wykresy zmian sprawności oraz oporów przepływu umieszczone w artykułach oraz niniejszej pracy przedstawiają przebieg zmian dla pojedynczych pomiarów. Większa liczba pomiarów niż te zaprezentowane, została wykonana, aby potwierdzić, że wyniki są powtarzalne. Jednakże, ponieważ w badaniach zastosowano filtry włókninowe, niejednorodności w strukturze filtra powodują losowe przesunięcie w czasie zachodzących zmian. Na przykład w przypadku aerozolu zawierającego zarówno cząstki stałe jak i krople oleju, wyniki filtracji z wykorzystaniem filtra 2F6 prezentują się następująco Rys. 16 (wyniki te analizowano w ramach A2). Uzyskane krzywe skuteczności filtracji, pomimo zastosowania tego samego filtra i aerozolu, pokazują występowanie przesunięcia w czasie maksimum sprawności filtracji

pomiędzy kolejnymi pomiarami. W tym konkretnym przypadku przesunięcie to wyniosło około piętnaście minut pomiędzy pierwszym (2F6_1) i drugim pomiarem (2F6_2). Podobne przesunięcie występuje w przypadku, powiązanych ze zmianami sprawności filtra, wyników średniego rozmiaru cząstki za filtrem (które analizowano w przypadku A3). Efekt występowania maksimum sprawności (i minimum średniej wielkości cząstek) w przypadku tego i innych układów (aerozol i filtr) jest wynikiem powtarzalnym. Gdyby otrzymane krzywe zmian sprawności zostały uśrednione, to finalny przebieg składałby się z dwóch odcinków, jednostajnego wzrostu i spadku sprawności, połączonych maksimum. W rzeczywistości przebieg zmian sprawności ma bardziej skomplikowany charakter. Natomiast przesunięcie w czasie jednej z krzywych pozwala pokazać, że przebieg zmian dla kolejnych pomiarów ma zbliżony i powtarzalny przebieg (Rys. 16, po prawej), o zbliżonej wartości początkowej, końcowej oraz maksymalnej. Jednocześnie taki zabieg wiąże się z arbitralnym wyborem rzeczywistego czasu występowania maksimum. Z tych względów postanowiono nie obliczać wartości uśrednionych. Otrzymane wyniki doświadczalne mają charakter jakościowy o dobrej powtarzalności, ale zdecydowano nie przeprowadzać na tym etapie ilościowej analizy statystycznej.

Filtry włókninowe, podobnie jak większość mediów porowatych, charakteryzują się znaczną niejednorodnością nie tylko w mikroskali (różnice w średnicach poszczególnych włókien), ale także w mezoskali (obszary o większej i mniejszej lokalnej porowatości). Niejednorodności te nie muszą jednak wpływać na makrostrukturę, jako całą uśrednioną strukturę filtra. Odnosząc się do przykładu przedstawionego na Rys. 16, w każdym badanym przypadku obserwowano podobną sprawność początkową i końcową oraz występowanie maksimum sprawności, przy czym w każdym przypadku wartość tego maksimum była zbliżona (choć występowała po innym czasie obładowywania). Pozwala to wnioskować, że badane próbki zostały odpowiednio dobrane, a wspomniane efekty związane z niejednorodnością nie mają istotnego wpływu na wypadkową skuteczność filtra.

Chociaż filtr jest jednorodny w makroskali, w przypadku badanego procesu mogą wystąpić okoliczności, które sprawiają, że jego niejednorodność w mikro i mezoskali ma znaczący wpływ na czas występowania pewnych efektów. Znaczna część procesu filtracji odbywa się w wierzchniej warstwie filtra, więc kilka włókien znajdujących się najbliżej powierzchni będzie miało największy wpływ na wynik, a wpływ ten zwiększa się wraz z upływem czasu, gdy następuje obładowanie, szczególnie w przypadku aerozoli wieloskładnikowych i gdy obładowywanie to jest szybsze. Dodatkowo mamy do czynienia z procesem asymetrycznym, a asymetria ta staje się bardziej wyraźna wraz z upływem czasu. W wyniku obładowywania

warstwy powierzchniowej, olej przemieszcza się wewnątrz struktury filtra, zarówno pod wpływem strumienia aerozolu, jak i grawitacji (grawitacja wprowadza asymetrię do procesu). Oba te efekty są zależne od czasu trwania procesu, a ich wpływ jest ograniczony do mikro i mezoskali. Wyjaśniałoby to, dlaczego niewielka różnica w średnicy włókien na powierzchni między dwiema próbkami może wpływać na przemieszczanie się cieczy i prowadzić do przesuniętego w czasie wzrostu sprawności, jednocześnie nie zmieniając znacząco ogólnej wydajności filtra, która związana jest głównie z jego makrostrukturą.



Rys. 16. Różnice w sprawności filtracji pomiędzy kolejnymi powtórzeniami pomiaru filtracji aerozolu zawierającego cząstki stałe i krople oleju

Analizy statystycznej modelu obliczeniowego nie przeprowadzono na tym etapie badań, ze względu na nieostateczną postać narzuconych w nim założeń (rozdział 3.5 oraz A4). Dalsze badania i rozwój modelu, o elementy uwzględniające lepsze odzwierciedlenie rzeczywistego rozkładu masy depozytów wewnątrz struktury filtra, pozwoliłyby na przygotowanie analizy opartej o wyniki uzyskane dla modelu o znacznie lepszej dokładności ilościowej. Na obecnym etapie jego rozwoju przyjęte założenia miałyby znaczny wpływ na otrzymane wyniki oraz analizę statystyczną.

5. Omówienie artykułów

Rozdział ten przedstawia skróconą postać analizy i omówienia otrzymanych wyników doświadczalnych, przedstawionych szerzej w treści poszczególnych artykułów. Zostały one rozbudowane o dodatkowe wyniki, informacje i wnioski, wraz z komentarzem spajającym kolejne etapy prowadzonych badań oraz uzasadnieniem podjętych w trakcie badań decyzji. Przy okazji omówienia części prac, zawarto również dodatkowe nowe elementy, które nie znalazły się w treści recenzowanych artykułów, stanowiące jednak uzupełnienie przedstawianych wyników. Części wyników nadano nowy kontekst wynikający z porównania ich z wynikami otrzymanymi podczas badań filtrów wytworzonych na alternatywnym układzie badawczym Przedstawiono również rozwinięcie modelu oporów przepływu, pozwalające na jego uproszczenie, a także potencjalny kierunek dalszego rozwoju omawianych modeli obliczeniowych. Wskazano także najważniejsze punkty artykułów, pod postacią odniesienia do danego osiągnięcia, na których oparto przedstawione w podsumowaniu omówienie głównych osiągnięć naukowych pracy.

5.1. Artykuł pierwszy

Badania doświadczalne rozpoczęto od przygotowania stanowiska pomiarowego pozwalającego na generowanie aerozolu wieloskładnikowego oraz pomiar koncentracji cząstek aerozolowych. Następnie przeprowadzono pomiary sprawności filtracji dla aerozolu grafitowych cząstek stałych. Wyniki te porównano z wynikami filtracji aerozolu wieloskładnikowego zawierającego dodatkowo krople wody. Równocześnie prowadzone były badania zmiany oporów przepływu przez filtr co umożliwiło zaobserwowanie występowania gwałtownego skoku oporów podczas obładowywania filtra. Zidentyfikowano również negatywny wpływ wykorzystania osuszacza na stabilność pomiarów sprawności filtracji. Sformułowano także pierwotną wersję modelu obliczeniowego, opartego o koncepcję sprawności pojedynczego włókna, uwzględniającą zmiany gęstości upakowania, średniego rozmiaru włókna oraz liniowej prędkości przepływu. Głównymi zagadnieniami poruszanymi w pierwszym artykule z serii są: wpływ dodatku aerozolu zawierającego krople wody na filtrację aerozolu cząstek stałych, wpływ wykorzystania filtrów wielowarstwowych na proces filtracji aerozolu mieszanego oraz wpływ kolejności warstw filtra wielowarstwowego na proces filtracji.

Porównanie struktury depozytów uformowanych na powierzchni włókien filtra w przypadku filtracji aerozolu zawierającego jedynie cząstki stałe z aerozolem zawierającym cząstki stałe i krople wody wskazuje, że obecność kropel ma znaczący wpływ na strukturę powstałych

depozytów stałych. W przypadku braku wody, cząstki stałe tworzą rozbudowaną przestrzennie hierarchiczną strukturę, przypominającą wyglądem pajęczynę. Zbudowane z cząstek stałych włókna wtórne ze względu na swój mniejszy w porównaniu z pierwotnymi włóknami filtra rozmiar oraz zajmowanie wolnych przestrzeni pomiędzy włóknami filtra, powodują postępujący w czasie wzrost sprawności filtra (A1, Fig. 3). Kiedy w strumieniu filtrowanego aerozolu pojawiają się krople wody, a filtracja takiego aerozolu mieszanego prowadzona jest jednocześnie od samego początku trwania procesu filtracji, to przestrzenna struktura zbudowana z cząstek stałych nie ma możliwości wykształcić się w znaczący sposób, a sprawność filtracji jest wyraźne niższa (A1, Fig. 6). Na włóknach filtra pojawia się natomiast alternatywna forma depozytów, o bardziej zwartej budowie, składająca się z dużej liczby cząstek stałych i w wielu przypadkach kształcie zbliżonym do kulistego, co związane jest z samoistną reorganizacją struktury takiego depozytu skutkującą minimalizacją stosunku pola powierzchni i objętości depozytu (Osiągnięcie 6).

W przypadku filtrów jednowarstwowych, ich działanie zgodne jest z teoretycznie przewidywanym. Filtr składający się z włókien o mniejszym rozmiarze F6 charakteryzuje się wyższą sprawnością usuwania cząstek stałych w porównaniu z filtrem F8 (A1, Fig. 6). Wiąże się z tym również szybszy wzrost oporów przepływu przez ten filtr wynikający z większej liczby i objętości depozytów zatrzymanych na tym filtrze w danej chwili czasowej. Kiedy w strumieniu pojawiają się dodatkowo krople wody, widoczna staje się różnica pomiędzy filtrem o wyższej F6 i niższej F8 sprawności (A1, Fig. 6). Filtr F6 cechuje się większą różnicą pomiędzy sprawnościami podczas filtracji jedynie cząstek stałych i filtracji aerozolu mieszanego.

W przypadku filtrów wielowarstwowych, o większej całkowitej grubości warstwy filtracyjnej oraz w przypadku filtrów jednorodnych również o większej grubości warstwy, w porównaniu z filtrami podstawowymi, zarówno ich sprawność jak i opory przepływu przez filtr są wyższe (A1, Fig. 9 i Fig. 10) podczas filtracji obydwu testowanych aerozoli. Dodatkowo zarówno sprawność jak i opory przepływu, w przypadku filtrów wielowarstwowych, nie różnią się znacznie w zależności od kolejności ułożenia warstw takiego filtra. Obserwowany, podczas filtracji aerozolu zawierającego dodatkowo krople wody, skok oporów przepływu występuje wcześniej, w przypadków filtrów o większej grubości warstwy, ze względu na wyższą sprawność takiego filtra wielowarstwowego prowadzącą do zatrzymywania większej liczby depozytów. Rozkład masy pomiędzy poszczególne warstwy filtra wielowarstwowego determinowany jest głównie przez pozycję warstwy w filtrze (A1, Fig. 12 i Fig. 13).

Zarówno w przypadku filtrów jednorodnych jak i wielowarstwowych krzywa zmiany oporów przepływu przez filtr podczas filtracji aerozolu zawierającego krople wody daje podzielić się na dwa charakterystyczne etapy (A1, Fig. 8 i Fig. 11). Przed gwałtownym skokiem oporów oraz po tym skoku. Występowanie tego nagłego wzrostu jest skutkiem zapełniania się wierzchniej warstwy filtra depozytami, co prowadzi do zmniejszenia się powierzchni dostępnej dla przepływu aerozolu. W skrajnym przypadku niemal cała powierzchnia przekroju zostaje zapełniona co prowadziłoby do wzrostu oporu do wartości nieskończonej. Jednakże wynikający z tego szybki wzrost różnicy ciśnień przed i za filtrem prowadzi do penetracji znajdujących się w wierzchniej warstwie filtra depozytów w głąb filtra, a spadek ciśnienia stabilizuje się chwilowo na nowym poziomie wynikającym z rozłożenia depozytów w całej objętości filtra. Dalszy wzrost oporów wynika z postępującego zapełniania struktury wewnętrznej filtra depozytami ciekłymi, które ze względu na wymuszone wcześniej zwilżenie włókien cieczą mogą łatwiej przemieszczać się po powierzchni włókien. Czas występowania nagłego wzrostu oporów związany jest ze średnim rozmiarem włókien budujących daną warstwę. Następuje on wcześniej w przypadku filtra jednorodnego o mniejszych włóknach (A1, Fig. 8), a w przypadku filtrów dwuwarstwowych (A1, Fig. 10, 11) wcześniej kiedy pierwsza kontaktująca się z aerozolem warstwa składa się z większych włókien. Związane jest to najprawdopodobniej ze sprawnością danej warstwy oraz łatwością przemieszczania się cieczy po powierzchni włókien, zarówno na skutek zjawiska ociekania jak i przemieszczania w głąb filtra.

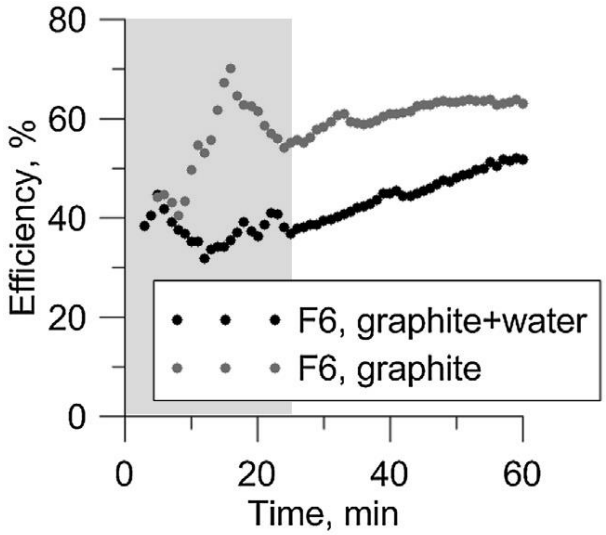
Dodatkowo znaczenie ma możliwość wystąpienia zjawiska nazwanego „water-bag” (A1, Fig. 14). Związany jest on ze zdolnością cieczy zatrzymywanej na filtrze do ociekania wymuszonego oddziaływaniem grawitacyjnym oraz przepływem strumienia aerozolu (filtr znajduje się w komorze pomiarowej w orientacji pionowej). Wystąpienie tego efektu związane jest ze zdolnością wierzchniej warstwy filtra (wystawionej na przepływ) do odprowadzania ciekłych depozytów szybciej niż są one przez filtr gromadzone, co skutkuje brakiem gwałtownego wzrostu oporów, a charakter zmian zbliżony jest do tego obserwowanego dla filtracji aerozolu niezawierającego kropel wody.

Istotny wpływ na uzyskane wyniki sprawności filtracji miał jeden z elementów układu pomiarowego - osuszacz (A1, Fig. 1, 10 - diffusion dryer). Ideą jego wykorzystania było zapewnienie, że ze strumienia powietrza pobranego z komory pomiarowej usunięte zostaną krople wody. Układ klasyfikatora elektrostatycznego i licznika nie zezwalał na wprowadzenie bezpośrednio do tego układu strumienia zawierającego krople wody. Wykorzystanie osuszacza pozwoliłoby na analizę wpływu obecności kropel wody na sprawność procesu

filtracji aerozolowych cząstek stałych. W celu zapewnienia możliwości porównania wyników pomiędzy układami zawierających jedynie cząstki stałe i układami zawierającymi mieszaninę cząstek stałych i kropel, osuszacz musiał być wykorzystany w obydwu przypadkach. Umożliwiłoby to minimalizację różnicy efektów interakcji cząstek aerozolowych ze strukturą i wypełnieniem osuszacza oraz zapewniłoby, że ewentualne straty wynikające z depozycji cząstek wewnątrz osuszacza oddziaływałyby równomiernie w przypadku obydwu badanych układów aerozolowych. Jednakże jak wskazuje na to niestabilność wskazań sprawności filtracji w początkowej fazie trwania procesu, nawet w przypadku aerozolu zawierającego jedynie cząstki stałe, obecność osuszacza wiązała się z wprowadzeniem do układu znacznej niestabilności i wprowadzała dodatkowy błąd pomiarowy do uzyskanych wyników, szczególnie na początkowym etapie pomiaru (A1, Fig. 6 i Fig. 10 oraz Rys. 17). Długość tego początkowego etapu, kiedy wyniki obarczone są błędem wynikającym z wykorzystania osuszacza jest trudna do oszacowania ze względu na jego konstrukcję i jedynie częściowe wymywanie i zastępowanie znajdującego się w jego wnętrzu gazu, na co wskazuje szybkie uzyskanie początkowego odczytu koncentracji, ale wyraźnie dłuższy czas potrzebny na jego stabilizację wynoszący zależnie od pomiaru około 20-30 min.

Aby uniknąć pojawiania się wyżej wspomnianych błędów w pierwszej fazie pomiaru, w dalszych eksperymentach zrezygnowano z wykorzystania osuszacza (Osiągnięcie 1). Pozwoliło to na wyraźną poprawę stabilności wskazań układu pomiarowego (A1-A4). Nowym głównym obszarem zainteresowania stały się aerozole mieszane zawierające krople oleju, które nie wymagały obecności osuszacza w układzie pomiarowym. Nadal możliwe było prowadzenie badań z wykorzystaniem kropel wody, ale jedynie w zakresie oporów przepływu przez filtr i ich zmiany w czasie trwania procesu filtracji. Zagadnienie to zostało szerzej omówione w artykule czwartym (A4). Dodatkowo rozwinięta tam została również tematyka wpływu zwilżalności depozytów ciekłych zatrzymywanych przez filtr na zmiany oporów przepływu podczas trwania procesu filtracji.

Zaproponowany model wyznaczania sprawności filtra oraz jej zmiany w czasie, bazujący na koncepcji przeliczania objętości zatrzymanych depozytów na zmiany właściwości filtra (A1, Eq. 1-3) pozwolił uzyskać dobrą zgodność z wynikami eksperymentalnymi, nawet pomimo pewnej niestabilności wyników występującej w układzie ze względu na wykorzystanie osuszacza (Osiągnięcie 3). Natomiast dopasowanie modelu i wyników eksperymentalnych na tym etapie nie miało decydującego znaczenia i nie rzutowało na dalsze wyniki, a idea tego modelu była dalej rozwijana (A2-A4).



Rys. 17. Niestabilność wyników sprawności filtracji wynikająca z wpływu osuszacza (A1)

5.2. Artykuł drugi

W drugim artykule przeprowadzono badania z wykorzystaniem aerozolu wieloskładnikowego, który zawierał cząstki stałe oraz krople oleju. Z oleju skorzystano ze względu na napotkane i opisane w ramach poprzedniego podrozdziału problemy związane z wykorzystaniem aerozolu kropel wody. Dodatkowo pozwoliło to prowadzić badania przy wykorzystaniu kropel cieczy o zwilżalności włókien odmiennej od tej dla wody. Model obliczeniowy poszerzono o niezależne rozpatrywanie poszczególnych rozmiarów cząstek aerozolowych oraz o wykorzystanie koncepcji efektywnej gęstości cząstek aerozolowych. Wprowadzenie do modelu gęstości efektywnej pozwoliło na dokładniejszy opis rzeczywistego zachowania, tworzących przestrzennie rozbudowane aglomeraty, cząstek stałych. W ramach tej pracy przedstawiono również pierwsze wyniki dotyczące wpływu depozycji cząstek stałych na zmianę masy filtra, poprzez powiększenie pojemności filtra względem depozytów, podczas filtracji aerozolu wieloskładnikowego. Zagadnieniami poruszanymi w drugim artykule są: wpływ dodatku aerozolu zawierającego krople oleju na filtrację aerozolu cząstek stałych, wykorzystanie klasycznej teorii filtracji do opisu sprawności filtrów włókninowych podczas filtracji aerozoli jedno- i wieloskładnikowych, sformułowanie i wykorzystanie współczynnika poprawkowego (SIF - System Imperfection Factor) do poprawy przewidywania sprawności filtrów wielowarstwowych oraz zagadnienie przewidywania zmiany masy filtrów podczas filtracji rożnych aerozoli testowych.

Tym razem cieczą wykorzystaną w badaniach były krople oleju (sebacynian bis(2-etyloheksylu), znany szerzej jako DEHS). Pozwoliło to na obserwacje i analizę rozmieszczenia cieczy zatrzymanej na powierzchni włókien, na skutek prowadzenia filtracji

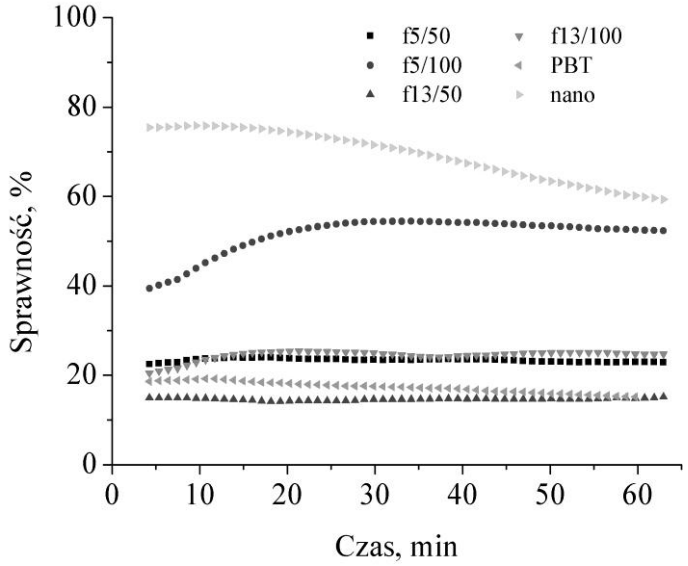
aerozolu zawierającego jedynie krople oleju oraz aerozolu mieszanego zawierającego krople oleju i grafitowe cząstki stałe (A2, Fig. 3). Na podstawie zdjęć wykonanych z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego zaobserwowano tendencję cieczy do rozpływania się po powierzchni włókien filtra i formowania na nich cienkiej warstwy. Jest to następstwem dobrej zwilżalności wykonanych z polipropylenu włókien przez wykorzystany olej. Zabieg ten był celowy i miał za zadanie pozwolić na porównanie wyników obserwacji z wynikami uzyskanymi w przypadku wykorzystania kropel wody, które charakteryzują się złą zwilżalnością względem testowanych filtrów włókninowych. Dodatkowo zatrzymany na włóknach olej miał tendencję do gromadzenia się w punktach kontaktu włókien oraz na ich skrzyżowaniach tworząc skupiska o większej objętości stanowiące barierę dla przepływu strumienia aerozolu (Osiągnięcie 6). Efekt ten jest bardziej widoczny w przypadku włókien znajdujących się głębiej we wnętrzu filtra. Zaobserwowano również zdolność włókien do zatrzymywania kropel o dużo większych od nich rozmiarach, co prowadziło do uzyskania kropli o konformacji osiowosymetrycznej (beczułkowa, barrel-shape). Fakt występowania tego typu zatrzymanych kropli jest ważny w kontekście wykorzystania teoretycznej zależności opisującej sprawność filtracji dla mechanizmu bezwładnościowego (Równanie 11), która może nie mieć fizycznego rozwiązania w przypadku rozpatrywania kropel o rozmiarach większych od rozmiarów włókien (Osiągnięcie 4).

Podobnie jak w przypadku aerozolu wieloskładnikowego kropel wody i cząstek stałych, przestrzenna struktura zbudowana z cząstek stałych nie miała możliwości wykształcić się (Osiągnięcie 2). Filtracja aerozolu wieloskładnikowego, kropel oleju i cząstek stałych, poskutkowała utworzeniem na powierzchni włókien aglomeratów cząstek stałych (Rys. 13) przypominających te uzyskane na skutek filtracji aerozolu wieloskładnikowego zawierającego krople wody. Ponadto powierzchnia powstałych aglomeratów pokryta jest warstewką zatrzymanego na włóknach oleju (Osiągnięcie 6).

W badaniach, w celu wyizolowania wpływu koncentracji kropel oleju znajdujących się w strumieniu aerozolu na obserwowane zmiany sprawności, podczas filtracji aerozolu mieszanego zawierającego krople oleju i grafitowe cząstki stałe, wykorzystane zostały dwa aerozole mieszane różniące się koncentracją kropel oleju (A2, Table 2, Fig. 2). Całkowita koncentracja dla obydwu aerozoli mieszanych była mniejsza niż wynikałoby to z sumy koncentracji składowych aerozoli. Efekt ten był dużo bardziej istotny w przypadku aerozolu o większej koncentracji kropel oleju. Zagadnienie to zostało szerzej omówione w rozdziale 4.6.

Zarówno w przypadku filtrów jednowarstwowych jak i filtrów wielowarstwowych o różnej kolejności warstw, podczas filtracji aerozolu zawierającego jedynie cząstki stałe, sprawność filtracji rośnie w czasie trwania procesu (A2, Fig. 4, Fig. 6). Związane jest to z formowaniem na powierzchni włókien, wspomnianej wcześniej hierarchicznej struktury. Sprawność filtracji w przypadku aerozolu zawierającego jedynie krople oleju pozostaje prawie niezmienna w czasie trwania procesu, z wyłączeniem filtrów o największej sprawności, dla których występuje niewielki spadek sprawności (F1, 2F1). Dodatek kropel oleju o niewielkiej koncentracji do aerozolu zawierającego cząstki stałe prowadzi do spowolnienia wzrostu sprawności, a nawet jej spadku, podczas filtracji powstałego aerozolu wieloskładnikowego. Spowodowane jest to destruktywnym wpływem kropel oleju na zdolność formowania się zbudowanej z cząstek stałych struktury. Efekt ten jest zarówno skutkiem kontaktu cząstek stałych, zatrzymanych na powierzchni włókna z trafiającą na powierzchnię włókna cieczą jak i zderzeń pomiędzy formującą się szczątkową strukturą stałą, a znajdującymi się w strumieniu aerozolu kroplami. Natomiast w przypadku filtracji aerozolu wieloskładnikowego, zawierającego wysoką koncentrację kropel oleju, zaobserwować można występowanie charakterystycznego maksimum sprawności filtracji (jego występowania można również doszukiwać się w przypadku niskiej koncentracji kropel oleju, ale efekt ten jest wtedy znacznie mniej wyraźny). Wpływ na występowanie tego maksimum ma rozmiar włókien budujących daną warstwę filtracyjną, jest on bardziej zauważalny w przypadku filtrów o mniejszym średnim rozmiarze włókien, a więc i większej sprawności teoretycznej takiego włókna. Dodatkowe badania pokazują, że w przypadku filtrów o włóknach submikronowych (Rys. 18, nano), maksimum to pojawia się już po kilku minutach, a następnie występuje spadek sprawności, a jego istnienie zaobserwować można również dla filtra f5/100 zbudowanego z włókien o względnie wysokiej sprawności. Jednocześnie filtr PBT wykonany z odmiennego polimeru (o gorszej zwilżalności przez olej, kąt zwilżania przez wodę równy 84º dla PBT i 108º dla PP [92,93]), charakteryzuje się zachowaniem zbliżonym do pozostałych filtrów o sprawności wynoszącej około 20%. Wynik ten w kontekście filtrów o podobnej sprawności (A2, Fig. 4a, b), dla których zaobserwować można występowanie maksimum, pozwala wnioskować, że efekt ten jest wypadkową szerokiego zakresu właściwości filtra (sprawność włókien, całkowita sprawność filtra, gęstość upakowania, grubość warstwy, wpływ struktury filtra i wpływu właściwości powierzchniowych włókien na zdolność cieczy do przemieszczania się). Dla warstw o większej grubości warstwy filtracyjnej efekt ten jest bardziej rozłożony w czasie i dłużej utrzymuje się w pobliżu wartości maksymalnej (A2, Fig. 4e i Fig. 4f). Wskazuje to na powiązanie występowania tego efektu ze

strukturą wewnętrzną i sprawnością filtra, a dokładniej efektywną sprawnością niewielkiego wycinka grubości filtra, która w danej chwili czasowej charakteryzuje się największą wartością sprawności oraz ze zdolnością filtra do odprowadzania z tej warstwy cieczy, która zależna jest od jego struktury i może zależeć od właściwości powierzchniowych filtra. W przypadku filtrów o wysokiej sprawności pojedynczego włókna, depozycja zatrzymanych przez filtr cząstek aerozolowych nie odbywa się równomiernie w całej jego objętości. W danej chwili czasowej niewielka warstwa filtra o określonej grubości odpowiada za znaczną część zjawiska wyłapywania ze strumienia aerozolu cząstek stałych i ciekłych. Pokrycie włókien tej warstwy depozytami prowadzi do zmiany ich sprawności ze względu na występowanie zjawisk: poślizgu cząstek na zwilżonym cieczą włóknie, przemieszczania się zatrzymanej na włóknie cieczy po jego powierzchni i w głąb filtra oraz ociekania, wtórnego porywania cząstek zdeponowanych z powierzchni włókien, zmiany efektywnej średnicy włókna, zmiany lokalnej gęstości upakowania oraz zmiany lokalnej prędkości linowej przepływu. Początkowo, to włókna wierzchniej warstwy filtra odpowiadają głównie za jego sprawność, a w miarę upływu czasu, rolę tę przejmują włókna znajdujące się głębiej. Formuje się lokalna strefa najintensywniejszego wychwytu cząstek, przemieszczająca się wewnątrz struktury filtra, która po pokonaniu całej grubości filtra skutkuje stabilizacją sprawności na nowym poziomie wynikającym ze zmian które zaszły w całej objętości filtra (Osiągnięcie 2).



Rys. 18. Zmiana w czasie sprawności filtracji dla różnych filtrów podczas filtracji aerozolu mieszanego cząstek stałych i kropel oleju [91]

Koncepcja pozwalająca na opis zmian zachodzących we wnętrzu filtra podczas filtracji aerozolu wieloskładnikowego, która korzysta z niejako wirtualnego podziału filtra na

mniejsze warstwy działające i rozpatrywane niezależne od siebie (wpisująca się bezpośrednio w koncepcję filtrów wielowarstwowych) omówiona została szerzej w rozdziale 5.6 w kontekście rozkładu masy depozytów we wnętrzu struktury filtra (Osiągnięcie 7).

Zmierzone podczas filtracji aerozolu zawierającego jedynie cząstki stałe spadki ciśnienia na różnych filtrach charakteryzują się stałym w czasie wzrostem wartości (A2, Fig. 5 i Fig. 7). Równocześnie wyniki uzyskane dla wszystkich układów zawierających krople oleju, niezależnie od jego koncentracji i niezależnie od obecności w strumieniu aerozolu cząstek stałych, charakteryzują się brakiem występowania nagłego wzrostu oporów przepływu przez filtry. Wynika to częściowo z różnicy w strumieniach masowych pomiędzy aerozolem kropel wody oraz aerozolem kropel oleju, ale również z różnic w zwilżalności włókien pomiędzy tymi cieczami (A4).

Zgodność wyników zmierzonej i obliczonej, z wykorzystaniem zależności teoretycznych klasycznej teorii filtracji, początkowej sprawności testowanych filtrów, określono poprzez wykorzystanie współczynnika SIF.

$$Sprawność_{zmierzona} = SIF \cdot Sprawność_{obliczona} \quad (26)$$

Odchylenie jego wartości od jedności określa jak bardzo założenia i ograniczenia przyjęte podczas obliczeń odbiegają od rzeczywistości lub alternatywnie jak dobrze opisują one rzeczywiste efekty i zjawiska, rządzące procesem filtracji i zachodzące podczas filtracji danego aerozolu, mające wpływ na sprawność procesu w przypadku danej włókniny filtracyjnej.

Najlepszą zgodność uzyskano dla wszystkich filtrów w przypadku filtracji aerozolu cząstek stałych, najgorszą natomiast w przypadku filtracji aerozolu zawierającego jedynie krople oleju. Wraz ze wzrostem udziału kropel oleju w aerozolu wartość współczynnika SIF spada (A2, Table 3). Wartość sprawności obliczona w oparciu o klasyczną teorię filtracji dla wszystkich testowanych filtrów była zawyżona względem wartości zmierzonej (wartość wsp. SIF poniżej jedności). Jednocześnie dość dobrą zgodnością charakteryzują się wyniki uzyskane dla filtrów składających się z włókien o najmniejszym rozmiarze F1 i 2F1. Przyczyny występowania tej zależności poszukiwać należy w charakterze rozkładów rozmiarów włókien testowanych filtrów. Filtry zbudowane z włókien o średniej średnicy włókna, charakteryzują się wąskim rozkładem rozmiarów (rozdział 4.5), co lepiej wpisuje się w koncepcję wykorzystania pojedynczej wartości włókna, charakterystycznej dla całego filtra, stosowaną w obliczeniach klasycznej teorii filtracji. Z tego względu zdecydowano się uwzględnić w dalszych obliczeniach (A3 i A4) lepsze odwzorowanie rzeczywistego rozkładu rozmiarów włókien (Osiągnięcie 3). Wyznaczoną dla filtrów jednorodnych wartość

współczynnika z powodzeniem wykorzystano, aby poprawić dokładność przewidywania dla zbadanych filtrów wielowarstwowych o różnej kolejności warstw (A2, Table 4). Traktując filtry wielowarstwowe jako złożenie działających niezależnie od siebie filtrów jednorodnych. Przy wykorzystaniu, skorygowanej współczynnikiem SIF, sprawności filtrów jednorodnych, osiągnięto dobrą zgodność wartości obliczonej i zmierzonej. Wskazuje to na brak występowania w przypadku filtrów wielowarstwowych dodatkowych efektów prowadzących do powiększenia nieidealności odwzorowania rozpatrywanego systemu. Efektów takich spodziewać się można było ze względu na występowanie pewnej nieciągłości struktury filtra wielowarstwowego, występującej na powierzchni kontaktu oddzielnych warstw filtra, gdzie istnieje wyraźna granica pomiędzy włóknami kolejnych warstw (Osiągnięcie 7).

Podobną zależność, malejącej wraz ze wzrostem udziału kropel oleju, wartości współczynnika SIF uzyskano dla filtrów włókninowych, pochodzących z alternatywnego układu i wykorzystanych w pracy [91]. Wyniki te przedstawia Tabela 3. Dodatkowo w oparciu o wyniki opublikowane w A2 oraz te otrzymane dla filtrów pozyskanych z wykorzystaniem alternatywnego układu, wskazać można następującą zależność: w przypadku filtracji aerozolu cząstek stałych ze wzrostem grubości filtra zbudowanego z tych samych włókien, wartość współczynnika SIF rośnie, a więc wyznaczona w oparciu o klasyczną teorię wartość sprawności jest bardziej zaniżona, jednakże w przypadku pozostałych aerozoli nie da się wskazać takiej zależności, co świadczy o znacznie bardziej skomplikowanym charakterze układów zawierających krople oleju (Osiągnięcie 6).

Koncepcja współczynnika SIF może być użytecznym narzędziem pozwalającym na poprawę przewidywań klasycznej teorii filtracji, zwłaszcza w przypadku układów filtrów i aerozoli których charakterystyka znacznie odbiega od założeń klasycznej teorii.

Tabela 3. Wartość współczynnika SIF obliczona na podstawie, zmierzonej i obliczonej początkowej sprawności filtrów wyprodukowanych na alternatywnym układzie

Aerozol	grafit			olej			grafit+olej		
Filtr	pomiar (%)	KTF (%)	SIF (-)	pomiar (%)	KTF (%)	SIF (-)	pomiar (%)	KTF (%)	SIF (-)
nano	90,1	89,5	1,01	64,7	93,1	0,70	75,4	92,2	0,82
PBT	24,3	18,0	1,35	15,5	14,8	1,04	18,6	16,3	1,14
f5/50	38,0	28,5	1,33	22,0	25,2	0,87	22,5	27,1	0,83
f5/100	66,5	46,1	1,44	25,9	41,0	0,63	39,4	43,7	0,90
f13/50	18,9	13,3	1,42	10,2	10,1	1,01	14,9	11,6	1,29
f13/100	37,6	24,4	1,54	14,3	18,7	0,76	20,5	21,2	0,97

Zgodność odwzorowania przez model, rzeczywistych zmian zachodzących w filtrze podczas procesu filtracji oraz ich wpływ na sprawność filtra, sprowadzono do całkowitej zmiany masy badanych filtrów po określonym czasie trwania procesu filtracji. Wykorzystany model korzystał z koncepcji opisu zmian średnicy włókien, gęstości upakowania oraz liniowej prędkości przepływu przez filtr, zachodzących w czasie trwania procesu filtracji na skutek depozycji cząstek aerozolowych, zaproponowanej we wcześniejszej pracy (A1). Dodatkowo uwzględniono w nim wpływ efektywnej gęstości depozytów aerozolowych w przypadku filtracji cząstek stałych oraz aerozoli mieszanych, co zostało omówione w rozdziale 4.4 (Osiągnięcie 3).

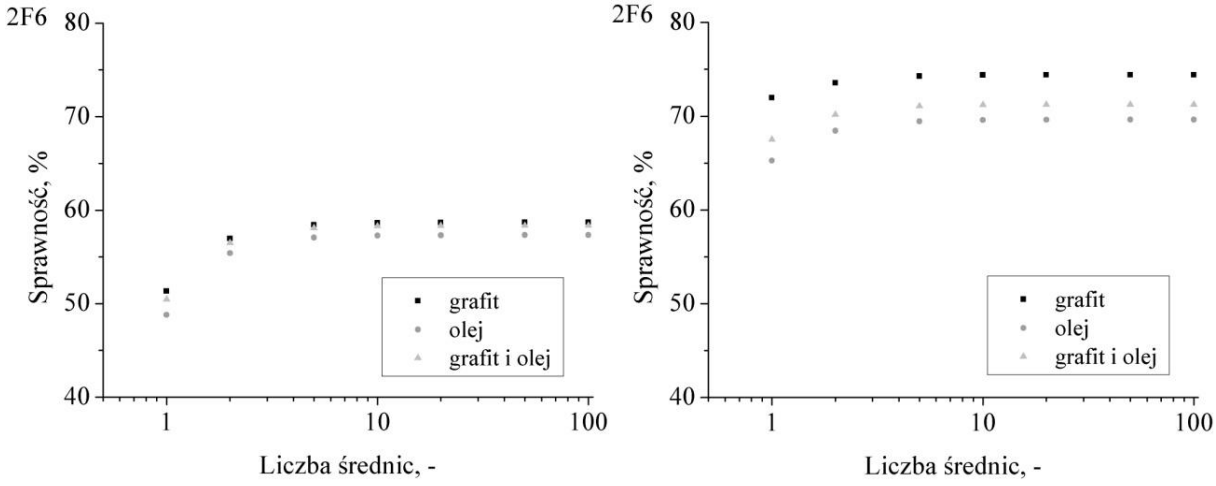
Najmniejszą wartość błędu wyznaczenia zmiany masy uzyskano w przypadku filtracji aerozolu zawierającego grafitowe cząstki stałe, co zgadza się z wynikami uzyskanymi dla grafitu w przypadku poprzedniej pracy (A1). We wszystkich układach zawierających krople oleju, błąd wyznaczenia był większy, a wskazania modelu były wyraźnie zaniżone. Również w tym przypadku średni rozmiar włókien tworzących daną warstwę miał wyraźny wpływ na wyniki. Filtry zbudowane z włókien o mniejszym rozmiarze cechują się wyższą wartością błędu względnego pomiędzy wartością obliczoną i zmierzoną. Za błąd ten częściowo odpowiada obcięty po prawej stronie rozkład rozmiarów (rozdział 4.6), który w przypadku aerozolu kropel oleju nie był na tym etapie badań uwzględniony, wrócono do tego zagadnienia przy okazji późniejszych rozważań (A4). Efekt ten jest bardziej zauważalny w przypadku aerozolu o większej koncentracji kropel oleju, dla którego krople o dużych rozmiarach, niewidoczne dla układu pomiarowego, miały znaczący udział w całkowitej masie potencjalnych depozytów zatrzymanych na włóknach filtra.

5.3. Artykuł trzeci

Na podstawie wyników zebranych w artykule drugim zdecydowano się zwiększyć dokładność przewidywania modelu obliczeniowego poprzez uwzględnienie w nim lepszego opisu rozkładu rozmiarów włókien. W trakcie prowadzonych analiz napotkano ograniczenie związane z niezależnym rozpatrywaniem poszczególnych rozmiarów cząstek aerozolowych oraz włókien. Kiedy rozmiar cząstek aerozolowych jest większy od rozmiaru włókien, część rozwiązań teoretycznych przestaje działać. Dlatego konieczne okazało się oparcie modelu o rozwiązania empiryczne. Na tym etapie przeprowadzono również analizę wpływu wartości kroku czasowego na wyniki otrzymane modelem obliczeniowym co przedstawiono w rozdziale 4.7. Trzeci artykuł porusza zagadnienia: wpływu dokładniejszego odwzorowania rozkładu rozmiarów włókien na obliczoną, z wykorzystaniem zależności teoretycznych

i empirycznych sprawność filtracji, wykorzystania zależności empirycznych do opisu sprawności poszczególnych mechanizmów filtracji, oraz zmiany średniego rozmiaru cząstki aerozolowej penetrującej przez warstwę filtracyjną.

Na podstawie, zaobserwowanego wcześniej efektu wpływu średniego rozmiaru włókien tworzących filtr i symetryczności tego rozkładu na zgodność wyników zmierzonych doświadczalnie z wynikami obliczeniowymi, zdecydowano się zbadać wpływ dokładności odwzorowania rozkładu rozmiarów włókien na sprawność filtracji (Osiągnięcie 3 i 5). Wykorzystano do tego dwa zestawy zależności opisujących sprawność poszczególnych mechanizmów filtracji, zestaw teoretyczny i empiryczny. W tym celu rozkład rozmiarów, zawierający dla każdego filtra sto wartości, uszeregowanych rosnąco, a następnie podzielono na przedziały o określonej liczebności. Każdy taki przedział odpowiedzialny był za jednakowy udział w całkowitej liczbie włókien. Dla każdego przedziału obliczono wartość średnią średnicy włókien opisującą dany przedział. Następnie dla każdej wartości średniej średnicy wyznaczono sprawność całkowitą filtra, a udział w sprawność wypadkowej filtra określono na podstawie opisywanego przez taką średnicę udziału w całkowitym rozkładzie rozmiarów. Przykładowo w przypadku podziału na dziesięć przedziałów, każdy z nich składał się z dziesięciu zmierzonych wartości średnicy włókien, a wyznaczona dla ich wartości średniej sprawność, odpowiadała za dziesiątą część wypadkowej sprawności filtra. Analizę przeprowadzono dla trzech najważniejszych badanych aerozoli-aerozolu jednoskładnikowego cząstek stałych, aerozolu kropel oleju oraz aerozolu mieszanego zawierające oba rodzaje cząstek. Porównanie pomiędzy wynikami uzyskanymi dla zależności teoretycznych i empirycznych przedstawia Rys. 19.



Rys. 19. Porównanie wpływu liczby średnic opisujących rozkład rozmiarów włókien na sprawność filtracji wyznaczoną z wykorzystaniem zależności teoretycznych (po lewej) i empirycznych (po prawej) podczas filtracji różnych aerozoli dla filtra 2F6

Zarówno w przypadku filtra 2F6 jak i F8 (A3, Fig. 5a) obliczona wartość sprawności filtra rośnie, kiedy w obliczeniach uwzględniane jest dokładniejsze odzwierciedlenie rzeczywistego rozkładu rozmiarów włókien filtra. Tendencja ta jest jednakowa w przypadku wszystkich testowanych aerozoli jednoskładnikowych i wieloskładnikowych niezależnie od koncentracji cząstek aerozolowych. Dodatkowo wartość uzyskana na podstawie zależności empirycznych była wyższa niż ta uzyskana z wykorzystaniem zależności teoretycznych. Wpływ liczby przedziałów (wartości średnich średnic) na które podzielono, rzeczywisty uzyskany na podstawie zdjęć SEM rozkład rozmiarów włókien, stabilizuje się dla liczby większej niż dziesięć. Ponieważ implementacja w modelu większej liczby przedziałów nie przyniosłaby zauważalnej poprawy przewidywania, a wiązałaby się ze wzrostem czasu potrzebnego na przeprowadzenie obliczeń, liczbę dwudziestu średnic uznano na tym etapie za wystarczające odwzorowanie całości rozkładu i wykorzystywano w dalszych rozważaniach (A3). Natomiast, aby przy zachowaniu rozsądnej dokładności, dalej skrócić czas potrzebny na obliczenia oraz iteracyjne dopasowanie wartości współczynników, w modelu obliczeniowym (A4 oraz obliczenia przedstawione w rozprawie) liczba ta została zmniejszona do wartości dziesięciu średnic. Podział rozkładu rozmiarów na przedziały i wyznaczenie dla nich średniej wartości, wiąże się również z uzyskaniem przedziałów opisywanych przez średnią wartość średnicy włókna o wartości poniżej jednego mikrometra, zwłaszcza w przypadku filtrów zbudowanych z włókien o niewielkich rozmiarach. Prowadzić to może, podczas obliczeń prowadzonych dla cząstek i kropel o rozmiarach zbliżających się do rozmiaru włókna, do uzyskania nierzeczywistych (ujemnych) wartości sprawności mechanizmu bezwładnościowego przy zastosowaniu zależności teoretycznych. Dodatkowo na podstawie zdjęć SEM i analizy przeprowadzonej w poprzednim artykule (A2) wiadomo że, dochodzi do efektywnego zatrzymywania kropel o rozmiarach wyraźnie przekraczających rozmiar włókien, a więc sprawność w przypadku takiej kombinacji rozmiarów nie może być pominięta. Dlatego, chcąc uwzględnić w dalszych rozważaniach lepsze odwzorowanie rozkładu rozmiarów włókien budujących dany filtr, zdecydowano się korzystać z zależności empirycznych w przypadku których dla odpowiednio dobranych wartości współczynników efekt ten i związane z nim problemy, trudności i ograniczenia nie występują (Osiągnięcie 3 i 4). Ponadto średni rozmiar cząstki za filtrem, na początku trwania procesu filtracji, wyznaczony z wykorzystaniem zależności empirycznych, nawet bez odpowiedniego dostosowania wartości współczynników w nich wykorzystywanych, wykazywał lepszą zgodność ze zmierzoną wartością średniego rozmiaru cząstki, niż ma to miejsce w przypadku zależności teoretycznych (A3, Fig. 5b).

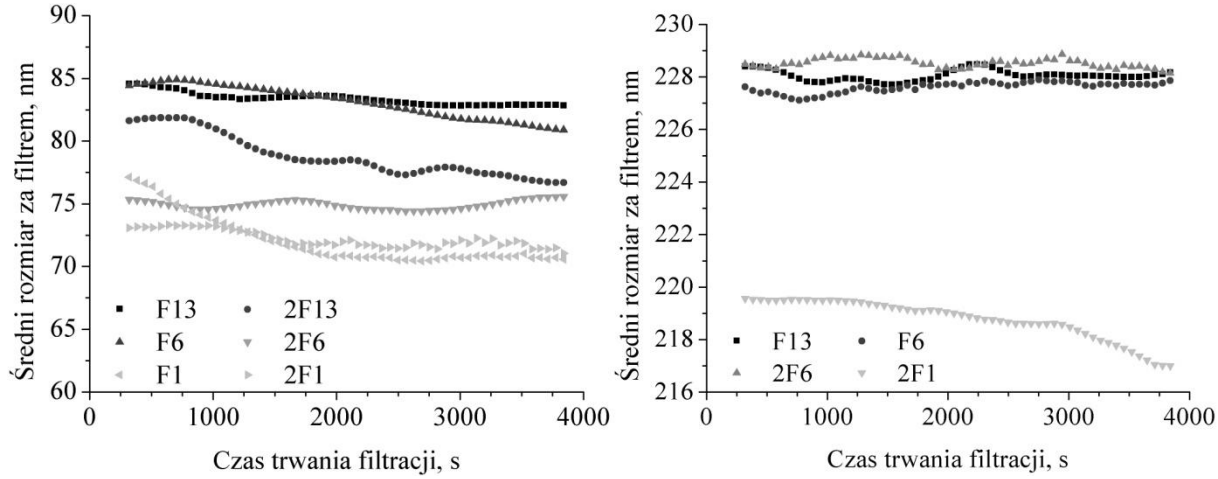
Wpływ, na wartość średniego rozmiaru cząstki za filtrem, ma głównie sprawność badanego filtra względem każdej frakcji cząstek aerozolowych. Ponadto zmiana sprawności frakcyjnej w czasie trwania procesu filtracji może wpływać na średni rozmiar cząstki za filtrem. Jeśli sprawność usuwania cząstek o największych rozmiarach rośnie szybciej od sprawności usuwania cząstek o najmniejszych rozmiarach (mowa tutaj o rozmiarach znajdujących się po prawej i po lewej stronie rozkładu średnic) to wzrost sprawności frakcyjnej, spowodowany zmianami w strukturze filtra na skutek depozycji na powierzchni włókien cząstek aerozolowych, prowadzący do bardziej skutecznego usuwania cząstek o dużych rozmiarach, skutkował będzie spadkiem średniego rozmiaru cząstki za filtrem. Możliwy jest również przypadek symetrycznego wzrostu sprawności usuwania cząstek o dużych i małych rozmiarach, prowadzący do ogólnego wzrostu sprawności usuwania cząstek aerozolowych, ale bez wyraźnej zmiany w średnim rozmiarze cząstki penetrującej przez warstwę filtra.

Koncepcja wyznaczenia średniego rozmiaru cząstki za filtrem może być komplementarnym składnikiem analizy działania filtra i może być użyteczna podczas dobierania warstw tworzących filtr wielowarstwowy. Pozwoliłoby to na budowę filtra, którego poszczególne warstwy odpowiadają za usuwanie różnych rozmiarów cząstek aerozolowych z różną sprawnością umożliwiając rozłożenie ładunku depozytów pomiędzy warstwami takiego filtra i jeśli jest to pożądane spowolnienie zmian zachodzących we wnętrzu filtra (Osiągnięcie 8).

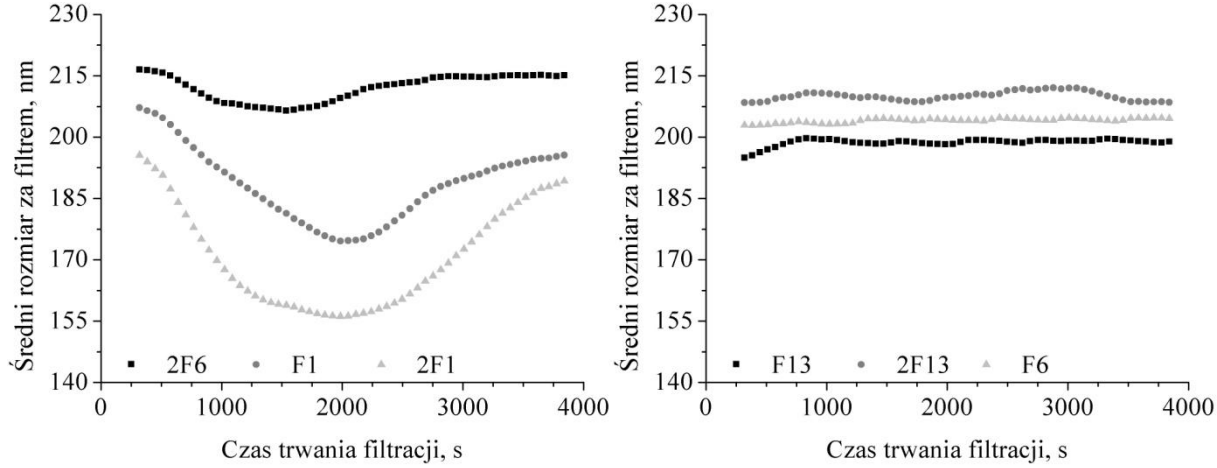
Obliczona na podstawie zmierzonych wartości sprawności frakcyjnych, zmiana średniego rozmiaru cząstki aerozolowej za filtrem jest wyraźnie wyższa od wartości obliczonych z wykorzystaniem zależności teoretycznych i empirycznych (A3, Fig. 6-10). Dodatkowo większą wartość zmian eksperymentalnych uzyskano dla filtra o mniejszym rozmiarze i większej sprawności włókien (filtr F6), niż dla filtra zbudowanego z włókien o większym rozmiarze (filtr F8). Ponadto w przypadku filtra o większej grubości (filtr 2F6), a więc większej ogólnej sprawności zakres zmian był większy. W przypadku wyników eksperymentalnych uwidacznia się wpływ tworzenia wtórnych włókien filtra, zbudowanych ze zdeponowanych cząstek stałych, prowadzący do wzrostu skuteczności usuwania cząstek o największych rozmiarach i spadku średniego rozmiaru cząstek za filtrem. Wyniki otrzymane dla filtra 2F6 wskazują na występowanie minimum średniego rozmiaru cząstki za filtrem co koresponduje z występowaniem maksimum sprawności dla tego filtra (A2, Fig. 4). W ogólności żaden model obliczeniowy nie zbliżył się nawet do skali zmian obserwowanych w rzeczywistości. Ponadto w większości przypadków, nawet charakter zmian przewidywany z wykorzystaniem zależności teoretycznych i empirycznych nie zgadza się z tymi uzyskanymi podczas eksperymentów. Wskazuje to na konieczność uwzględnienia w modelu dodatkowych

efektów i dokładniejszego odwzorowania zmian zachodzących we wnętrzu filtra oraz na powierzchni włókien z uwzględnieniem różnic występujących w różnych obszarach (powierzchnia filtra oraz rejony znajdujące się głębiej) filtra. Pomocna w tym może być analiza zachowania poszczególnych filtrów, oparta o średni rozmiar cząstki za filtrem, podczas filtracji różnych aerozoli (Rys. 20-22).

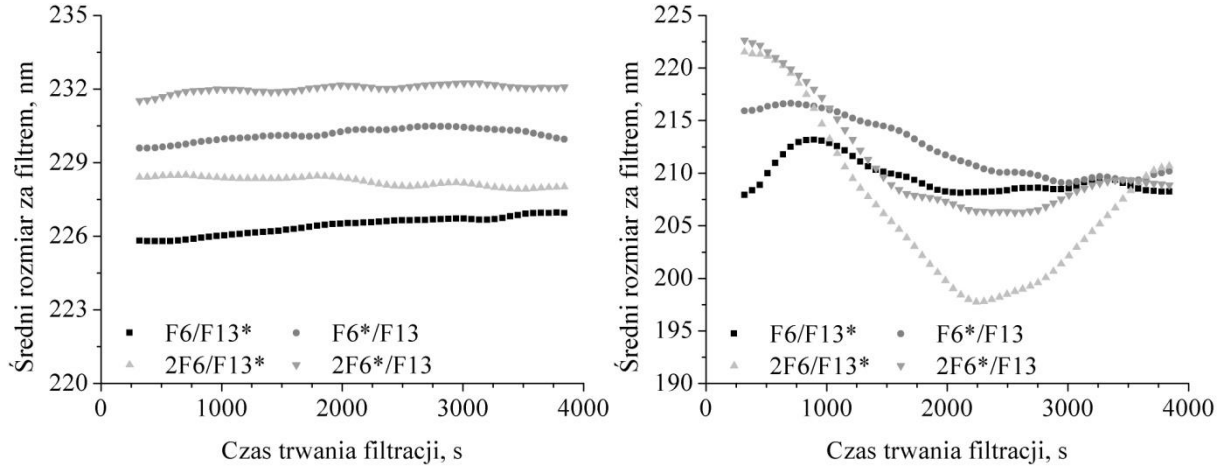
Porównanie wyników średniego rozmiaru cząstki za filtrem ze zmianami ogólnej sprawności filtra (A2, Fig. 4) podczas filtracji aerozolu zawierającego jedynie cząstki stałe, wskazuje na powiązanie wzrostu sprawności filtracji ze spadkiem średniego rozmiaru cząstki (Rys. 20) dla filtrów charakteryzujących się największymi zmianami (2F13, F6, F1), a dla pozostałych filtrów występuje równocześnie mniejsza zmiana sprawności i średniego rozmiaru cząstki. Podczas filtracji aerozolu zawierającego jednie krople oleju, widoczny brak zmian sprawności filtracji w czasie trwania procesu widoczny jest również poprzez zmiany średniego rozmiaru cząstki za filtrem (Rys. 20). Natomiast w przypadku filtra 2F1, gdzie zmiana ta występuje, spadek sprawności skutkuje jednocześnie spadkiem średniego rozmiaru kropli za filtrem, co może wskazywać na spadek sprawności frakcyjnej usuwania cząstek o najmniejszym rozmiarze, wynikający ze wzrostu rozmiaru włókien pokrytych depozytami, skutkujący spadkiem skuteczności mechanizmu dyfuzyjnego. Filtracja aerozolu mieszanego, zawierającego zarówno cząstki stałe jak i krople oleju pokazuje, że w przypadku tych filtrów dla których występowanie maksimum sprawności jest wyraźniejsze (A2, Fig. 4d, e, f), również zmiana średniego rozmiaru za filtrem jest znacznie bardziej efektowana niż ma to miejsce dla pozostałych filtrów (Rys. 21). W przypadku filtrów wielowarstwowych, podczas filtracji aerozolu zawierającego jedynie krople oleju, kolejność warstwy (warstwa wchodząca w kontakt z aerozolem jako pierwsza oznaczona jest *) ma większe znaczenie dla wartości średniego rozmiaru kropli (Rys. 22), ale niewielkie dla wypadkowej sprawności (A2, Fig. 6). Dla aerozolu mieszanego w przypadku obydwu konfiguracji filtrów obserwowany jest podobny charakter zmian, średni rozmiar cząstki za filtrem ma większą wartość kiedy pierwsza jest warstwa o większej sprawności (Osiągnięcie 8).



Rys. 20. Średni rozmiar cząstek za filtrem podczas filtracji aerozolu zawierającego jedynie cząstki stałe (po lewej) i krople oleju (po prawej)



Rys. 21. Średni rozmiar cząstek za filtrem podczas filtracji aerozolu zawierającego zarówno cząstki stałe jak i krople oleju



Rys. 22. Średni rozmiar cząstek za filtrem podczas filtracji aerozolu zawierającego jedynie krople oleju (po lewej) i zawierającego zarówno cząstki stałe jak i krople oleju (po prawej)

5.4. Artykuł czwarty

W ramach ostatniego artykułu sprawdzono dokładność działania modelu obliczeniowego po uwzględnieniu szerszego zakresu rozmiarów cząstek aerozolowych, o konieczności czego wspomniano przy okazji rozdziału 4.6. Skorzystano z modelu opartego o równania empiryczne pozwalające na oddzielne rozpatrywanie i uwzględnienie w modelu poszczególnych rozmiarów cząstek aerozolowych oraz rozmiarów włókien filtra, których wpływ na wynik obliczeń przedstawiono w treści trzeciego artykułu. Do modelu wprowadzono ograniczenia wynikające z rozkładu masy we wnętrzu filtra, o czym więcej przy okazji podrozdziału 5.6. Powrócono również do badań z wykorzystaniem aerozolu kropel wody. Pozwoliło to na sformułowanie modelu umożliwiającego przewidywania zmian oporów przepływu przez filtr w trakcie jego obładowywania. Rozwój tego elementu modelu kontynuowano, co zaowocowało jego uogólnieniem i uproszczeniem przedstawionym poniżej. Ogólnie, artykuł ten omawia zagadnienia: uwzględnienia w modelu kropel oleju z poza obserwowanego zakresu rozmiarów, lepszego dopasowania wartości współczynników w zależnościach empirycznych sprawności mechanizmów filtracji, przewidywania zmian spadku ciśnienia na filtrze w oparciu o zależność empiryczną oraz wpływ dodatku cząstek stałych i kropel cieczy (oleju) o odmiennych właściwościach na spadek ciśnienia podczas filtracji aerozolu kropel wody.

Ze względu na znaczny wpływ na objętość i masę potencjalnych, możliwych do zatrzymania depozytów (o czym wspomniano wcześniej w rozdziale 4.6), w pracy uwzględniono szerszy zakres rozmiarów kropel oleju, wykraczający poza zakres możliwy do obserwowania przy wykorzystaniu stosowanego układu pomiarowego. W tym celu prawą stronę rozkładu rozmiarów ekstrapolowano z wykorzystaniem zależności wykładniczej (A4, Fig. 7). Pozwoliło to na osiągnięcie znacznie lepszej zgodności pomiędzy wynikami obliczeniowymi oraz zmierzoną zmianą masy filtrów w porównaniu z wcześniejszymi wynikami, uzyskanymi bez uwzględnienia tego zakresu rozmiarów kropel (A4, Table 4).

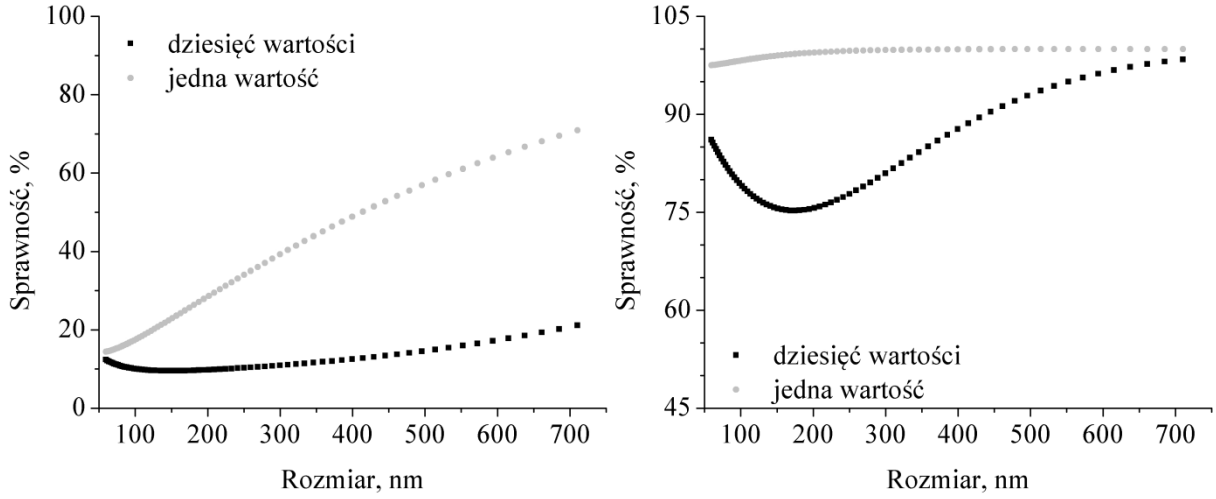
Drugim elementem który miał wpływ na poprawę zgodności wyników było wykorzystanie zależności empirycznych, pozbawionych wspomnianych przy okazji artykułu A3 ograniczeń, o wartości współczynników dobranych w oparciu o zebrane dane doświadczalne (A4, Table 3). Wartości te dobrano na podstawie sprawności frakcyjnej filtra względem cząstek aerozolowych na początku trwania procesu filtracji z uwzględnieniem wpływu każdej frakcji rozmiarów włókien tworzących danych filtr. Każdy z filtrów zbudowanych z włókien o tym samym średnim rozmiarze charakteryzowany był poprzez te same wartości współczynników. Różnice pomiędzy wartościami współczynników dla filtrów o różnych włóknach były

efektem niekompletnego oddania różnic w sprawnościach mechanizmów wynikających i zależnych od różnicy rozmiarów włókien. Różnice wartości współczynników nie powinny występować pomiędzy filtrami o różnych włóknach jeśli model obliczeniowy jest wystarczająco kompletny i szczegółowy. Wskazuje to na konieczność rozbudowania modelu w celu uwzględnienia dodatkowych efektów występujących w układzie, mających wpływ na sprawność frakcyjną filtracji, takich jak rzeczywista efektywność zatrzymania cząstek aerozolowych, która może wiązać się z rozpadem cząstek aerozolowych na mniejsze na skutek kontaktu z włóknem lub zatrzymania jedynie części kropli, zwłaszcza w przypadku kropel o rozmiarach większych od rozmiaru włókien (Osiągnięcie 3).

Natomiast porównanie dopasowanych wartości współczynników (A4, Table 3) z wartościami literaturowymi (równanie 14, 16, 18) wskazuje, że dyfuzja małych kropel zachodzi zgodnie z opisem teoretycznym (dobra zgodność zmiany wartości współczynników ze zmianą rozmiarów włókien filtra dla którego współczynnik został dopasowany). Największe różnice wartości, zarówno pomiędzy filtrami zbudowanymi z różnych włókien jak i wartościami literaturowym, widoczne dla mechanizmu bezpośredniego zaczepienia, wskazują na występowanie w układzie istotnych różnic w interakcji kropel z włóknami filtra. Dodatkowo interakcje te nie są zgodne z przewidywaniami teoretycznymi, może być to następstwem występowania destruktywnych dla struktury kropel częściowych interakcji z włóknem i ich niekompletnego zatrzymania na powierzchni włókien, widoczne jest to również w przypadku mechanizmu bezwładnościowego. Skutkiem tego jest niższa sprawność mechanizmu bezpośredniego zaczepienia (mniejsza od literaturowej wartość współczynników). W przypadku mechanizmu bezwładnościowego, mniejsza od literaturowej wartość wykładnika oraz wyższa mnożnika, wiąże się z wyższą wartością sprawności przewidywaną w oparciu o zależność empiryczną w porównaniu z teoretyczną wartością sprawności. Wyższa od teoretycznej sprawność tego mechanizmu wynikać może, z wyższego rzeczywistego wpływu liniowej prędkości przepływu, który nie jest prawidłowo odwzorowany w przypadku filtra zbudowanego z włókien charakteryzujących się szerokim rozkładem rozmiarów (rozwiązania teoretyczne opierają się o pojedynczą wartość średnicy włókien budujących filtr).

Dodatkowo porównanie sprawności frakcyjnych (Rys. 23), wyznaczonych w oparciu o dopasowane w A4 wartości współczynników z wykorzystaniem jednej i dziesięciu wartości średnicy włókien opisujących całość rozkładów rozmiarów wskazuje, że zgodność w przypadku kropel o dużych rozmiarach (zakres najwyższego wpływu mechanizmu bezwładnościowego) jest znacznie bardziej wyraźna dla filtra 2F1. Tłumaczy to częściowo

różnice w wartościach współczynników otrzymanych dla mechanizmu bezwładnościowego w kontekście szerszego rozkładu rozmiarów włókien filtra 2F6 (rozdział 4.5)



Rys. 23. Porównanie sprawności frakcyjnych dla jednej i dziesięciu wartości opisujących rozkład rozmiarów włókien dla filtra 2F6 (po lewej) i 2F1 (po prawej)

Natomiast w przypadku zależności wykorzystanej do opisu spadku ciśnienia na filtrze zdecydowano się na niezależne rozpatrywanie każdego z filtrów. Wartości wyznaczone zostały na podstawie spadku ciśnienia, gęstości upakowania oraz liniowej prędkości przepływu, zmierzonych w dwóch punktach czasowych - na początku i na koniec trwania procesu filtracji. Nie uwzględniają one opisanych w artykule efektów mających wpływ na stosowalność tej zależności (A4, podrozdział 3.5). Otrzymane wartości (A4, Table 5) pozwalają wnioskować, że różnice pomiędzy filtrami zbudowanymi z różnych włókien wynikają głównie z wpływu gęstości upakowania filtra (wyraźna różnica w wartości współczynnika G i niewielka w przypadku współczynnika H). Natomiast różne wartości współczynnika F dla filtrów zbudowanych z tych samych włókien wynikają z nieidealności modelu i jego ograniczeń.

Model zmian spadku ciśnienia na filtrze z wprowadzonymi ograniczeniami zmian gęstości upakowania oraz maksymalnej zmiany średnicy włókna, pozwolił uzyskać charakter zmian zgodny jakościowo, ale nie ilościowo, ze zmianami obserwowanymi podczas eksperymentów (Osiągnięcie 3). Porównanie wyników zmian spadku ciśnienia (A4, Fig. 9-10) z wyznaczonymi zmianami masy filtrów (A4, Table 4) pokazuje, że w przypadku filtra 2F6 dla którego obliczona zmiana masy zgadzała się z wartością obliczoną, również przewidywania zmian spadku ciśnienia zgadzają się ze zmianami zmierzonymi. Dla filtrów, których model zaniża zmianę masy (F1, 2F1), również obliczona zmiana spadku ciśnienia jest

niższa niż ta zmierzona, a dla filtra F6 w przypadku którego zmiana masy jest zawyżona, podobną zależność obserwujemy dla przewidywanego spadku ciśnienia. Ponieważ model ten opiera się o zmiany struktury filtra wynikające z objętości i masy zatrzymanych depozytów to kluczowym dla jego prawidłowości jest dokładny model zmian sprawności filtra w czasie trwania procesu filtracji. Pomóc może tutaj, wspomniany przy okazji A2 i późniejszego podrozdziału 5.6, podział filtra na mniejsze rozpatrywane oddzielnie i niezależnie od siebie cieńsze warstwy.

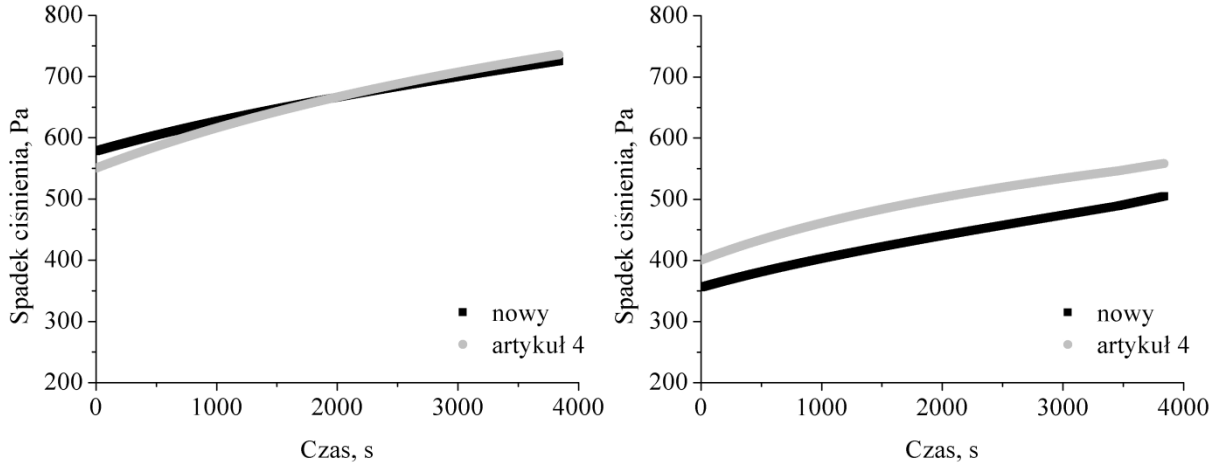
Ponadto bazując na modelu zaprezentowanym w A4, możliwe było jego poprawienie, polegające na uwzględnieniu obecności wykładnika *I* przy wartości liniowej prędkości przepływu w zależności stosowanej do opisu zmian spadku ciśnienia podczas trwania procesu filtracji. Nową postać tej zależności przedstawia równanie 26. Rozwiązanie to pozwoliło przypisać zmianom prędkości przepływu, nieuwzględnioną w poprzednim modelu część zmienności zależną od zmian gęstości upakowania filtra i zmian średnicy włókien filtra, które wynikają z zapełniania filtra depozytami. Dzięki temu w przypadku wszystkich filtrów możliwe było zastosowanie jednej wartości współczynników G, H, I. Jedynym pozostałym współczynnikiem, którego wartość zależy od rodzaju filtra jest współczynnik F, a jego wartość zmienia się wraz ze zmianą średnicy włókien budujących dany filtr (Osiągnięcie 3). Wartości współczynników otrzymane dla poprawionego modelu, przy zastosowaniu tych samych filtrów, aerozolu oraz metodyki obliczeń wykorzystanych w A4 przedstawia tabela 4. Wykresy Rys. 24 i Rys. 25 przedstawiają zgodność pomiędzy zmianami spadku ciśnienia obliczonymi z wykorzystaniem poprawionego modelu oraz tego zaprezentowanego w A4. Zgodność ta we wszystkich przypadkach jest zadowalająca przy uwzględnieniu wymienionej wcześniej zależności dokładności modelu od poprawności przewidywania zmiany masy filtra.

$$P = F \cdot \mu \cdot u^I \cdot Z \cdot \frac{\alpha^G}{d^H} \tag{26}$$

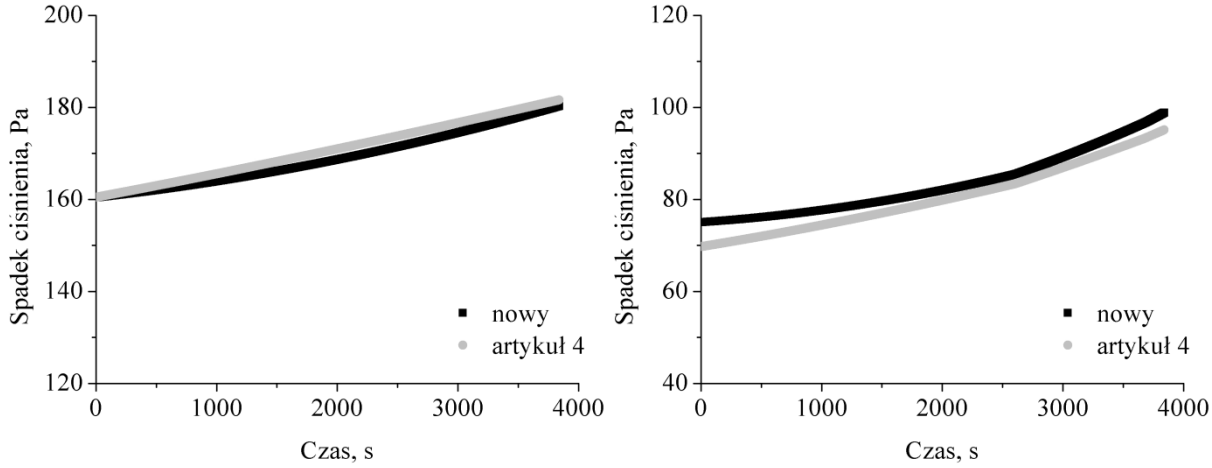
P – spadek ciśnienia (Pa), μ – lepkość płynu (Pa·s), u – średnia liniowa prędkość przepływu w filtrze (m/s), Z – grubość filtra (m), α – gęstość upakowania (-), d – średnica włókna (m).

Tabela 4. Wartości współczynników w poprawionym modelu spadku ciśnienia

Filtr	F	G	H	I
2F1	1,104	0,385	2,184	3,641
F1				
2F6	4,912			
F6				



Rys. 24. Zmiany spadku ciśnienia w czasie trwania filtracji aerozolu zawierającego jedynie krople oleju wyznaczone dla filtrów 2F1 (po lewej) i F1 (po prawej)



Rys. 25. Zmiany spadku ciśnienia w czasie trwania filtracji aerozolu zawierającego jedynie krople oleju wyznaczone dla filtrów 2F6 (po lewej) i F6 (po prawej)

W przypadku filtracji układów wieloskładnikowych, w tym trójskładnikowych, zawierających krople wody zaobserwować można dwa charakterystyczne etapy procesu filtracji (A4, Fig. 11). Przed gwałtownym skokiem oporów oraz po wystąpieniu tego skoku. Występowanie nagłego wzrostu oporów jest skutkiem zapełniania się wierzchniej warstwy filtra depozytami, co prowadzi do zmniejszenia się powierzchni dostępnej dla przepływu aerozolu. W skrajnym przypadku niemal cała powierzchnia przekroju zostaje zapełniona co prowadziłoby do wzrostu oporu do wartości nieskończonej. Jednakże wynikający z tego szybki wzrost różnicy ciśnień przed i za filtrem prowadzi do penetracji znajdujących się w wierzchniej warstwie filtra depozytów w głąb filtra, a spadek ciśnienia stabilizuje się na nowym poziomie wynikającym z rozłożenia depozytów w całej objętości filtra. Następujący dalej wzrost

oporów związany jest z transportem depozytów ciekłych po powierzchni włókien oraz ociekaniem nadmiaru zdeponowanej cieczy. Z upływem czasu, przemieszczająca się ciecz zapełnia powoli niezajęte wcześniej obszary filtra, jednocześnie większość przepływu aerozolu przez filtr odbywa się utworzonymi w jego wnętrzu kanałami. Istnienie tego typu kanałów preferowanych przez przemieszczający się we wnętrzu filtra strumień aerozolu został opisany w pracach opisujących dogłębnie wpływ zwilżalności cząstek aerozolowych na spadek ciśnienia filtrów [110,111].

Ponadto nawet niewielki masowo dodatek oleju powoduje poprawę zwilżalności włókien i ułatwia kroplom wody penetrację w głąb filtra oraz przemieszczanie się zdeponowanej cieczy (Osiągnięcie 9). Prowadzi to do niższego spadku ciśnienia w porównaniu z aerozolem zawierającym jedynie krople wody. Dodatek cząstek stałych do aerozolu trafiającego na filtr, pomimo niewielkiej masy potencjalnych depozytów stałych, ma wyraźny wpływ na spadek ciśnienia (Osiągnięcie 9). Jest on wyraźnie wyższy i wzrasta szybciej w porównaniu z aerozolem zawierającym jedynie mieszaninę różnych kropel. Obecność cząstek stałych w aerozolu oraz ich depozycja na włókach filtra prowadzi do wzrostu sprawności efektywnego wychwytywania innych cząstek aerozolowych oraz prowadzi do powiększenia równowagowej pojemności filtra względem cząstek (o czym więcej przy okazji podrozdziału 5.5 oraz w A2) (Osiągnięcie 7).

Dodatkowo jak zauważono w artykule, przy okazji przewidywań spadku ciśnienia na filtrze, wykonanych z użyciem zaproponowanego modelu spadku ciśnienia, podczas filtracji aerozolu zawierającego krople wody, w przypadku różnych filtrów obliczony czas występowania skoku spadku ciśnienia musi być skorygowany o podobną wartość. Pozwala to wnioskować, że za rozbieżność wyników odpowiedzialna nie jest struktura filtra, a raczej efekty związane z aerozolem lub całym układem niezależne od filtra, takie jak ociekanie cieczy, resuspensja kropel z powierzchni włókien lub przemieszczanie cieczy we wnętrzu filtra oraz wpływ zwilżalności włókien przez cząstki aerozolowe (Osiągnięcie 3).

5.5. Wpływ depozytów stałych na strukturę filtra podczas filtracji aerozolu mieszanego

Kiedy prowadzona jest wyłącznie filtracja cząstek stałych, to pomimo niewielkiej zmiany masy filtra, powstające z cząstek stałych aglomeraty, które charakteryzują się dużo niższą w porównaniu z litymi cząstkami gęstością efektywną (Rys. 11), mogą zajmować dużą część objętości struktury wewnętrznej filtra (Rys. 12) lub tworzyć strukturę wyrastającą poza nominalny kontur filtra. Jednakże w przypadku filtracji aerozoli mieszanych ze względu na interakcje występujące na powierzchni włókien pomiędzy cząstkami stałymi i kroplami,

wspomniana charakterystyczna struktura zbudowana z cząstek stałych nie ma możliwości się całkowicie uformować (Rys. 13) [34,35]. Jeśli na danym obszarze filtra lub włókna, w początkowej fazie trwania procesu filtracji, wykształci się szczątkowa struktura cząstek stałych, to wpływać może ona na poprawę sprawności zatrzymywania zarówno cząstek stałych jak i kropel, pełniąc funkcję dodatkowych punktów zaczepienia. W dalszych etapach, kiedy powierzchnia włókien zostaje pokryta cieczą, może dochodzić natomiast do powstawania, pokrytych cieczą widocznych skupisk cząstek stałych (Rys. 13), które poprzez powiększenie powierzchni właściwej włókien prowadzić mogą do wzrostu pojemności filtra względem depozytów ciekłych. Efekt ten jest widoczny w A2 Fig. 8 jako wyższy wzrost masy filtra podczas filtracji aerozolu mieszanego oraz w A4 Fig. 11 jako szybszy wzrost oporów przepływu przez filtr podczas filtracji aerozolu mieszanego zawierającego cząstki stałe. Dlatego właśnie nawet niewielka masa potencjalnych depozytów stałych, w porównaniu z depozytami ciekłymi (strumienie masowe poszczególnych cząstek - tabela 2) prowadzi do tego, że cząstki stałe są jedynie modyfikatorem charakteru zmian, główną siłę napędową stanowią natomiast depozyty ciekłe. Obecność depozytów stałych silnie wpływa na potencjał depozytów ciekłych do zmiany struktury wewnętrznej filtra, nawet wtedy gdy depozyty stałe nie mają możliwości samodzielnie na nią wpływać poprzez wykształcenie rozbudowanej struktury przestrzennej. Efekt ten musi zostać uwzględniony w końcowej postaci modelu obliczeniowego, co pozwoli na dokładniejsze przedstawienie zmian zachodzących we wnętrzu filtra podczas filtracji aerozolu wieloskładnikowego.

5.6. Rozkład masy depozytów we wnętrzu filtra wielowarstwowego

W celu dokładniejszego przewidywania działania filtra oraz zmian zachodzących w jego wnętrzu w czasie trwania procesu filtracji, uzyskać należy lepsze odzwierciedlenie rzeczywistego rozkładu depozytów we wnętrzu filtra. Ponieważ zarówno zmiany sprawności filtra jak i zmiany oporów przepływu przez filtr, zależne są od rozmieszczenia zatrzymanych na włóknach filtra cząstek aerozolowych, kluczowe dla poprawnie działającego modelu obliczeniowego jest zwiększenie rozdzielczości przestrzennej rozkładu depozytów. W obecnie stosowanym modelu filtr traktowany jest jako jednorodna i równomiernie zmieniająca się w całej swojej objętości warstwa. Zapewnienie większej rozdzielczości, pozwalającej na uwzględnienie różnic występujących w różnych obszarach filtra, może zostać oparte o niejako wirtualny podział filtra na mniejsze warstwy, rozpatrywane i działające niezależnie od siebie. Wpisuje się to również w koncepcję filtrów wielowarstwowych, tyle że

filtr zbudowany jest z początkowo jednakowych warstw o dużo mniejszej grubości, a właściwości danej warstwy zmieniają się w czasie trwania procesu filtracji.

W tym celu w dalszych badaniach podjęto próbę dokładniejszego opisu rozkładu masy, a co za tym idzie również objętości depozytów, poprzez wykorzystanie koncepcji filtrów wielowarstwowych. Ze względu na integralną budowę badanych włóknin, niemożliwe było obserwowanie efektów związanych z rozkładem masy depozytów we wnętrzu pojedynczej warstwy filtracyjnej. Charakterystyczny dla filtrów włókninowych nieregularny układ włókien w ich strukturze wewnętrznej, tworzący trójwymiarową plątaninę, w przypadku próby podziału warstwy na mniejsze doprowadziłby do uzyskania warstw o nierównych masach i grubościach, co uniemożliwiłoby poprawną interpretację wyników. Dlatego zdecydowano się skierować w przeciwnym kierunku i jako pierwszy etap tej analizy wykorzystano filtry wielowarstwowe zbudowane z pięciu warstw podstawowych, wykorzystywanych w badaniach filtrów F1 i 2F6. Filtry te wybrano ze względu na ich odmienne sprawności względem badanych aerozoli oraz ponieważ charakteryzują się one zbliżoną grubością warstwy filtracyjnej. W badaniach wykorzystano aerozol zawierający krople oleju oraz aerozol zawierający cząstki stałe grafitu i krople oleju. Koncentracje tych aerozoli były identyczne jak w poprzednich badaniach, podobnie jak warunki prowadzenia procesu filtracji (A4). Filtrację prowadzono przez trzy godziny, tak aby możliwe było zaobserwowanie zmian zachodzących w rozkładzie masy, na skutek zapełniana filtra depozytami oraz przemieszczania się depozytów w strukturze wewnętrznej filtra. Dodatkowo w celu obserwacji przemieszczania się depozytów pomiędzy warstwami filtra, po zakończonych trzech godzinach filtracji, przez dodatkową godzinę przez filtry przepuszczano strumień powietrza pozbawiony jakichkolwiek cząstek aerozolowych (prędkość przepływu była stała, brak strumieni z generatorów skompensowano zwiększeniem strumienia powietrza). Rozkład masy pomiędzy poszczególne warstwy, tak skonstruowanego filtra wielowarstwowego, dla wszystkich punktów czasowych przedstawiono na wykresach Rys. 26-30.

Wyniki dla aerozolu zawierającego jedynie cząstki stałe grafitu pominięto na tym etapie, ponieważ masa potencjalnych depozytów grafitowych jest na tyle niska, że błąd pomiarowy zmiany masy warstwy miałby zbyt duże znaczenie utrudniające poprawne odczytanie i interpretację wyników. Natomiast celem dodatku cząstek stałych oraz badań z wykorzystaniem aerozolu mieszanego nie było zbadanie bezpośredniego wpływu depozytów stałych na zmianę masy filtra. Badania te przeprowadzono w celu zbadania pośredniego wpływu zdeponowany cząstek stałych na wyłapywanie i zatrzymanie na filtrze

depozytów ciekłych, tak jak zostało to opisane w podrozdziałach 4.6 i 5.5 oraz w artykułach przy okazji omawiania A2 Fig. 8 i A4 Fig. 11.

Maksymalna, zmierzona dla filtra składającego się z pojedynczej warstwy F1, zmiana masy wynosiła 1,6% początkowej masy próbki, natomiast minimalna zmiana, zaobserwowana dla filtra 2F6, wynosiła 0,33% (A2). Dodatkowo na podstawie badań przeprowadzonych, dla wyprodukowanych z wykorzystaniem alternatywnego układu, filtrów pięciowarstwowych (f5/100) [91] oszacowano, że przyrost masy poszczególnych warstw filtracyjnych, w przypadku trwającej cztery godzin filtracji aerozolu zawierającego jedynie grafit, nie przekracza 0,4%. Z tego względu zdecydowano się nie przedstawiać tych rozkładów w porównaniach. Efekt wpływu grafitu jest natomiast ważny i wyraźny, ale głównie ze względu na formowanie przez depozyty stałe aglomeratów (Rys. 6), które stają się punktami zaczepienia dla pozostałych wychwytywanych przez filtr cząstek, co zwiększa sprawność filtra. Równocześnie obecność aglomeratów, które mogą być pokrywane warstwą cieczy, prowadzi do zwiększania równowagowej pojemności struktury filtra względem cząstek zdeponowanych, poprzez wzrost powierzchni właściwej włókien (i aglomeratów) dostępnej dla depozytów ciekłych.

Przedstawiona na wykresach zmiana masy każdej z warstw odniesiona jest do całkowitej masy depozytów zatrzymanej przez wszystkie warstwy filtra wielowarstwowego. Zmierzony rozkład masy pomiędzy poszczególne warstwy filtra wielowarstwowego, składającego się z pięciu warstw filtra F1, przedstawia Rys. 26. Dla obydwu zbadanych aerozoli po pierwszej godzinie prowadzenia procesu filtracji ponad dziewięćdziesiąt procent masy depozytów zostało zatrzymanych na pierwszej warstwie filtra. Zmiana masy drugiej warstwy w przypadku aerozolu zawierającego jedynie krople oleju jest nieznacznie wyższa od zmiany obserwowanej dla aerozolu mieszanego. Po zakończeniu drugiej godziny, nastąpił niewielki spadek tego udziału kosztem drugiej w kolejności warstwy. Trzecia godzina przyniosła największy spadek udziału pierwszej warstwy, oraz największy wzrost udziału warstwy drugiej. Godzina przedmuchiwania filtra wielowarstwowego czystym powietrzem niezawierającym cząstek aerozolowych, doprowadziła do mniejszej niż w przypadku trzeciej godziny zmiany udziału warstwy pierwszej, dodatkowo udział warstwy drugiej pozostał niemal niezmienny. Natomiast wzrost udziału warstwy trzeciej jest zbliżony do spadku udziału warstwy pierwszej. Biorąc pod uwagę brak zmiany w przypadku warstwy drugiej, wnioskować można że na skutek przedmuchiwania filtra jedynie powietrzem nastąpiło przemieszczenie masy depozytów pomiędzy tymi trzema warstwami, a warstwa druga pozostała w stanie równowagi dynamicznej i wyczerpała swoją pojemność względem

zatrzymywanych depozytów (około trzydzieści procent całkowitej masy depozytów i pięćdziesiąt procent masy warstwy). Efekty te miały identyczny charakter w przypadku zarówno aerozolu zawierającego cząstki grafitu i krople oleju jaki i aerozolu kropel oleju. Wysoka początkowa sprawność filtra F1 oraz jego wysoka sprawność w trakcie całego eksperymentu sprawiła, że efekt obecności grafitowych cząstek stałych nie miał możliwości się wyraźnie zamanifestować w przypadku rozkładu masy pomiędzy poszczególne warstwy filtra wielowarstwowego (z wyłączeniem niewielkiej różnicy w przypadku drugiej warstwy po godzinie filtracji).

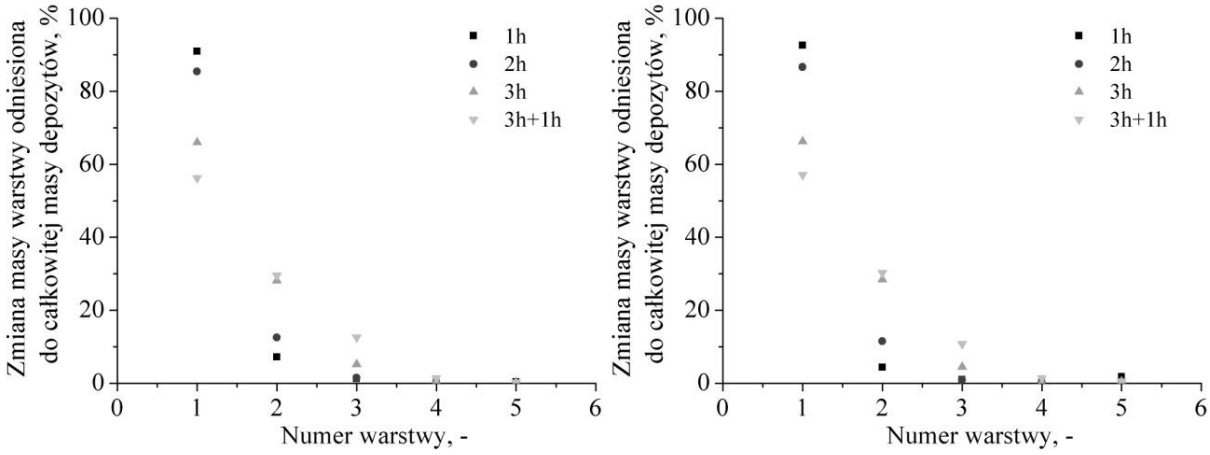
Natomiast w przypadku filtra 2F6 (Rys. 27), o mniejszej sprawności warstwy, efekt obecności grafitu w strumieniu aerozolu i jego depozycji na filtrze jest wyraźnie widoczny. Udział pierwszej warstwy filtra wielowarstwowego we wszystkich rozpatrywanych punktach czasowych jest wyraźnie wyższy niż ma to miejsce w przypadku aerozolu zawierającego jedynie krople oleju. Dodatkowo następuje wzrost tego udziału po drugiej godzinie filtracji, co może wskazywać, że zatrzymane przez pierwszą warstwę cząstki stałe spowodowały wzrost sprawności tej warstwy i przyczyniły się do poprawy zdolności do retencji depozytów przez tę warstwę. Występujący po trzeciej godzinie filtracji oraz dodatkowej godzinie przedmuchiwania spadek udziału pierwszej warstwy jest niższy niż miało to miejsce w przypadku filtra F1. Ponadto część cząstek stałych mogła penetrować przez pierwszą warstwę (ze względu na jej niższą sprawność A2) i być zatrzymana dopiero na drugiej warstwie. Poskutkowało to wyższym udziałem drugiej warstwy po trwającym godzinę przedmuchiwaniu strumieniem zawierającym jedynie powietrze, ze względu na większą równowagową pojemność tej warstwy. Podobnie jak w przypadku filtra F1, spadek udziału pierwszej warstwy, podczas przedmuchiwania, odbył się kosztem dalszych warstw. Jednakże niewielki wzrost udziału warstwy trzeciej po czterech godzinach trwania procesu pozwala wnioskować, że warstwa druga nie zdążyła wyczerpać całej swojej pojemności. Na skutek filtracji aerozolu zawierającego jedynie krople oleju, w każdym punkcie czasowym rozkład masy pomiędzy poszczególne warstwy był stały i niezmienny. Udział każdej warstwy w tym przypadku odpowiadał jej efektywnej sprawności, a przedmuchiwanie powietrzem nie miało zauważalnego wpływu na rozkład.

Dodatkowo wyniki całkowitej masy depozytów zatrzymanych na filtrze wielowarstwowym wskazują, że w przypadku filtra F1, nie występuje istotna różnica pomiędzy obydwoma testowanymi aerozolami, natomiast w przypadku filtra 2F6 masa depozytów zatrzymanych, po trzech godzinach prowadzenia filtracji aerozolu zawierającego dodatkowo grafitowe cząstki stałe, była o 9% wyższa niż masa depozytów zatrzymanych podczas filtracji aerozolu

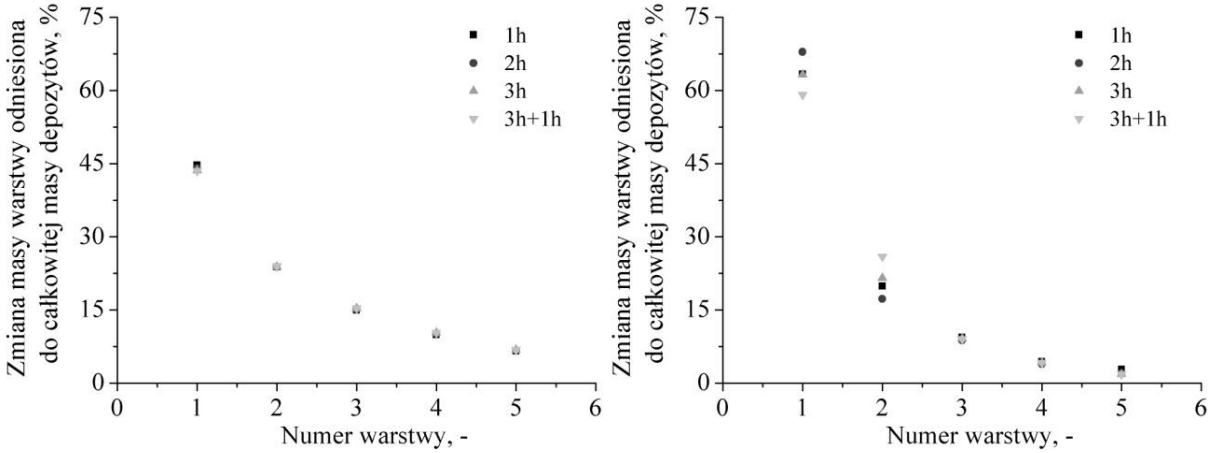
zawierającego jedynie krople oleju. Różnica w zachowaniu obydwu filtrów wynika z mniejszej ogólnej sprawności filtra 2F6 (A2, Fig. 4), z tego względu efekt obecności depozytów stałych staje się bardziej zauważalny.

Podobny wpływ dodatku do aerozolu cząstek stałych zaobserwowano podczas filtracji z wykorzystaniem filtrów f5/100 pozyskanych alternatywną metodą [91]. Zbadano dodatkowo wpływ liniowej prędkości przepływu przez filtr na rozkład masy pomiędzy poszczególne warstwy filtra wielowarstwowego podczas trwającej cztery godziny filtracji, a uzyskane wyniki przedstawiają wykresy Rys. 28-30. Prędkość równa 0,13 m/s była najniższą prędkością możliwą do uzyskania przy zachowaniu stałego strumienia masowego cząstek ciekłych pomiędzy wszystkimi eksperymentami. Wyniki wskazują, że wraz ze wzrostem prędkości przepływu z 0,13 m/s przez 0,2 m/s do 0,4 m/s, zmiana masy pierwszych warstw filtra maleje, co związane jest z mniejszą całkowitą masą depozytów zatrzymanych na filtrze wielowarstwowym. Jest to następstwem zarówno lepszej penetracji cząstek aerozolowych w głąb filtra jak i jednoczesnego, wymuszonego przepływem, przemieszczania się depozytów pomiędzy warstwami filtra wielowarstwowego oraz występowania zjawiska ociekania i resuspensji. Dodatkowo wskazuje na to podobny charakter rozkładu masy w przeliczeniu na całkowitą masę depozytów zatrzymanych na filtrze. Niezależnie od prędkości przepływu, we wszystkich przypadkach, zauważalna jest wyraźnie wyższa zmiana masy pierwszej warstwy filtra, kiedy filtrowany jest aerozol mieszany, zawierający obydwa rodzaje cząstek aerozolowych.

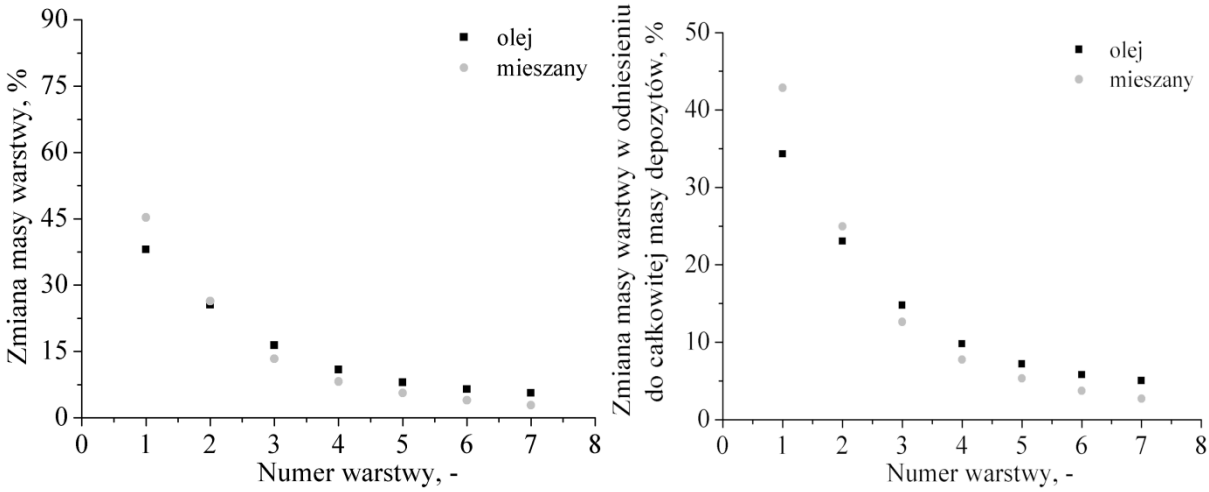
Uzyskane wyniki, pomimo zmiany skali procesu i efektu, potwierdziły konieczność przyjęcia pewnych ograniczeń odnoszących się do maksymalnej i równowagowej zmiany masy danej warstwy oraz wpływu na nie obecności w strumieniu aerozolu cząstek stałych. Ograniczenia takie zaproponowano i zastosowano podczas obliczeń opisanych w A4. Jednakże dokładne wartości i charakter tych ograniczeń wymagają dalszych badań tego zagadnienia. Pozwoliłoby to poprawić dokładność w przypadku filtrów o wysokiej sprawności, gdzie rozkład pomiędzy warstwami jest wyraźnie wpływowy i zmienia się dynamicznie.



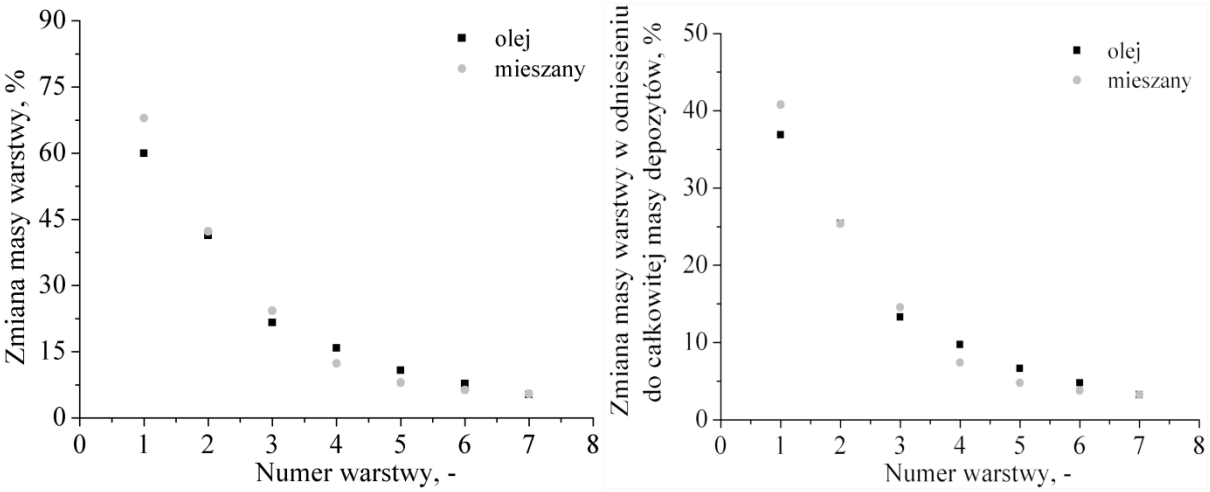
Rys. 26. Rozkład masy depozytów pomiędzy warstwami filtra wielowarstwowego w przypadku filtracji aerozolu zawierającego jedynie olej (po lewej) oraz grafit i olej (po prawej) dla filtra F1



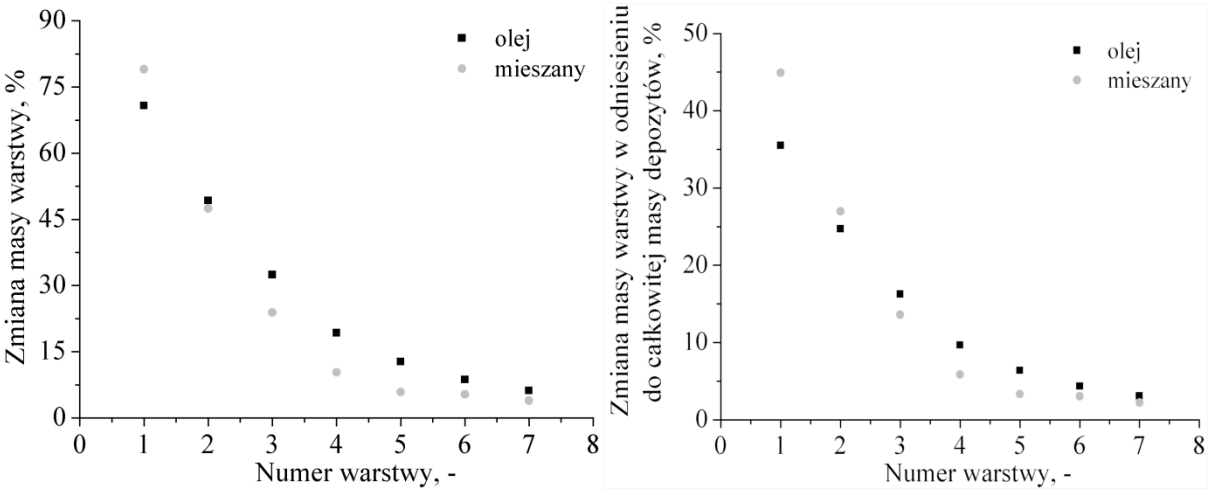
Rys. 27. Rozkład masy depozytów pomiędzy warstwami filtra wielowarstwowego w przypadku filtracji aerozolu zawierającego jedynie olej (po lewej) oraz grafit i olej (po prawej) dla filtra 2F6



Rys. 28. Rozkład masy depozytów pomiędzy warstwami filtra wielowarstwowego f5/100 po czterogodzinnej filtracji z prędkością liniową przepływu równą 0,4 m/s, zmiana odniesiona do początkowej masy warstwy (po lewej) i całkowitej masy depozytów (po prawej)



Rys. 29. Rozkład masy depozytów pomiędzy warstwami filtra wielowarstwowego f5/100 po czterogodzinnej filtracji z prędkością liniową przepływu równą 0,2 m/s, zmiana odniesiona do początkowej masy warstwy (po lewej) i całkowitej masy depozytów (po prawej)



Rys. 30. Rozkład masy depozytów pomiędzy warstwami filtra wielowarstwowego f5/100 po czterogodzinnej filtracji z prędkością liniową przepływu równą 0,13 m/s, zmiana odniesiona do początkowej masy warstwy (po lewej) i całkowitej masy depozytów (po prawej)

6. Podsumowanie i osiągnięcia naukowe

Poniżej, w formie krótkich podpunktów wymieniono główne osiągnięcia naukowe pracy, zrealizowanie których umożliwiło udowodnienie postawionych w pracy hipotez badawczych. Natomiast ich bardziej uszczegółowione podsumowanie zawarto w kolejnych akapitach. Dodatkowo przedstawiono wskazówki pomocne w przypadku projektowania filtrów, a także perspektywy dalszych badań w tematyce filtracji aerozoli wieloskładnikowych z wykorzystaniem filtrów włókninowych.

Główne osiągnięcia naukowe przedstawionej pracy to:

1) sposób dostosowania istniejącego stanowiska pomiarowego oraz metodyki badań do procesu filtracji aerozoli wieloskładnikowych zawierających cząstki ciała stałego, krople oleju oraz krople wody przy wykorzystaniu filtrów włókninowych,
2) zidentyfikowanie i wyjaśnienie istnienia charakterystycznego dla aerozolu zawierającego cząstki ciała stałego i krople oleju maksimum sprawności filtracji oraz minimum średniego rozmiaru cząstki za filtrem,
3) modyfikacja istniejących modeli teoretycznych i empirycznych umożliwiająca zastosowanie ich w przypadku modelowania zmian zachodzących w filtrze w następstwie jego zapełniania zdeponowanymi cząstkami aerozolowymi,
4) określenie wpływu dokładności opisu rozkładu rozmiarów włókien tworzących filtr na sprawność filtracji wyznaczoną z modeli oraz wyznaczenie krytycznej liczby przedziałów, nie mniejszej niż dziesięć, wymaganej do jego poprawnego odwzorowania,
5) wykazanie ograniczenia stosowalności zależności teoretycznych oraz konieczności stosowania zależności empirycznych do opisu filtracji aerozolu kropel oleju i aerozoli wieloskładnikowych zawierających krople oleju,
6) wyjaśnienie efektów występujących wewnątrz filtra charakterystycznych dla filtracji układów wieloskładnikowych (formowanie na powierzchni włókien zwartych aglomeratów zamiast rozbudowanej przestrzennie struktury cząstek stałych, istnienie maksimum sprawności podczas zapełniania filtra depozytami),
7) opis efektów związanych z rozkładem masy w przypadku filtracji z wykorzystaniem włókninowych filtrów wielowarstwowych (obecność depozytów stałych zwiększa sprawność filtracji i równowagową pojemność filtra względem depozytów ciekłych),
8) zaproponowanie metody doboru filtrów wielowarstwowych do danego zastosowania na bazie zmian w czasie średniego rozmiaru cząstek za filtrem,
9) identyfikacja wpływu dodatkowych składników aerozolu na opory przepływu przez filtr w przypadku filtracji aerozolu zawierającego krople wody.

Modyfikacja stanowiska oraz metodyka badań

W ramach pracy zaprezentowano sposób modyfikacji stanowiska pomiarowego pozwalający na jego dostosowanie do prowadzenia badań procesu filtracji aerozoli wieloskładnikowych (4.1). Do istniejącego stanowiska, powstałego w oparciu o normę ISO 21083, dodano dodatkowe generatory cząstek aerozolowych. Aerozol cząstek stałych generowano z grafitu przy wykorzystaniu generatora iskrowego, aerozol kropel oleju (DEHS) przy wykorzystaniu generatora z dyszą Laskina, a aerozol kropel wody korzystając z ultradźwiękowego generatora mgły. Odpowiednie połączenie strumieni opuszczających generatory umożliwiło badania z wykorzystaniem aerozolu wieloskładnikowego zawierającego różne koncentracje cząstek ciała stałego, kropel oleju i kropel wody (4.3). Stabilność pracy generatorów oraz generowania aerozolu wieloskładnikowego została potwierdzona pomiarami koncentracji cząstek aerozolu wieloskładnikowego w czasie. W trakcie tych pomiarów wskazano konieczność usunięcia z układu pomiarowego osuszacza, tak aby poprawić stabilność pomiaru koncentracji (5.1). Usunięcie osuszacza wiązało się również z koniecznością zastąpienia kropel wody kroplami oleju, których koncentracja mogła być mierzona wykorzystanym układem pomiarowym koncentracji. Możliwość pomiaru koncentracji kropel oleju była istotna dla przypadku badań sprawności filtracji oraz jej zmian w czasie trwania procesu. W części układu pomiarowego odpowiadającej za pobieranie próbki aerozolu do badań koncentracji zastosowano, w celu zapewnienia prawidłowego odczytu koncentracji, izokinetyczny pobór próbki aerozolu przy wykorzystaniu odpowiedniego rozmiaru sondy pomiarowej (4.2). Dostosowano również metodę pomiaru koncentracji i wyznaczania sprawności filtra, tak aby możliwe było prowadzenie badań zmian sprawności w czasie trwania procesu filtracji, o odpowiednio wysokiej rozdzielczości czasowej, pozwalającej na dokładnie śledzenie zachodzących zmian (4.1). W tym celu zrezygnowano ze sposobu pomiaru koncentracji przed i za filtrem, proponowanego przez normę, polegającego na przełączaniu pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi. W jej miejsce zastosowano ciągły pomiar w punkcie za filtrem i porównanie mierzonych, zmiennych w czasie, koncentracji z wyznaczoną uprzednio koncentracją bez filtra stanowiącego przeszkodę dla strumienia aerozolu (4.1). Umożliwiło to badanie zmian ogólnej sprawności filtra oraz zmian średniego rozmiaru cząstki za filtrem, zachodzących w czasie trwania procesu filtracji na skutek zapełniania filtra zdeponowanymi cząstkami aerozolowymi, a także powiązanie ich ze zmianami oporów przepływu (3.4). Wiedza na temat tych, zachodzących w czasie filtracji, zmian umożliwia lepsze dopasowanie wykorzystywanego filtra do danego zastosowania. Przeprowadzone na tak przygotowanym stanowisku pomiary pozwoliły zaobserwować

niektóre zjawiska charakterystyczne dla filtracji aerozoli wieloskładnikowych, które nie są obserwowane podczas filtracji wyłącznie cząstek stałych lub kropel.

Sprawność filtra podczas filtracji aerozolu wieloskładnikowego

W toku prowadzonych doświadczeń, udało się zidentyfikować występowanie maksimum na krzywej zmian w czasie sprawności filtracji, podczas obładowywania filtra depozytami aerozolu wieloskładnikowego składającego się z cząstek stałych i kropel oleju (5.2). Związane jest z nim jednoczesne występowanie minimum średniego rozmiaru cząstki za filtrem. Wskazuje to, że zmiany sprawności ogólnej wynikają ze zmiennych w czasie sprawności frakcyjnych usuwania z aerozolu cząstek o różnych wielkościach. Stosowane w badaniach aerozole różnią się wyraźnie średnią wielkością cząstek (4.6). Krople oleju charakteryzują się ponad dwukrotnie większym średnim rozmiarem w porównaniu do cząstek stałych. Pozwala to wnioskować, że obserwowany początkowo spadek średniego rozmiaru cząstki za filtrem wynika z szybszego wzrostu sprawności usuwania kropel oleju w porównaniu z cząstkami stałymi. Prowadzi to do większego udziału mniejszych cząstek i wypadkowego spadku średniego rozmiaru. Obserwowany wzrost sprawności osiąga po pewnym czasie maksimum, po którym następuje jego spadek. Dzieje się tak ze względu na występowanie lokalnej strefy najintensywniejszego wychwytu cząstek, która przemieszcza się wzdłuż wnętrza filtra (5.2). Jej istnienie związane jest z wieloma zachodzącymi jednocześnie we wnętrzu filtra efektami. Dochodzić może do:

- poślizgu cząstek na zwilżonym cieczą włóknie,
- przemieszczania się zatrzymanej na włóknie cieczy po jego powierzchni i w głąb filtra lub jej ociekania wymuszonego przepływem aerozolu oraz oddziaływaniem grawitacyjnym,
- wtórnego porywania uprzednio zdeponowanych na powierzchni włókien cząstek,
- zmiany efektywnej średnicy włókna, gęstości upakowania danego obszaru filtra i lokalnej prędkości liniowej przepływu,
- lokalnego wzrostu sprawności, występującego ze powodu formowania przez cząstki stałe szczątkowych struktur pełniących funkcję dodatkowych punktów zaczepienia dla przepływających przez filtr cząstek aerozolowych.

Zwłaszcza w przypadku tego ostatniego efektu, postępujące w czasie trwania filtracji pokrycie włókien przez warstewkę cieczy prowadzić może do niwelowania wpływu depozytów stałych (5.5). Występowanie tego maksimum jest bardziej wyraźne w przypadku filtrów o większej sprawności i mniej wyraźne kiedy zmniejszona zostaje koncentracja kropel oleju w filtrowanym aerozolu. Większa sprawność filtra prowadzi do szybszego pokrywania

włókien filtra cząstkami stałymi, a następnie przykrycia ich olejem. Jednocześnie mniejsza koncentracja kropel oleju spowalnia ten proces. Potwierdza to hipotezę o związku występowania maksimum sprawności z depozycją i wpływem cząstek stałych na filtrację kropel oleju.

Modyfikacja modeli obliczeniowych

W celu dostosowania istniejących modeli obliczeniowych opartych o klasyczną teorię filtracji i koncepcję sprawności pojedynczego włókna, do modelu wprowadzono wyrażenia zależne od czasu trwania filtracji (3.4). Opisują one zmianę gęstości upakowania filtra, średnicy włókien i liniowej prędkości przepływu w zależności od objętości zatrzymanych depozytów. Związek z czasem występuje poprzez zmienną w czasie skumulowaną objętość depozytów zatrzymanych na filtrze w wyniku filtracji. Objętość depozytów wyznaczana jest w oparciu o liczbę zatrzymanych w danej jednostce czasu cząstek i kropel. Liczba depozytów wynika z koncentracji cząstek aerozolowych o danym rozmiarze przepływających przez filtr oraz sprawności filtra dla tego rozmiaru cząstek (wyznaczonej na podstawie modelu sprawności pojedynczego włókna). Niezależne rozpatrywanie depozytów różnych rodzajów (stałych i ciekłych) umożliwiło wykorzystanie zaproponowanego modelu do opisu procesu filtracji aerozoli wieloskładnikowych. Znając objętość osadzonych na włóknach depozytów możliwe jest, przy wykorzystaniu wprowadzonych zależności wyznaczenie chwilowych wartości gęstości upakowania, średnic pokrytych depozytami włókien oraz prędkości przepływu przez filtr (3.4). Powtórzenie obliczeń (3.5), przy zastosowaniu odpowiedniego kroku czasowego (4.7), aż osiągnie się pożądany całkowity czas trwania procesu filtracji pozwala przewidywać zmiany zachodzące na skutek depozycji cząstek aerozolowych. Przeliczenie objętości zatrzymanych depozytów na ich masę przy wykorzystaniu gęstości, a w przypadku cząstek stałych - efektywnej gęstości ich aglomeratów, umożliwiło weryfikację poprawności działania modelu. Wykonano to poprzez porównanie całkowitej obliczonej masy zatrzymanych depozytów ze zmierzoną zmianą masy badanej próbki filtra. W oparciu o model zmian masy filtra możliwe było sporządzenie modelu zmian oporów przepływu przez filtr (5.4). Bazował on na zależnościach empirycznych w przypadku których na podstawie danych doświadczalnych (grubości filtra, gęstości upakowania, lepkości płynu, prędkości liniowej przepływu, oraz średnicy włókien) dopasowane były odpowiednie wartości współczynników. Dzięki nim i wprowadzonym do modelu wyrażeń zależnych od czasu (gęstość upakowania, prędkość liniowa, średnica włókien) możliwe było przewidywanie zmian oporów przepływu przez filtr w czasie trwania procesu filtracji (5.4). Jednakże, dokładność tego opisu jest ściśle

powiązana z dokładnością przewidywania zmian masy filtra. Co za tym idzie końcowa dokładność tego modelu była z tego względu ograniczona. Pokazano natomiast możliwości uogólnienia przewidywań dla różnych filtrów, poprzez dodanie wykładnika przy wyrażeniu odpowiadającym za liniową prędkość przepływu (5.4). Pozwoliło to uwzględnić w opisie silniejszy wpływu prędkości liniowej przepływu na opory, wynikający z istnienia we wnętrzu filtra obszarów martwych dla przepływu, formujących się w czasie jego zapełniania depozytami. Obydwa przedstawione modele wykazały dość dobrą zgodność z wynikami doświadczalnymi, natomiast na obecnym etapie prac jest ona silnie zależna od odpowiedniego dopasowania wartości współczynników oraz narzuconych sztucznie ograniczeń zmiany rozmiarów włókien filtra i efektywnego udziału depozytów w zmianach struktury wewnętrznej filtra (3.5). Istnienie tych ograniczeń jest skutkiem niekompletności modelu obliczeniowego, co wskazuje na konieczność prowadzenia dalszych badań.

Wpływ dokładności opisu rozkładu rozmiarów włókien filtra na sprawność

Stosowalność modelu poszerzono o przypadek włóknin charakteryzujących się trudnym do opisania rozkładem rozmiarów (4.5). Możemy mieć z nimi do czynienia w przypadku bardzo popularnego procesu wytwórczego filtrów włókninowych, który polega na rozdmuchu stopionego polimeru. W ich przypadku skorzystanie z pojedynczej wartości średniej średnicy, opisującej cały rozkład rozmiarów włókien, może nie być wystarczająco dokładnym przybliżeniem. Zachodzi wtedy konieczność oddzielnego rozpatrywania poszczególnych zakresów rozmiarów włókien filtra (4.5, 5.3). Jak wykazano w tej pracy, podział rozkładu średnic na co najmniej dziesięć przedziałów, każdy opisywany jedną wartością średnią jest wystarczający, aby dokładnie odwzorować wpływ nieregularnego rozkładu rozmiarów. Dodatkowo takie podejście umożliwia uwzględnienie w modelu obliczeniowym niezależnego działania każdej frakcji włókien. Pozwala to na uzależnienie w modelu zmian średniego rozmiaru włókna od sprawności danej frakcji włókien i depozytów przez nie zatrzymanych. Umożliwia to lepsze odwzorowanie rzeczywistego zachowania filtra i włókien go budujących.

Opis z wykorzystaniem zależności empirycznych

Alternatywnie w modelu opartym o sprawność pojedynczego włókna zastosować można zależności empiryczne (3.4). Pozwala to na dopasowanie wartości współczynników takiego modelu do danego przypadku odbiegającego od opisu teoretycznego i umożliwia poprawę dokładności przewidywania działania filtra (5.4). Prawidłowe przewidywanie sprawności

filtra, zależne od dopasowania współczynników, jest niezmiernie ważne w przypadku filtracji aerozoli wieloskładnikowych. Natomiast kiedy zmuszeni jesteśmy rozpatrywać filtrację cząstek aerozolowych o rozmiarach większych od rozmiarów włókien filtra (np. wspomniane wcześniej krople o konformacji osiowosymetrycznej) to niektóre zależności teoretyczne (Równanie 11) mogą przestać działać. Dzieje się tak w przypadku teoretycznego opisu sprawności mechanizmu bezwładnościowego. Odpowiednio wysoka wartość parametru przechwycenia, osiągana kiedy rozmiar cząstki przewyższa rozmiar włókna, prowadzi do otrzymywania niefizycznych wartości sprawności tego mechanizmu. Jest to zwłaszcza problematyczne, kiedy rozpatrujemy niezależnie od siebie poszczególne frakcje rozmiarów cząstek aerozolowych. Jesteśmy zmuszeni do tego w przypadku aerozoli wieloskładnikowych (4.6). Jednocześnie staje się to problematyczne kiedy uwzględniamy w modelu więcej niż jedną średnią wartość opisującą rozkład rozmiarów włókien, o konieczności czego była mowa w poprzednim akapicie (4.5, 5.3).

Efekty związane z filtracją aerozolu wieloskładnikowego

Podczas filtracji aerozolu wieloskładnikowego, zawierającego w swoim składzie cząstki stałe i krople cieczy, we wnętrzu filtra występują charakterystyczne dla tego układu efekty (5.2). Obecność cząstek stałych prowadzi do powstawania na powierzchni włókien filtra szczątkowej struktury, która jest z nich zbudowana. Jej istnienie może być ograniczone do jedynie niektórych obszarów filtra i występować w początkowej fazie trwania procesu filtracji. Z biegiem czasu włókna są coraz bardziej pokrywane przez warstewkę cieczy. Prowadzi to do niszczenia hierarchicznej struktury cząstek stałych, która jest wyraźnie widoczna i wpływa na sprawność filtra w przypadku filtracji aerozolu zawierającego jedynie cząstki stałe. Podczas filtracji aerozolu wieloskładnikowego, na włóknach filtra pojawia się natomiast inna postać depozytów, o bardziej zwartej budowie (4.6). Składa się ona z dużej liczby cząstek stałych i w wielu przypadkach przyjmuje kształt zbliżonym do kulistego. Taka forma depozytów związana jest z samoistną reorganizacją struktury skutkującą minimalizacją stosunku pola powierzchni do objętości depozytu. Obecność, powstałych tak aglomeratów cząstek stałych, które pokrywają się z czasem zdeponowaną na włóknach cieczą, prowadzi do powiększenia powierzchni właściwej włókien. Ostatecznie, nawet pomimo niewielkiej masy potencjalnych depozytów stałych, prowadzić mogą one do wzrostu pojemności filtra względem depozytów ciekłych, a co za tym idzie oporów przepływu przez filtr (5.4, 5.6). Pokrycie włókien cieczą jest bardziej równomierne jeśli włókna charakteryzują się dobrą zwilżalnością względem kropel cieczy. Natomiast w przeciwnym przypadku, kiedy ciecz nie

może swobodnie rozpływać się po powierzchni włókien, efekt losowego powstawania obszarów pokrytych strukturą cząstek stałych i ich późniejszą reorganizacją może być bardziej nieprzewidywalny. Zdeponowane na powierzchni włókien cząstki stałe, niezależnie od tego czy mają one swoją pierwotna formę czy postać zreorganizowanych aglomeratów, stanowią dodatkowe punkty zaczepienia i wpływają na wzrost sprawności filtracji.

Efekty związane z wykorzystaniem filtrów wielowarstwowych

Filtracja aerozoli przy wykorzystaniu filtrów wielowarstwowych wiąże się z występowaniem pewnych charakterystycznych efektów. Wynikają one z interakcji pomiędzy cząstkami aerozolowymi i warstwami filtra oraz współdziałaniem kolejnych warstw takiego filtra. Filtracja aerozolu z wykorzystaniem warstw o odpowiednio dużej grubości lub wypadkowej grubości filtra wielowarstwowego, którego warstwy nie zostały dobrane tak aby rozłożyć ładunek depozytów pomiędzy jego kolejne warstwy, skutkować będzie nierównomiernym rozkładem masy we wnętrzu filtra. Prowadzić to może do wyższego niż pożądany wzrostu oporów ze względu na nadmierne zapełnienie pojedynczej warstwy lub jej obszaru (5.1, 5.4). Rozkład ten, nawet w przypadku cieczy dobrze zwilżającej włókna, może pozostać niezmienny przez długi okres. Może być on również odporny na próby rozprowadzenia zatrzymanych depozytów ciekłych, po całej objętości filtra, z wykorzystaniem przepływu samego powietrza. Ponadto jeśli prowadzona jest filtracja aerozolu wieloskładnikowego, w którego skład wchodzą cząstki stałe, to dodatkowy wpływ na rozkład masy może mieć wspomniana zdolność depozytów stałych do poprawy sprawności separacji cząstek ciekłych i powiększenia pojemności filtra względem nich (5.4, 5.6). Dodatkowo na granicy pomiędzy kolejnymi warstwami mamy do czynienia z nieciągłością filtra. Pomimo bliskiego kontaktu, włókna mogą być fizycznie od siebie odseparowane. Taki obszar może stać się miejscem, w którym dochodzi do gromadzenia depozytów ciekłych, zwłaszcza kiedy warstwa o złej zwilżalności poprzedzona jest warstwą o dobrej zwilżalności względem depozytów ciekłych. W takim wypadku ciecz będzie mogła przemieszczać się do powierzchni dalszej warstwy, gdzie dojdzie do jej gromadzenia w wolnych przestrzeniach. Skutkiem będzie wzrost oporów przepływu związany z ograniczeniem przekroju dostępnego dla przepływu. Kiedy natomiast prowadzona jest filtracja aerozolu cząstek stałych, to jeśli pierwsza warstwa ma względem nich znacznie niższą sprawność w porównaniu z kolejną, dochodzić może do gromadzenia i rozbudowy struktury zbudowanej z cząstek stałych na powierzchni drugiej warstwy, a jednocześnie we wnętrzu warstwy pierwszej. W takim przypadku może również dojść do częściowego blokowania filtra i niezamierzonego wzrostów oporów oraz nierównomiernego

rozkładu zdeponowanych cząstek we wnętrzu filtra. Zależności te komplikują się tym bardziej im więcej warstw składa się na taki filtr.

Średni rozmiar cząstek opuszczających filtr

Zaproponowana w pracy koncepcja wykorzystania znajomości średniego rozmiaru cząstek za filtrem ma na celu poprawę dopasowania filtra do danego zastosowania, zwłaszcza w przypadku filtrów wielowarstwowych (3.5, 5.3). Polega ona na wyznaczeniu, na podstawie sprawności frakcyjnych filtra, średniego rozmiaru cząstek opuszczających daną warstwę filtracyjną. Umożliwia to określenie, które cząstki są przez taką warstwę najsprawniej zatrzymywane, a które opuszczają ją i powinny być zatrzymane w kolejnej warstwie. Zmiana w czasie tego rozmiaru pozwala śledzić ewolucję zachowania filtra oraz to jak zmienia się w czasie masa zatrzymywanych na nim cząstek. Dobór odpowiednich warstw, które uzupełniają się wzajemnie i działają wspólnie, umożliwia rozłożenie masy depozytów na całą objętość filtra i zapewnienie, że cała jego objętość pracuje równomiernie. Pozwala to wydłużyć czas działania filtra i ograniczyć wzrost jego oporów przepływu. Sama idea takiej konstrukcji filtra nie jest nowa, natomiast uwzględnienie w analizie średniego rozmiaru cząstki za filtrem, staje się użyteczne, kiedy mamy do czynienia z aerozolem wieloskładnikowym. W jego przypadku, jeśli dane typy cząstek różnią się rozkładami rozmiarów i jego średnią wartością, znacznie łatwiejsze jest śledzenie zmian w czasie średniego rozmiaru cząstek za filtrem (lub warstwą) w porównaniu ze zmianami wypadkowej sprawności (5.3).

Opory przepływu podczas filtracji aerozolu zawierającego krople wody

Podczas filtracji aerozolu zawierającego krople wody zaobserwowano występowanie nagłego skoku oporów przepływu przez filtr, po którym następuje spadek i stabilizacja oporów, a następnie dalszy powolny ich wzrost (5.1, 5.4). Istnienie tego skoku związane jest z zapełnianiem wolnych przestrzeni filtra przez zdeponowane krople wody. W przypadku filtra, którego włókna są źle zwilżane przez wodę, dochodzi do jej gromadzenia się w wierzchniej warstwie filtra, ponieważ ciecz nie może przemieszczać się w głąb filtra w łatwy sposób. Prowadzi to do szybkiego zmniejszania się powierzchni przekroju dostępnej dla przepływu. Jednocześnie następuje szybki wzrost prędkości przepływu przez pozostały dostępny przekrój filtra, a co za tym idzie wzrost sprawności mechanizmu bezwładnościowego, szybki wzrost depozycji nowych kropel i zapełnianie pozostałych wolnych przestrzeni. Prowadzi to do gwałtownego skoku oporów zakończonego

wymuszonym, przez różnicę ciśnień przed i za filtrem, przemieszczeniem cieczy w głąb filtra (5.4). Po skoku, kiedy zgromadzona w filtrze ciecz zostaje rozprowadzona po całej objętości filtra, proces filtracji trwa nadal, jednakże zwilżone podczas skoku włókna umożliwiają łatwiejsze przemieszczanie się cieczy, co skutkuje dalszymi powolnymi wzrostami. W przypadku filtracji aerozolu, który zawiera dodatkowo krople cieczy o dobrej zwilżalności względem włókien, mogą one rozpływać się po ich powierzchni i ułatwiać penetrację gromadzącej się cieczy w głąb filtra (5.4). Skutkuje to niższymi obserwowanymi oporami przepływu, niż ma to miejsce w przypadku filtracji aerozolu zawierającego jedynie krople cieczy źle zwilżającej włókna. Efekt ten jest obserwowany nawet dla niewielkiej koncentracji kropel o dobrej zwilżalności i pomimo wynikającego z tego dodatkowego ładunku masowego trafiającego na taki filtr. Kiedy w takim układzie pojawią się dodatkowo cząstki stałe, po zdeponowaniu na powierzchni włókien, mają one tendencję do formowania zbitych aglomeratów (4.6, 5.2). Prowadzi to do powiększenia przez nie powierzchni włókien, a co za tym idzie pojemności takich włókien względem depozytów ciekłych (5.5). Skutkiem tego jest postępujący w czasie filtracji wypadkowy wzrost oporów przepływu przez filtr, ze względu na zatrzymanie we wnętrzu filtra dodatkowej objętości cieczy (5.6).

Wskazówki odnośnie projektowania filtrów

Na podstawie dokonanych badań, uzyskanych danych doświadczalnych, przeprowadzonych obliczeń oraz wiedzy literaturowej wskazać można pewne wytyczne odnośnie projektowania filtrów oraz przewidywania ich działania. Kiedy prowadzona jest filtracja aerozolu zawierającego jedynie cząstki stałe dochodzić może do formowania się, wewnątrz filtra lub na jego powierzchni, rozbudowanej struktury cząstek stałych, która ma wpływy zarówno na jego sprawność jak i opory przepływu (4.6). Wykorzystanie filtrów gradientowych lub wielowarstwowych pozwala rozdzielić ładunek depozytów pomiędzy kolejne warstwy filtra. W tym celu konieczny jest odpowiedni dobór filtrów składowych, tak że ich wypadkowa sprawność względem cząstek aerozolowych rośnie wzdłuż filtra, lub dochodzi do zatrzymania wzdłuż filtra kolejnych frakcji rozmiarów cząstek. Celem może być również jak najszybsze uformowanie i rozrost wspomnianej struktury, co pozwala na szybkie osiągnięcie wysokiej sprawności kosztem wzrostu oporów przepływu. W takim przypadku wykorzystanie filtra jednorodnego stanowiącego jedynie szkielet i podporę dla powstających na powierzchni jego włókien, zbudowanych z cząstek stałych, wtórnych włókien może być dobrym rozwiązaniem. Przewidywania tak prowadzonej filtracji są dość dobrze opisane literaturowo. Kiedy prowadzona jest filtracja kropel, kluczowe znaczenia dla zachowania filtra będzie miało

zagadnienie zwilżalności włókien przez krople cieczy. Jeśli zatrzymywana ciecz dobrze zwilża włókna filtra, dochodzić będzie do jej rozpływania się po powierzchni włókien i tworzyć będzie ona pokrywającą włókna warstwę (4.6, 5.2). Prowadzić to może do spadku sprawności pokrytych cieczą włókien, ze względu na występowanie efektu poślizgu na włóknie zwilżonym. Jednocześnie rozpływanie się cieczy po włóknach redukuje ryzyko kompletnego zamykania porów i tworzenia obszarów martwych w strukturze wewnętrznej filtra, które mogłyby mieć negatywny wpływ zarówno na sprawność jak i opory przepływu. Natomiast w późniejszych etapach filtracji, kiedy mamy do czynienia ze stanem równowagi dynamicznej pomiędzy nowymi depozytami trafiającymi na filtr, a ociekaniem cieczy i wtórnym porywaniem kropel, wykorzystanie dobrze zwilżalnych włókien promować będzie kontrolowane ociekanie. Alternatywnie, naszym celem może być przekształcenie charakteru rozkładu rozmiarów kropel aerozolu, tak aby na skutek wtórnego porywania otrzymać aerozol o większych kroplach, który usunięty zostanie na kolejnym etapie procesu. Pomocne może być wtedy wykorzystanie filtra zaprojektowanego tak, że promowane jest wtórne porywanie z włókien, kropel o odpowiednio dużym rozmiarze, odbywające się kosztem ociekania.

Kiedy prowadzona jest filtracja aerozolu mieszanego cząstek stałych i kropel oleju, dla filtrów o odpowiednio wysokiej sprawności, dochodzi do występowania dynamicznych jej zmian. Krzywa sprawności filtra w czasie obładowywania depozytami charakteryzuje się występowaniem maksimum sprawności oraz towarzyszącym jemu minimum średniego rozmiaru cząstki za filtrem. Efekt ten związany jest z formowaniem, przemieszczającej się we wnętrzu filtra strefy najintensywniejszego wychwytu cząstek. W przypadku filtra jednorodnego skutkuje to spadkiem jego sprawności po okresie szybkiego wzrostu i występowania maksimum sprawności. Prowadzi to do trudności w przewidywaniu działania takiego filtra podczas jego pracy. Można przeciwdziałać temu zjawisku poprzez odpowiedni dobór konstrukcji filtra wielowarstwowego, tak że depozyty stałe zatrzymywane są z wysoką sprawnością w jego wierzchniej warstwie. W takim przypadku kolejne warstwy filtra powinny zostać tak dobrane, aby odpowiednio kontrolować proces filtracji pozostałych w aerozolu kropel cieczy oraz jej przemieszczanie się wewnątrz struktury filtra.

Kiedy mamy do czynienia z filtracją aerozolu dwóch różniących się zwilżalnością względem włókien cieczy, obserwuje się znaczący wpływu dodatku cieczy dobrze zwilżającej włókna na spadek oporów przepływu (5.4). Z tego względu dobór materiału filtra oparty powinien być o spodziewany ładunek masowy poszczególnych cieczy trafiających na filtr. Materiał powinien być dobrze zwilżany przez ciecz o większym ładunku, o ile zastosowanie mają wspomniane wcześniej efekty istotne dla filtracji aerozolu jedynie kropel cieczy. Kiedy mamy

do czynienia z filtracją aerozolu trójskładnikowego, zawierającego cząstki stałe oraz różniące się właściwościami powierzchniowymi dwie ciecze, obecność cząstek stałych powoduje, ze względu na pełnioną przez nie funkcję dodatkowych punktów zaczepienia oraz zwiększanie powierzchni właściwej włókien filtra, powiększenie pojemności filtra względem depozytów ciekłych oraz wzrost oporów przepływu (5.5, 5.4). Z tego względu zalecany jest dobór filtra umożliwiający w miarę swobodne przemieszczanie tych depozytów oraz ich usuwanie ze struktury filtra np. na drodze ociekania.

Wyznaczenie, w oparciu o zmiany sprawności, zmian średniego rozmiaru cząstki za filtrem, pozwolić może na lepsze dopasowanie konstrukcji filtra, umożliwiające wspomniany wcześniej równomierny rozkład ładunku depozytów wzdłuż filtra poprzez skorzystanie z warstw zatrzymujących różne frakcje cząstek aerozolowych (3.5, 5.3). W celu dokładnego uwzględnienia w modelu obliczeniowym rozkładu rozmiarów włókien filtra (4.5), niezależnie od charakteru tego rozkładu konieczne okazuje się skorzystanie z zależności empirycznych (3.5, 5.3). Mamy w ich przypadku łatwą i nieograniczoną możliwość rozpatrywania niezależnie od siebie poszczególnych rozmiarów włókien i rozmiarów cząstek aerozolowych. Pamiętać należy jednak o konieczności odpowiedniego opisu rozkładu rozmiarów włókien z uwzględnieniem co najmniej dziesięciu przedziałów rozmiarów włókien (4.5). Obliczenia sprawności przeprowadzone w oparciu o klasyczną teorię filtracji wykazują dobrą zgodność dla aerozolu złożonego z cząstek stałych. W przypadku przewidywań dla aerozolu wieloskładnikowego zawierającego cząstki stałe i krople oleju, konieczne okazuje się skorzystanie z poprawki (SIF), której wartość zależy od rozmiaru włókien budujących filtr oraz udziału kropel oleju w aerozolu (5.2). Jej wartość rośnie ze wzrostem rozmiaru włókien i udziałem kropel oleju. Istotna jest również wartość przyjętego w modelu kroku czasowego (4.7). W toku przeprowadzonych badań wyznaczono, że wynosić powinna ona, dla zastosowanych przepływów i koncentracji aerozolu, nie więcej niż jedną sekundę.

Perspektywy dalszych badań

W ramach rozprawy wskazano również potencjalne kierunki dalszego rozwoju modelu oraz zagadnienia wymagające dalszych badań, które pozwoliłyby pogłębić stan wiedzy odnośnie procesu jednoczesnej filtracji, zawieszonych w strumieniu gazu cząstek stałych i ciekłych, z wykorzystaniem jedno- i wielowarstwowych filtrów włókninowych. Zaproponowano poszerzenie modelu obliczeniowego o podział warstwy filtra na rozpatrywane niezależnie od siebie mniejsze warstwy (5.6). Idea takiego rozwiązania wpisuje się w koncepcję filtrów wielowarstwowych tyle że z dużo większą rozdzielczością przestrzenna. Pozwoliłoby to na

dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistego rozmieszczenia depozytów wewnątrz struktury filtra. Poprawiłoby to dokładność modelu w zakresie przewidywań zachodzących w strukturze wewnętrznej filtra zmian. Umożliwiłoby to lepsze przewidywanie zmian jego sprawność oraz oporów przepływu w czasie trwania procesu filtracji. W tym celu konieczne jest przeprowadzenie dokładniejszych badań rozkładu masy poszczególnych depozytów wewnątrz filtra oraz zmian zachodzących w tym rozkładzie na skutek obładowywania filtra depozytami. Dla dalszego rozwoju wiedzy w tym zakresie istotne jest także zagadnienie wpływu typu poszczególnych depozytów (stałe, ciekłe), ich właściwości względem włókien (dobrze i źle zwilżane) oraz ich wzajemnych interakcji na charakter rozkładu masy depozytów we wnętrzu filtra włókninowego.

7. Bibliografia

[1] C. Yin, H. Li, Y. Cha, S. Zhang, J. Du, Z. Li, W. Ye, Characterizing in-cabin air quality and vehicular air filtering performance for passenger cars in China, Environ. Pollut. 318 (2023) 120884. doi:https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120884.

[2] L.M. Henning, A. Abdullayev, C. Vakifahmetoglu, U. Simon, H. Bensalah, A. Gurlo, M.F. Bekheet, Review on Polymeric, Inorganic, and Composite Materials for Air Filters: From Processing to Properties, Adv. Energy Sustain. Res. 2 (2021) 2100005. doi:https://doi.org/10.1002/aesr.202100005.

[3] A. Wilson, 9 - Developments in nonwovens for automotive textiles, in: G.B.T.-A. in T.N. Kellie (Ed.), Woodhead Publ. Ser. Text., Woodhead Publishing, 2016: pp. 257–271. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100575-0.00009-7.

[4] T. Praphawatvet, J.I. Peters, R.O. Williams, Inhaled nanoparticles–An updated review, Int. J. Pharm. 587 (2020) 119671. doi:10.1016/j.ijpharm.2020.119671.

[5] K. Sutherland, Section 6 - Gas Filtration, in: K. Sutherland (Ed.), Filters Filtr. Handb. (Fifth Ed., Fifth Edit, Elsevier, Oxford, 2008: pp. 369–450. doi:10.1016/B978-1-85617-464-0.00006-7.

[6] J.R. Ajmeri, C.J. Ajmeri, 8 - Developments in nonwoven materials for medical applications, in: G.B.T.-A. in T.N. Kellie (Ed.), Woodhead Publ. Ser. Text., Woodhead Publishing, 2016: pp. 227–256. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100575-0.00008-5.

[7] L.F. González, A. Joubert, Y. Andrès, M. Liard, C. Renner, L. Le Coq, Filtration performances of HVAC filters for PM10 and microbial aerosols— Influence of management in a lab-scale air handling unit, Aerosol Sci. Technol. 50 (2016) 555–567. doi:10.1080/02786826.2016.1167833.

[8] N. Mao, 10 - Nonwoven fabric filters, in: G.B.T.-A. in T.N. Kellie (Ed.), Woodhead Publ. Ser. Text., Woodhead Publishing, 2016: pp. 273–310. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100575-0.00010-3.

[9] A. Mukhopadhyay, 8 - Composite nonwovens in filters: applications, in: D. Das, B.B.T.-C.N.-W.M. Pourdeyhimi (Eds.), Woodhead Publishing, 2014: pp. 164–210. doi:https://doi.org/10.1533/9780857097750.164.

[10] P. Garg, S. Wang, J.M. Oakes, C. Bellini, M.J. Gollner, The effectiveness of filter material for respiratory protection worn by wildland firefighters, Fire Saf. J. (2023) 103811. doi:https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103811.

[11] A. Wilson, 1 - Development of the nonwovens industry, in: S.J.B.T.-H. of N. Russell (Ed.), Woodhead Publ. Ser. Text., Woodhead Publishing, 2007: pp. 1–15. doi:https://doi.org/10.1533/9781845691998.1.

[12] Z. Wen, W. Yang, N. Li, J. Wang, L. Hu, J. Li, Z. Yin, K. Zhang, X. Dong, Assessment of the risk of infectious aerosols leaking to the environment from BSL-3 laboratory HEPA air filtration systems using model bacterial aerosols, Particuology. 13 (2014) 82–87. doi:https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.11.009.

[13] P. Digvijay, Industrial Air Filters Market by Type (HEPA Rated & Other Filter Media, Ionic, Activated Carbon and UV Filters): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2030, 2021. https://www.alliedmarketresearch.com/industrial-air-filtration-market-A07870.

[14] Air Filters Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, 2021. https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/air-filters-market-101676.

[15] Air Purifier Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (HEPA, Activated Carbon), 2022. https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/air-purifier-market.

[16] Market Study on Air Purifiers: High Market Share Held by HEPA Filtration

Technology, 2022. www.persistencemarketresearch.com/market-research/air-purifier-market.asp.
[17] T.W. Bement, D.J. Downey, A. Mitros, R. Lau, T.A. Sipkens, J. Songer, H. Alexander, D. Ostrom, H. Nikookar, S.N. Rogak, Filtration and Breathability of Nonwoven Fabrics Used in Washable Masks, Aerosol Air Qual. Res. 22 (2022) 220044. doi:10.4209/aaqr.220044.
[18] W. Deng, Y. Sun, X. Yao, K. Subramanian, C. Ling, H. Wang, S.S. Chopra, B. Bin Xu, J.-X. Wang, J.-F. Chen, D. Wang, H. Amancio, S. Pramana, R. Ye, S. Wang, Masks for COVID-19, Adv. Sci. 9 (2022) 2102189. doi:https://doi.org/10.1002/advs.202102189.
[19] I.A. Borojeni, G. Gajewski, R.A. Riahi, Application of Electrospun Nonwoven Fibers in Air Filters, Fibers. 10 (2022). doi:10.3390/fib10020015.
[20] T.M. Mata, A.A. Martins, C.S.C. Calheiros, F. Villanueva, N.P. Alonso-Cuevilla, M.F. Gabriel, G. V Silva, Indoor Air Quality: A Review of Cleaning Technologies, Environments. 9 (2022). doi:10.3390/environments9090118.
[21] J. Zhao, X. Wang, H. Song, Y. Du, W. Cui, Y. Zhou, Spatiotemporal Trend Analysis of PM2.5 Concentration in China, 1999–2016, Atmosphere (Basel). 10 (2019). doi:10.3390/atmos10080461.
[22] W.-J. Guan, X.-Y. Zheng, K.F. Chung, N.-S. Zhong, Impact of air pollution on the burden of chronic respiratory diseases in China: time for urgent action, Lancet. 388 (2016) 1939–1951. doi:10.1016/S0140-6736(16)31597-5.
[23] J.M. Samet, The Perspective of the National Research Council's Committee on Research Priorities for Airborne Particulate Matter, J. Toxicol. Environ. Heal. Part A. 68 (2005) 1063–1067. doi:10.1080/15287390590935905.
[24] H. Souzandeh, Y. Wang, A.N. Netravali, W.-H. Zhong, Towards Sustainable and Multifunctional Air-Filters: A Review on Biopolymer-Based Filtration Materials, Polym. Rev. 59 (2019) 651–686. doi:10.1080/15583724.2019.1599391.
[25] M. Sheraz, H.N. Ly, V.C. Thi Le, V.Q. Nguyen, F.H. Naqvi, J.Y. Park, H. Lee, S. Kim, W.R. Lee, V. Parasuraman, Electrospinning synthesis of CuBTC/TiO2/PS composite nanofiber on HEPA filter with self-cleaning property for indoor air purification, Process Saf. Environ. Prot. 172 (2023) 621–631. doi:https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.02.047.
[26] M. Ikegami, T. Matsumoto, Y. Kobayashi, Y. Jikihara, T. Nakayama, H. Ohashi, T. Honma, T. Takei, M. Haruta, Air purification by gold catalysts supported on PET nonwoven fabric, Appl. Catal. B Environ. 134–135 (2013) 130–135. doi:https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.12.018.
[27] Y. Akgul, Y. Polat, E. Canbay, A. Demir, A. Kilic, 20 - Nanofibrous composite air filters, in: M. Jawaid, M.M.B.T.-P.N. for E. and E.A. Khan (Eds.), Woodhead Publ. Ser. Compos. Sci. Eng., Woodhead Publishing, 2018: pp. 553–567. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102262-7.00020-9.
[28] M. Versoza, J. Heo, S. Ko, M. Kim, D. Park, Solid Oxygen-Purifying (SOP) Filters: A Self-Disinfecting Filters to Inactivate Aerosolized Viruses., Int. J. Environ. Res. Public Health. 17 (2020). doi:10.3390/ijerph17217858.
[29] S. Mallakpour, E. Azadi, C.M. Hussain, Fabrication of air filters with advanced filtration performance for removal of viral aerosols and control the spread of COVID-19., Adv. Colloid Interface Sci. 303 (2022) 102653. doi:10.1016/j.cis.2022.102653.
[30] M. Kerner, K. Schmidt, S. Schumacher, C. Asbach, S. Antonyuk, Electret Filters—From the Influence of Discharging Methods to Optimization Potential, Atmosphere (Basel). 12 (2021). doi:10.3390/atmos12010065.
[31] R. Mead-Hunter, A.J.C. King, B.J. Mullins, Aerosol-mist coalescing filters – A review, Sep. Purif. Technol. 133 (2014) 484–506. doi:10.1016/j.seppur.2014.06.057.

[32] R. Mead-Hunter, A. Bredin, A. J.C. King, A. V. Larcher, T. Becker, B. Mullins, The influence of soot nanoparticles on the micro/macro-scale behaviour of coalescing filters, Chem. Eng. Sci. 84 (2012) 113–119. doi:10.1016/j.ces.2012.08.016.
[33] T.K. Müller, J. Meyer, E. Thébault, G. Kasper, Impact of an oil coating on particle deposition and dust holding capacity of fibrous filters, Powder Technol. 253 (2014) 247–255. doi:10.1016/j.powtec.2013.11.036.
[34] J. Gac, A. Jackiewicz-Zagórska, Ł. Werner, S. Jakubiak, Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters, Sep. Purif. Technol. 170 (2016). doi:10.1016/j.seppur.2016.06.057.
[35] J. Gac, A. Jackiewicz-Zagórska, Ł. Werner, S. Jakubiak, Numerical modeling of solid deposits reorganization during consecutive solid-liquid aerosol filtration: Influence on the dynamics of filtration efficiency, J. Aerosol Sci. 119 (2018). doi:10.1016/j.jaerosci.2018.02.008.
[36] D. Thomas, S. Pacault, A. Charvet, N. Bardin-Monnier, J.-C. Appert-Collin, Composite fibrous filters for nano-aerosol filtration: Pressure drop and efficiency model, Sep. Purif. Technol. 215 (2019) 557–564. doi:https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.01.043.
[37] C.J. Hotz, R. Mead-Hunter, T. Becker, A.J.C. King, S. Wurster, G. Kasper, B.J. Mullins, Detachment of droplets from cylinders in flow using an experimental analogue, J. Fluid Mech. 771 (2015) 327–340. doi:DOI: 10.1017/jfm.2015.177.
[38] T. Frising, D. Thomas, D. Bémer, P. Contal, Clogging of fibrous filters by liquid aerosol particles: Experimental and phenomenological modelling study, Chem. Eng. Sci. 60 (2005) 2751–2762. doi:10.1016/j.ces.2004.12.026.
[39] K.W. Lee, B.Y.H. Liu, Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters, Aerosol Sci. Technol. 1 (1982) 147–161. doi:10.1080/02786828208958584.
[40] K.W. Lee, B.Y.H. Liu, Experimental Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters, Aerosol Sci. Technol. 1 (1981) 35–46. doi:10.1080/02786828208958577.
[41] A. Charvet, Y. Gonthier, E. Gonze, A. Bernis, Experimental and modelled efficiencies during the filtration of a liquid aerosol with a fibrous medium, Chem. Eng. Sci. 65 (2010) 1875–1886. doi:https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.11.037.
[42] P. Contal, J. Simao, D. Thomas, T. Frising, S. Callé, J.-C. Appert-Collin, D. Bémer, Clogging of Fibre Filters by Submicron Droplets. Phenomena and Influence of Operating Conditions, J. Aerosol Sci. 35 (2004) 263–278. doi:10.1016/j.jaerosci.2003.07.003.
[43] J.R. Conder, T.P. Liew, Fine mist filtration by wet filters—II: Efficiency of fibrous filters, J. Aerosol Sci. 20 (1989) 45–57. doi:https://doi.org/10.1016/0021-8502(89)90030-X.
[44] A. Charvet, D. Thomas, 6 - Filtration of Liquid Aerosols, in: D. Thomas, A. Charvet, N. Bardin-Monnier, J.-C. Appert-Collin (Eds.), Aerosol Filtr., Elsevier, 2017: pp. 161–188. doi:https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-215-1.50006-8.
[45] J. Warych, Oczyszczanie Gazów. Procesy i Aparatura, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1998.
[46] J. Warych, Procesy oczyszczania gazów. Problemy projektowo-obliczeniowe, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1999.
[47] I.M. Hutten, CHAPTER 1 - Introduction to Nonwoven Filter Media, in: I.M.B.T.-H. of N.F.M. Hutten (Ed.), Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007: pp. 1–28. doi:https://doi.org/10.1016/B978-185617441-1/50016-0.
[48] I.M. Hutten, CHAPTER 5 - Processes for Nonwoven Filter Media, in: I.M.B.T.-H. of N.F.M. Hutten (Ed.), Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007: pp. 195–244. doi:https://doi.org/10.1016/B978-185617441-1/50020-2.

[49] E. Ramazan, 18 - Advances in fabric structures for wound care, in: S.B.T.-A.T. for W.C. (Second E. Rajendran (Ed.), Text. Inst. B. Ser., Woodhead Publishing, 2019: pp. 509–540. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102192-7.00018-7.
[50] H.-G. Geus, 5 - Developments in manufacturing techniques for technical nonwovens, in: G.B.T.-A. in T.N. Kellie (Ed.), Woodhead Publ. Ser. Text., Woodhead Publishing, 2016: pp. 133–153. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100575-0.00005-X.
[51] T. Gilet, D. Terwagne, N. Vandewalle, Droplets sliding on fibres, Eur. Phys. J. E. 31 (2010) 253–262. doi:10.1140/epje/i2010-10563-9.
[52] T. Valmari, M. Lehtimäki, A. Taipale, Filter Clogging by Bimodal Aerosol, Aerosol Sci. Technol. 40 (2006) 255–260. doi:10.1080/02786820500543282.
[53] Y. Endo, D.-R. Chen, D.Y.H. Pui, Bimodal aerosol loading and dust cake formation on air filters, Filtr. Sep. 35 (1998) 191–195. doi:https://doi.org/10.1016/S0015-1882(98)91369-6.
[54] E.F. Mikhailov, S.S. Vlasenko, L. Krämer, R. Niessner, Interaction of soot aerosol particles with water droplets: influence of surface hydrophilicity, J. Aerosol Sci. 32 (2001) 697–711. doi:https://doi.org/10.1016/S0021-8502(00)00101-4.
[55] D. Thomas, 4 - Initial Pressure Efficiency of a Fibrous Media, in: D. Thomas, A. Charvet, N. Bardin-Monnier, J.-C.B.T.-A.F. Appert-Collin (Eds.), Elsevier, 2017: pp. 79–122. doi:https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-215-1.50004-4.
[56] I.M. Hutten, CHAPTER 2 - Filtration Mechanisms and Theory, in: I.M.B.T.-H. of N.F.M. Hutten (Ed.), Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007: pp. 29–70. doi:https://doi.org/10.1016/B978-185617441-1/50017-2.
[57] R. Givehchi, Z. Tan, An Overview of Airborne Nanoparticle Filtration and Thermal Rebound Theory, Aerosol Air Qual. Res. 14 (2014) 46–63. doi:10.4209/aaqr.2013.07.0239.
[58] M.D. Allen, O.G. Raabe, Slip Correction Measurements of Spherical Solid Aerosol Particles in an Improved Millikan Apparatus, Aerosol Sci. Technol. 4 (1985) 269–286. doi:10.1080/02786828508959055.
[59] I.B. Stechkina, A.A. Kirsch, N.A. Fuchs, Studies on Fibrous Aerosol Filters—IV Calculation of Aerosol Deposition in Model Filters in the Range of Maximum Penetration, Ann. Occup. Hyg. 12 (1969) 1–8. doi:10.1093/annhyg/12.1.1.
[60] W.C. Hinds, Filtration, in: Aerosol Technol. Prop. Behav. Meas. Airborne Part., John Wiley & Sons, New York, 1999: pp. 182–204.
[61] J. Wang, D.R. Chen, D.Y.H. Pui, Modeling of filtration efficiency of nanoparticles in standard filter media, J. Nanoparticle Res. 9 (2007) 109–115. doi:10.1007/s11051-006-9155-9.
[62] R. Gougeon, Filtration des aérosols liquides par des filtres à fibres en régime d'interception et d'inertie, University of Paris XII, 1994.
[63] B.J. Mullins, I.E. Agranovski, R.D. Braddock, Particle Bounce During Filtration of Particles on Wet and Dry Filters, Aerosol Sci. Technol. 37 (2003) 587–600. doi:10.1080/02786820300923.
[64] X. Tian, Q. Ou, Y. Lu, J. Liu, Y. Liang, D.Y.H. Pui, H. Yi, Influence of Oil Content on Particle Loading Characteristics of a Two-Stage Filtration System, Atmosphere (Basel). 14 (2023). doi:10.3390/atmos14030551.
[65] P. Abdolghader, C. Brochot, F. Haghighat, A. Bahloul, Airborne nanoparticles filtration performance of fibrous media: A review, Sci. Technol. Built Environ. 24 (2018) 648–672. doi:10.1080/23744731.2018.1452454.
[66] R. Mead-Hunter, R.D. Braddock, D. Kampa, N. Merkel, G. Kasper, B.J. Mullins, The relationship between pressure drop and liquid saturation in oil-mist filters – Predicting filter saturation using a capillary based model, Sep. Purif. Technol. 104 (2013) 121–

129. doi:https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.11.019.
[67] A. Bredin, B.J. Mullins, Influence of flow-interruption on filter performance during the filtration of liquid aerosols by fibrous filters, Sep. Purif. Technol. 90 (2012) 53–63. doi:https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.02.009.
[68] S. Jakubiak, ISO 21083 : nowa norma międzynarodowa do określania skuteczności filtracji nanocząstek, Pod. i Metod. Oceny Środowiska Pr. 2 (2019) 7–17. doi:10.5604/01.3001.0013.2521.
[69] PN-EN ISO 21083-1:2019-01-Metoda badania skuteczności materiałów filtrujących powietrze ze sferycznych nanomateriałów - Część 1: Zakres wielkości od 20 nm do 500 nm, (2019).
[70] B.O. Meuller, M.E. Messing, D.L.J. Engberg, A.M. Jansson, L.I.M. Johansson, S.M. Norlén, N. Tureson, K. Deppert, Review of Spark Discharge Generators for Production of Nanoparticle Aerosols, Aerosol Sci. Technol. 46 (2012) 1256–1270. doi:10.1080/02786826.2012.705448.
[71] R.T. Drew, D.M. Bernstein, S. Laskin, The Laskin aerosol generator, J. Toxicol. Environ. Health. 4 (1978) 661–670. doi:10.1080/15287397809529688.
[72] W.C. Hinds, Production of Test Aerosols, in: Aerosol Technol. Prop. Behav. Meas. Airborne Part., 2nd ed, Wiley, New York SE -, 1999: pp. 428–446. doi:LK - https://worldcat.org/title/39060733.
[73] R.C. Flagan, Aerosol Particle Generation, in: H. Masuda, K. Higashitani, H. Yoshida (Eds.), Powder Technol. Handb., 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, 2006: pp. 401–411.
[74] T.T. Mercer, Production and Characterization of Aerosols, Arch. Intern. Med. 131 (1973) 39–50. doi:10.1001/archinte.1973.00320070035004.
[75] U. Delprato, V. Lombardi, An automatic system for the isokinetic sampling and the PM10 concentration monitoring of industrial stack emissions, J. Aerosol Sci. 21 (1990) S629–S632. doi:https://doi.org/10.1016/0021-8502(90)90321-N.
[76] D.A. VALLERO, 16 - Ambient Air Sampling, in: D.A.B.T.-F. of A.P. (Fourth E. VALLERO (Ed.), Academic Press, Burlington, 2008: pp. 457–471. doi:https://doi.org/10.1016/B978-012373615-4/50017-0.
[77] N.J. Kennedy, W.C. Hinds, Inhalability of large solid particles, J. Aerosol Sci. 33 (2002) 237–255. doi:https://doi.org/10.1016/S0021-8502(01)00168-9.
[78] H. Vincent, James, The Nature of Air Flow Near Aerosol Samplers, in: Aerosol Sampl., 2007: pp. 71–91. doi:https://doi.org/10.1002/9780470060230.ch4.
[79] H. Vincent, James, Experimental Methods in Aerosol Sampler Studies, in: Aerosol Sampl., 2007: pp. 35–70. doi:https://doi.org/10.1002/9780470060230.ch3.
[80] R.W. Welker, Chapter 1 - Basics and Sampling of Particles for Size Analysis and Identification, in: R. Kohli, K.L.B.T.-D. in S.C. and C. Mittal (Eds.), William Andrew Publishing, Oxford, 2012: pp. 1–80. doi:https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7883-0.00001-8.
[81] P. Baltzopoulou, M. Kostoglou, E. Papaioannou, A. Konstandopoulos, On the Effective Density and Fractal–Like Dimension of Diesel Soot Aggregates as a Function of Mobility Diameter, Emiss. Control Sci. Technol. 4 (2018). doi:10.1007/s40825-018-0106-6.
[82] P.F. DeCarlo, J.G. Slowik, D.R. Worsnop, P. Davidovits, J.L. Jimenez, Particle Morphology and Density Characterization by Combined Mobility and Aerodynamic Diameter Measurements. Part 1: Theory, Aerosol Sci. Technol. 38 (2004) 1185–1205. doi:10.1080/027868290903907.
[83] W.P. Kelly, P.H. McMurry, Measurement of Particle Density by Inertial Classification of Differential Mobility Analyzer–Generated Monodisperse Aerosols, Aerosol Sci. Technol. 17 (1992) 199–212. doi:10.1080/02786829208959571.

[84] Ł. Żywczyk, A. Moskal, Badanie morfologii agregatów aerozolowych, Inżynieria i Apar. Chem. 53 (2014) 193–194.
[85] O. Schmid, E. Karg, D.E. Hagen, P.D. Whitefield, G.A. Ferron, On the effective density of non-spherical particles as derived from combined measurements of aerodynamic and mobility equivalent size, J. Aerosol Sci. 38 (2007) 431–443. doi:https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2007.01.002.
[86] M.M. Maricq, N. Xu, The effective density and fractal dimension of soot particles from premixed flames and motor vehicle exhaust, J. Aerosol Sci. 35 (2004) 1251–1274. doi:https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.05.002.
[87] Aerosol generator for solid particles GFG 1000 - Product data sheet, Palas GmbH. (n.d.).
[88] J. Yon, A. Bescond, F.-X. Ouf, A simple semi-empirical model for effective density measurements of fractal aggregates, J. Aerosol Sci. 87 (2015) 28–37. doi:https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.05.003.
[89] J. Rissler, M.E. Messing, A.I. Malik, P.T. Nilsson, E.Z. Nordin, M. Bohgard, M. Sanati, J.H. Pagels, Effective Density Characterization of Soot Agglomerates from Various Sources and Comparison to Aggregation Theory, Aerosol Sci. Technol. 47 (2013) 792–805. doi:10.1080/02786826.2013.791381.
[90] K. Park, D.B. Kittelson, P.H. McMurry, Structural properties of diesel exhaust particles measured by Transmission Electron Microscopy (TEM): Relationships to particle mass and mobility, Aerosol Sci. Technol. 38 (2004) 881–889. doi:10.1080/027868290505189.
[91] K. Podkościelna, Badanie wpływu warunków procesowych na przebieg filtracji aerozoli nanometrycznych przy użyciu włókninowych filtrów wielowarstwowych, Politechnika Warszawska, 2021.
[92] C. Della Volpe, A. Deimichei, T. Ricco, A multiliquid approach to the surface free energy determination of flame-treated surfaces of rubber-toughened polypropylene, J. Adhes. Sci. Technol. 12 (1998) 1141–1180. doi:10.1163/156856198X00371.
[93] C. Della Volpe, C. Migliaresi, G. Mari, Surface Tension Analysis of PBT and PET Fibres Based Leukodepletion Filters BT - Surface Modification of Polymeric Biomaterials, in: B.D. Ratner, D.G. Castner (Eds.), Springer US, Boston, MA, 1997: pp. 107–115. doi:10.1007/978-1-4899-1953-3_13.
[94] J.-O. Müller, D.S. Su, U. Wild, R. Schlögl, Bulk and surface structural investigations of diesel engine soot and carbon black, Phys. Chem. Chem. Phys. 9 (2007) 4018–4025. doi:10.1039/B704850E.
[95] C. Helsper, W. Mölter, F. Löffler, C. Wadenpohl, S. Kaufmann, G. Wenninger, Investigations of a new aerosol generator for the production of carbon aggregate particles, Atmos. Environ. Part A. Gen. Top. 27 (1993) 1271–1275. doi:https://doi.org/10.1016/0960-1686(93)90254-V.
[96] J. Xi, B.-J. Zhong, Soot in Diesel Combustion Systems, Chem. Eng. Technol. 29 (2006) 665–673. doi:10.1002/ceat.200600016.
[97] T. Ajtai, A. Kohut, P. Raffai, G. Szabó, Z. Bozóki, Controlled Laboratory Generation of Atmospheric Black Carbon Using Laser Excitation-Based Soot Generator: From Basic Principles to Application Perspectives: A Review, Atmosphere (Basel). 13 (2022). doi:10.3390/atmos13091366.
[98] EN 1822-1:2019 E, High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) - Part 1: Classification, performance testing, marking, (2019).
[99] J. Ren, J. He, J. Li, J. Liu, A Method to Generate Experimental Aerosol with Similar Particle Size Distribution to Atmospheric Aerosol, Atmosphere (Basel). 12 (2021). doi:10.3390/atmos12121669.

[100] M. Heim, B.J. Mullins, H. Umhauer, G. Kasper, Performance evaluation of three optical particle counters with an efficient “multimodal” calibration method, J. Aerosol Sci. 39 (2008) 1019–1031. doi:https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.07.006.
[101] I.E. Agranovski, R.D. Braddock, Filtration of Liquid Aerosols on Wettable Fibrous Filters, AIChE J. 44 (1998) 2775–2783. doi:10.1002/aic.690441218.
[102] I.E. Agranovski, R.D. Braddock, Filtration of liquid aerosols on nonwettable fibrous filters, AIChE J. 44 (1998) 2784–2790. doi:10.1002/aic.690441219.
[103] M. Ueda, T. Fukasawa, T. Ishigami, K. Fukui, Effect of Surface Wettability on Droplet Coalescence and Pressure Drop in a Fibrous Filter: Direct Numerical Simulation Coordinated with X-ray Computed Tomography Images, Ind. Eng. Chem. Res. 60 (2021) 4168–4179. doi:10.1021/acs.iecr.0c06157.
[104] A.D. Gadhave, S.N. Mehdizadeh, G.G. Chase, Effect of pore size and wettability of multilayered coalescing filters on water-in-ULSD coalescence, Sep. Purif. Technol. 221 (2019) 236–248. doi:https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.03.093.
[105] F. Chen, Z. Ji, Q. Qi, Effect of surface wettability on filtration performance of gas-liquid coalescing filters, Powder Technol. 357 (2019) 377–386. doi:https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.093.
[106] M. Wilcox, D. Ransom, H. Delgado-Garibay, Filter Failure During High Humidity Conditions, (2010) 185–193. doi:10.1115/GT2010-23641.
[107] A.D. Schwarz, L. König, J. Meyer, A. Dittler, Impact of water droplet and humidity interaction with soluble particles on the operational performance of surface filters in gas cleaning applications, J. Aerosol Sci. 142 (2020) 105523. doi:https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105523.
[108] H.-J. Kim, S.J. Park, D.-I. Kim, S. Lee, O.S. Kwon, I.K. Kim, Moisture Effect on Particulate Matter Filtration Performance using Electro-Spun Nanofibers including Density Functional Theory Analysis, Sci. Rep. 9 (2019) 7015. doi:10.1038/s41598-019-43127-4.
[109] D. Thomas, P. Penicot, P. Contal, D. Leclerc, J. Vendel, Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles Experimental and modelling study, Chem. Eng. Sci. 56 (2001) 3549–3561. doi:https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00041-0.
[110] D. Kampa, S. Wurster, J. Meyer, G. Kasper, Validation of a new phenomenological “jump-and-channel” model for the wet pressure drop of oil mist filters, Chem. Eng. Sci. 122 (2015) 150–160. doi:https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.09.021.
[111] D. Kampa, S. Wurster, J. Buzengeiger, J. Meyer, G. Kasper, Pressure drop and liquid transport through coalescence filter media used for oil mist filtration, Int. J. Multiph. Flow. 58 (2014) 313–324. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.10.007.

8. Oświadczenia współautorów

prof. uczelni, dr hab. inż. Jakub M. Gac

Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej

Politechnika Warszawska

Warszawa, 25.04.2023

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracach:

[A1] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, S. Jakubiak, „Filtration of aerosols containing graphite nanoparticles or their mixture with water droplets on single and multi-layer fibrous filters", Separation and Purification Technology (2020)

[A2] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, S. Jakubiak, T. Jankowski, „Filtration of submicron soot particles, oil droplets, and their mixtures on single- and multi-layer fibrous filters", Aerosol and Air Quality Research (2022)

[A3] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, T. Jankowski, „Mixture Aerosols Filtration on Filters with Wide Fibre Diameter Distribution - Comparison with Theoretical and Empirical Models", Aerosol and Air Quality Research (2022)

[A4] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, T. Jankowski, „Pressure Drop Dynamics during Filtration of Mixture Aerosol Containing Water, Oil, and Soot Particles on Nonwoven Filters", Polymers (2023)

Mój udział polegał na nadzorowaniu współpracy pomiędzy zespołem Politechniki i Instytutu, udziale w przygotowaniu artykułu, udziale w dyskusji uzyskanych wyników oraz dyskusji z recenzentami.

JMGac

mgr inż. Piotr Sobiech

Centralny Instytut Ochrony Pracy -

Państwowy Instytut Badawczy

Warszawa, 21.04.2023

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracach:

[A1] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, S. Jakubiak, „Filtration of aerosols containing graphite nanoparticles or their mixture with water droplets on single and multi-layer fibrous filters", Separation and Purification Technology (2020)

[A2] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, S. Jakubiak, T. Jankowski, „Filtration of submicron soot particles, oil droplets, and their mixtures on single- and multi-layer fibrous filters", Aerosol and Air Quality Research (2022)

[A3] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, T. Jankowski, „Mixture Aerosols Filtration on Filters with Wide Fibre Diameter Distribution - Comparison with Theoretical and Empirical Models", Aerosol and Air Quality Research (2022)

[A4] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, T. Jankowski, „Pressure Drop Dynamics during Filtration of Mixture Aerosol Containing Water, Oil, and Soot Particles on Nonwoven Filters", Polymers (2023)

Mój udział polegał na zapewnieniu poprawnego funkcjonowania układu badawczego, przygotowaniu jego schematu, udziale w dyskusji uzyskanych wyników oraz dyskusji z recenzentami.

Sobiech Piotr

dr inż. Paweł Kozikowski

Centralny Instytut Ochrony Pracy

Państwowy Instytut Badawczy

Warszawa, 21.04.2023

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracach:

[A1] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, S. Jakubiak, „Filtration of aerosols containing graphite nanoparticles or their mixture with water droplets on single and multi-layer fibrous filters", Separation and Purification Technology (2020)

[A2] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, S. Jakubiak, T. Jankowski, „Filtration of submicron soot particles, oil droplets, and their mixtures on single- and multi-layer fibrous filters", Aerosol and Air Quality Research (2022)

[A3] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, T. Jankowski, „Mixture Aerosols Filtration on Filters with Wide Fibre Diameter Distribution - Comparison with Theoretical and Empirical Models", Aerosol and Air Quality Research (2022)

[A4] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, T. Jankowski, „Pressure Drop Dynamics during Filtration of Mixture Aerosol Containing Water, Oil, and Soot Particles on Nonwoven Filters", Polymers (2023)

Mój udział polegał na wykonaniu obrazów mikroskopowych, udziale w przygotowaniu artykułu, udziale w dyskusji uzyskanych wyników oraz dyskusji z recenzentami.

dr inż. Tomasz Jankowski

Centralny Instytut Ochrony Pracy

Państwowy Instytut Badawczy

Warszawa, 20.04.2023

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracach:

[A2] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, S. Jakubiak, T. Jankowski, „Filtration of submicron soot particles, oil droplets, and their mixtures on single- and multi-layer fibrous filters", Aerosol and Air Quality Research (2022)

[A3] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, T. Jankowski, „Mixture Aerosols Filtration on Filters with Wide Fibre Diameter Distribution - Comparison with Theoretical and Empirical Models", Aerosol and Air Quality Research (2022)

[A4] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, T. Jankowski, „Pressure Drop Dynamics during Filtration of Mixture Aerosol Containing Water, Oil, and Soot Particles on Nonwoven Filters", Polymers (2023)

Mój udział polegał na nadzorowaniu współpracy pomiędzy zespołem Politechniki i Instytutu, udziale w dyskusji uzyskanych wyników oraz dyskusji z recenzentami.

TOMASZ JANKOWSKI

dr inż. Szymon Jakubiak Warszawa, 20.04.2023

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracach:

[A1] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, S. Jakubiak, „Filtration of aerosols containing graphite nanoparticles or their mixture with water droplets on single and multi-layer fibrous filters", Separation and Purification Technology (2020)

[A2] M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, S. Jakubiak, T. Jankowski, „Filtration of submicron soot particles, oil droplets, and their mixtures on single- and multi-layer fibrous filters", Aerosol and Air Quality Research (2022)

Mój udział polegał przygotowaniu schematu układu badawczego, udziale w dyskusji uzyskanych wyników oraz dyskusji z recenzentami.

Szymon Jakubiak

9. Treść publikacji

Separation and Purification Technology 237 (2020) 116378

Contents lists available at ScienceDirect

Separation and Purification Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/seppur

Filtration of aerosols containing graphite nanoparticles or their mixture with water droplets on single and multi-layer fibrous filters

Mateusz Kamiński[a], Jakub M. Gac[a,*], Piotr Sobiech[b], Paweł Kozikowski[b], Szymon Jakubiak[b]

[a] Faculty of Chemical and Process Engineering, Warsaw University of Technology, ul. Waryńskiego 1, 00-645 Warsaw, Poland
[b] Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warsaw, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:
Aerosol filtration
Fibrous filters
Filtration efficiency
Filtration dynamics
Multilayer filters

ABSTRACT

The dynamics of filtration efficiency during graphite nanoparticles aerosol filtration on fibrous filters was investigated. The influence of water droplets in feed gas on filtration efficiency, pressure drop as well as the form and shape of filtration deposits collected on filter was examined. Moreover, the mass distribution of collected deposits in individual layers in the case of multilayer filters was examined. We have observed that during the filtration of graphite aerosol in the presence of water droplets the observed pressure drop is significantly greater than during the filtration of sole graphite aerosol. On the other hand, the filtration efficiency is decreased in the presence of water droplets. During the filtration in multilayer filters we observed that the mass of particles deposited in upstream layer is greater than that in downstream, independently of the structure of both layers. This effect is also more significant in the presence of water droplets in feed gas.

1. Introduction

Gas purification is one of the most common processes used in many branches of industry. The need for improvement of technology of gas purification (including gas filtration) is driven by tendency to reduce operating costs and by more restrictive regulations regarding air and exhaust gases quality. This is the reason why filtration of solid and liquid particles attract much attention from researchers [1–5].

The process of filtration of solid particles from a gas stream using nonwoven filters is at the moment quite well described. The initial filter efficiency and pressure drop are well explained by means of classical filtration theory [1–3], which is well suited for filtration of aerosol particles with diameter in the order of 1–10 μm. For submicron-sized particles (ultrafine and nanoparticles) usually some modifications are needed [6], however in this topic the results allowing to describe the filtration process with satisfactory accuracy were also achieved [7–9]. The knowledge about the phenomena taking place after the initial stage of a process may be also considered as complete. Currently, the particles deposits formation [10,11], their influence on filtration efficiency and pressure drop during the filtration [12] as well as reorganization and re-entrainment (i.e. secondary passing of particles to the stream of purified gas) [13] has been described.

However, until last few years, investigation of droplets filtration was less advanced than the particles filtration studies. This was due to the more difficult to model behavior of the liquid particles compared to the solid ones. Description of the interaction between a droplet and a fiber must take into account, among others, such phenomena as droplet deformation due to the collision with the fiber [14] or movement of droplet on the surface of the fiber [15]. This description must also consider the properties of droplets and fibers. The behavior of the water or oil droplets is different in contact with the hydrophobic or hydrophilic surfaces [16,17]. Despite the mentioned difficulties, extensive progress in understanding the filtration of liquid aerosols on fibrous filters has been made in recent years [18–21].

In real-world applications we usually have to cope with the simultaneous removal of both solid and liquid aerosol particles which behaves differently than sole droplets of liquid. Mead-Hunter et al. [22] have considered the influence of soot particles presence on filtration of oil mist in fibrous filters. Muller et al. [23] considered the pre-coating of filtration fibers with oil in order to improve the efficiency of solid particles filtration. There are also several works which describe the evolution of pressure drop and filtration efficiency during the filtration of mixed solid–liquid aerosols [24] as well as consecutive filtration of solid and liquid aerosols [25,26]. However, in all these cases the liquid – usually some kind of oil – was considered to perfectly – or nearly perfectly – wet the filtration fibers.

In present work, the dynamics of solid graphite nanoparticles filtration on fibrous filters in presence and absence of water droplets is

* Corresponding author.
E-mail address: Jakub.Gac@pw.edu.pl (J.M. Gac).

https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116378
Received 3 July 2019; Received in revised form 7 October 2019; Accepted 1 December 2019
Available online 02 December 2019
1383-5866/ © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

Table 1
Properties of the fibrous filtration layers used in experiments.

Filtration layer	Mean fiber diameter [μm]	Packing density [–]	Layer thickness [mm]
F8	8.2 ± 2.8	0.126 ± 0.010	0.98 ± 0.06
F6	6.5 ± 2.2	0.127 ± 0.011	0.88 ± 0.09

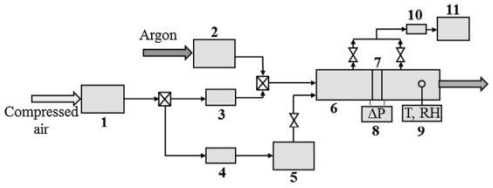


Fig. 1. Experimental set-up for investigation of filter efficiency and pressure drop during graphite particles filtration. 1 – filtered air supply, 2 – spark generator GFG 1000, 3,4 – mass flow controllers, 5 – humidifier, 6 – horizontal duct, 7 – filter holder, 8 – differential pressure transducer, 9 – thermo-hygrometer, 10 – diffusion dryer, 11 – SMPS spectrophotometer.

investigated. Aerosol of graphite nanoparticles was chosen as a test medium due to its similarity to diesel soot, which is one of the most common pollutants of air [27]. In numerous real world applications, where nonwoven filters are used for diesel soot filtration, water droplets are also present in the feed stream. To mimic such conditions as well as to study the evolution of filtration efficiency and pressure drop in the two phase system where liquid poorly wettens fibers, water particles were added to the feed gas.

The paper is organized as follows. In Section 2 we present the materials and methods which have been used in our investigations. In Section 3 we present the results of experimental together with their interpretation. Finally, Section 4 contains the discussion and conclusion of our results.

2. Materials and methods

2.1. Filters

Fibrous propylene filters utilized in present work were obtained by means of melt-blown technique [28,29], which is a well-established method of mass production of filter media with strictly defined morphology.

Multilayer filters were designed using two types of nonwoven structures. Both of these structures are highly porous fibrous layers made from polypropylene. The first structure consists of fibers with mean diameter approximately 8.2 μm (F8), while the second consists of fibers with mean diameter approximately 6.5 μm (F6). Other parameters – packing density of the layers and their thickness – are on the similar level. These parameters of both layers are denoted in Table 1.

In conducted experiments homogeneous filters F8, F6, 2F8, 2F6 and their combinations: F8-F6, F8-2F6, F6-F8-F6 were used. The factor 2 denotes the layer with thickness two times greater than base value given in Table 1.

3. Experimental set-up

Filtration efficiency and pressure drop measurements were conducted by use of experimental set-up presented in Fig. 1. The main part of this set-up is the horizontal duct made of stainless steel with an inner diameter equal to 80 mm (6). The filter holder (7) was designed for filter media with the effective filtration area of 50.2 cm^2. The horizontal duct has two inlets for test aerosols: graphite nanoparticles aerosol generated by spark generator GFG 1000 (Palas, Germany) (2) and additional air stream which may contain water droplets. Air used for test aerosol generation was sourced from central installation of compressed air and filtered using Filtered Air Supply 3074B (TSI, USA). Volume flow rates for both inlets were equal. The face velocity on filter surface was 0.2 m/s.

The graphite particles were generated in spark generator GFG 1000 in an argon atmosphere. The volume flow rate of argon was 5 dm^3/min. The spark frequency between the graphite electrodes during the experiment was 600 Hz Under such conditions average diameter of generated graphite particles was equal to 101,5 ± 47,7 nm.

Water droplets were generated by membrane ultrasonic humidifier (5). Humidifier was placed in a metal tank with air inlet and connector to the horizontal duct. Average diameter of generated droplets was equal to 3,43 ± 1,23 μm. Eluate from the filter was continuously removed from the duct to the plastic canister. To obtain number size distribution of water droplets, Spraytec laser diffraction system (Malvern Instruments Ltd, UK) was used.

The distributions of diameters of graphite particles and water droplets is presented in Fig. 2.

The filtration efficiency for graphite nanoparticles was determined based on the measurements of the particle number concentrations upstream and downstream of the filter. These concentrations were measured using scanning mobility particle sizer spectrometer (SMPS) comprising of ultrafine condensation particle counter (UCPC 3776) and

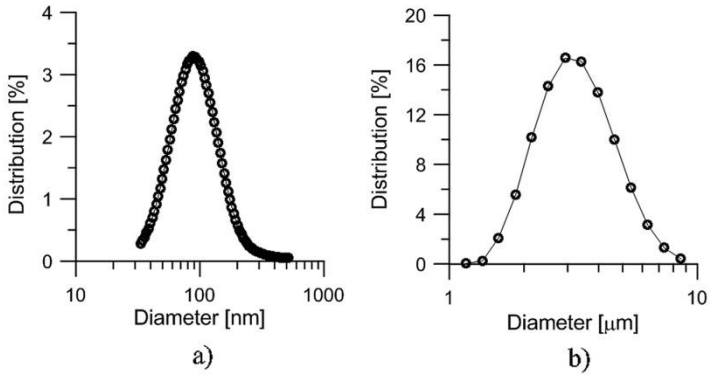


Fig. 2. Number size distribution of generated graphite nanoparticles (a) and water droplets (b). Note the different ranges in horizontal as well as vertical axes.

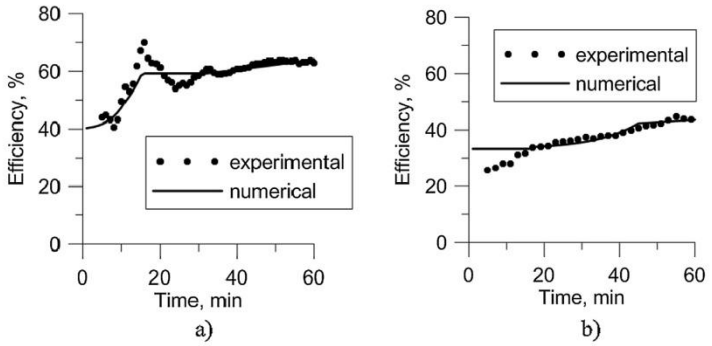


Fig. 3. Filter efficiency change during the filtration of sole graphite nanoparticles in filter F6 (a) and F8 (b).

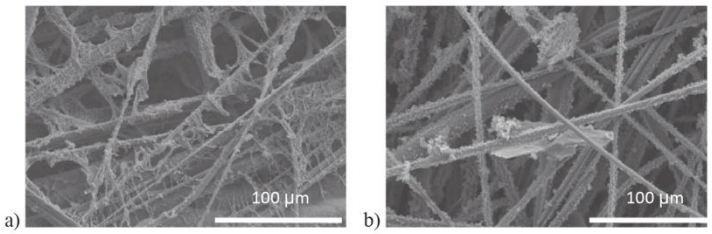


Fig. 4. SEM images of filter F6 (a) and F8 (b) after 60 min of filtration of graphite nanoaerosol.

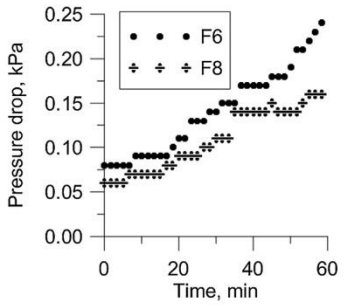


Fig. 5. Pressure drop during filtration of sole graphite nanoparticles in two fibrous filters.

electrostatic classifier 3082 (TSI, USA) (11). In order to remove residual moisture from the analyzed aerosol, diffusion dryer 3062-NC (TSI, USA) was used (10). The content of the liquid phase in air stream was estimated based on the weight measurements of the water tank before and after the process. To measure the pressure drop across filters a P26 differential pressure transducer (Halstrup Walcher, Germany) was used (8). Downstream the filter, temperature and relative humidity of the air has been measured by means of thermo-hygrometer HP23-A (Rotronic, Switzerland) (9).

Nanoparticles deposited on filtration fibers has been observed using high-resolution field emission scanning electron microscope (FE SEM) HITACHI SU8010. In order to increase the conductivity, samples were coated with gold using sputter coater Quorum Q150T ES.

4. Results

4.1. Filtration on homogeneous filters

Fig. 3 presents the changes in the efficiency of uniform filters during the filtration of an aerosol composed of graphite nanoparticles without the presence of water droplets. The experimental results have been compared with theoretical calculations of the efficiency of homogeneous filters.

The theoretical values of the initial efficiency of the filters were obtained based on the classical theory of filtration. The efficiency values beyond initial stage of filtration were calculated using a modified version of the classic filtration theory that takes into account the impact of packing density change due to the particles deposition. It has been observed that due to the electric charge, graphite deposits are arranged around the fibers into characteristic structures resembling the morphology of a spider web (Fig. 4) caused mainly by electrostatic interactions (the same interactions which are responsible for formation of the deposits of house dust). During the process, when the amount of deposited particles increases, the effective diameter of the fibers as well as packing density also increases. This is the reason for the changes of filtration efficiency during the process. To describe it quantitatively, we have applied the following scheme of computation. Based on the known concentration of test aerosol and the efficiency of the filter at a given time, the total mass of particles retained by the filter in the considered time step was calculated. The volume corresponding to this mass was then calculated according to the formula

$$V_{depp} = \frac{m}{\rho_g} \tag{1}$$

where ρ_g denotes the density of graphite equal to 2090 kg/m^3.

This volume was then converted into a packing density increase according to the formula

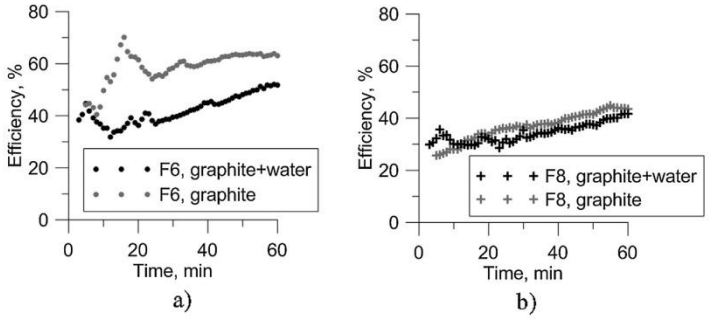


Fig. 6. Filtration efficiency of F6 (a) and F8 (b) filters during filtration of mixed graphite and water aerosol and of sole graphite aerosol.

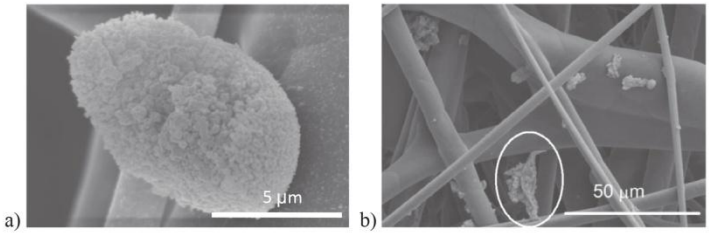


Fig. 7. SEM images of filtration deposits formed during the filtration of mixed graphite-water aerosol. White ellipse in Fig. 7b shows the deposit formed as a result of a liquid bridge evaporation.

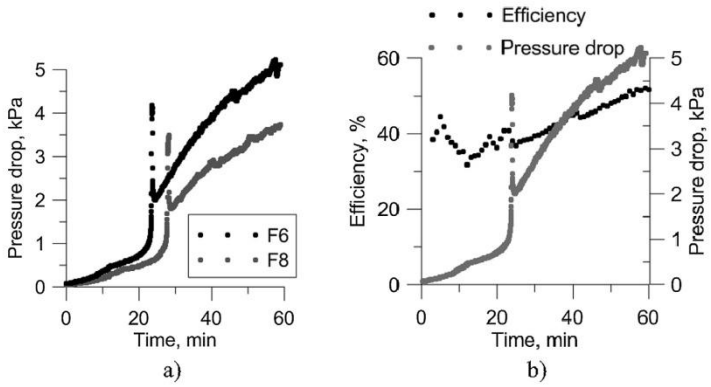


Fig. 8. Pressure drop during the filtration of graphite-water mixed aerosol in F6 and F8 filter (a). Filtration efficiency (black dots) and pressure drop (gray dots) during the filtration of graphite-water mixed aerosol in F6 filter (b).

$$\alpha_m = \frac{\alpha_0 V_f + V_{depp}}{V_f} = \frac{\alpha_0 V_f + \frac{m}{\rho_g}}{V_f} \tag{2}$$

where α_m denotes the packing density after deposition of graphite mass equal to m, α_0 – initial packing density and V_f – total filter volume.

A new effective mean diameter of the fibers is then calculated as:

$$d_m = d_0 \sqrt{\frac{\alpha_m}{\alpha_0}} \tag{3}$$

The new packing density value and the new effective mean fiber diameter were used to calculate filtration efficiency in the next time step. As it can be seen from Fig. 2, the procedure described above allowed to reproduce with satisfactory accuracy the filtration dynamics of both types of filters.

Fig. 5 presents this dynamics for two homogeneous filters. The step character of the flow resistance curve is due to the one minute averaging. We observe slow increase what is consistent with reports presented by other authors [30,31]. Also – in consistency with results of previous investigations, the filter characterized by less mean fiber diameter exhibits lower values of pressure drop [31].

Fig. 6 presents the dependence of filtration efficiency versus time during filtration of a mixture of water droplets and graphite nanoparticles – together with efficiencies for sole graphite, for comparison. The efficiency is slightly lower compared to the variant without water,

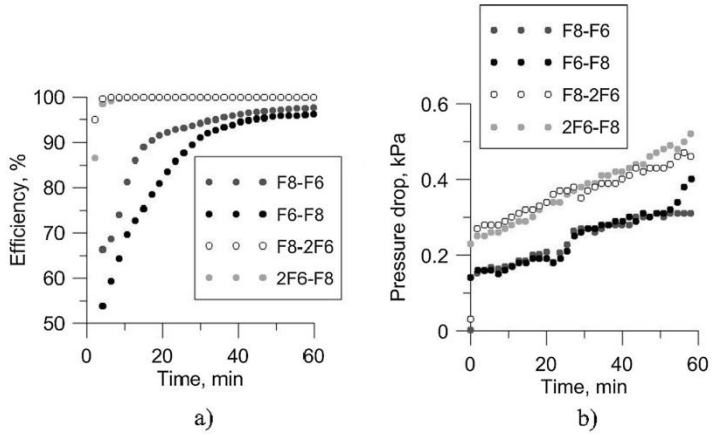


Fig. 9. Filtration efficiency (a) and pressure drop (b) during the filtration of sole graphite nanoparticles on various multilayer filters.

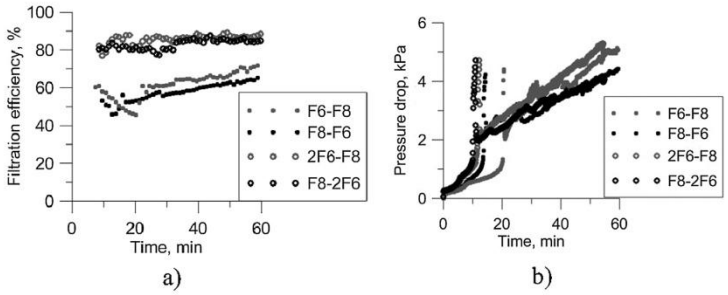


Fig. 10. Filtration efficiency (a) and pressure drop (b) during the filtration of graphite nanoparticles on various multilayer filters in the presence of water droplets.

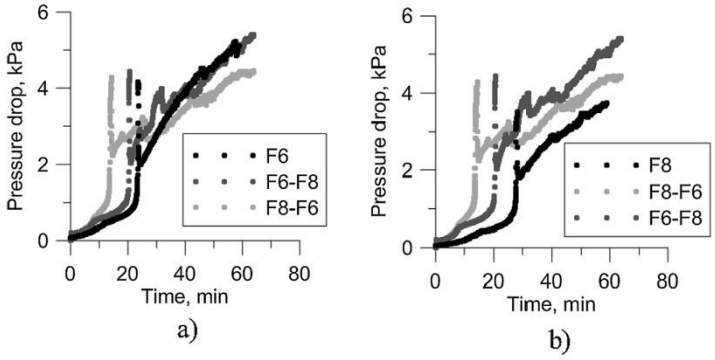


Fig. 11. Comparison of pressure drop evolution during filtration of mixed aerosol on three filters containing F6 layer (a) and F8 layer (b).

which is especially visible for F6 filter. This difference in efficiency results from the interactions between graphite particles and water droplets. The particles caught by droplets do not deposit on the filter surface but, together with these droplets, leave the filter and may be counted by SMPS counter after evaporation of liquid phase in diffusion dryer.

SEM observations of deposits gathered on filters have been carried out after 24 h of drying in desiccator. Fig. 7 reveal strong and frequent interactions between graphite nanoparticles and water droplets. Therefore, observed structure of deposits is significantly different than in case of dry conditions (Fig. 4). No spiderweb-like structures that were characteristic for sole graphite nanoparticles deposition were observed. Instead, compact and rather regular, round-shaped nanoparticle agglomerates deposited on surface of the fibers can be seen. In

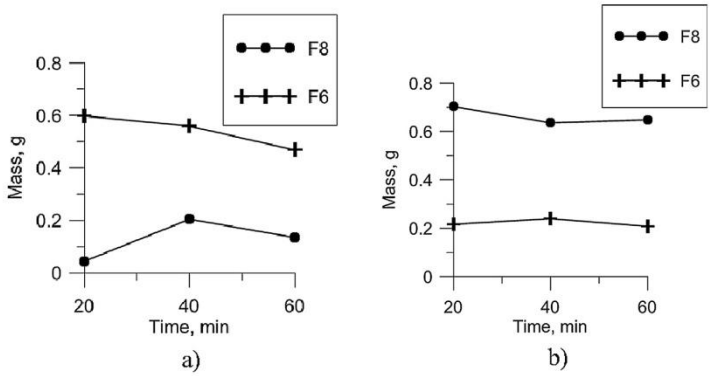


Fig. 12. Deposited mass during the filtration of graphite nanoparticles and water droplets in filter F6-F8 (a) and F8-F6 (b).

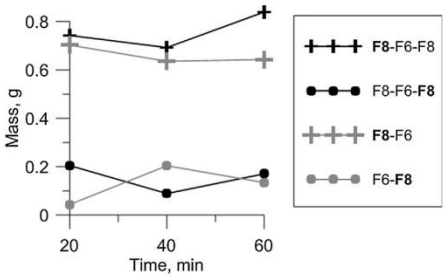


Fig. 13. Deposited mass in F8 layer for different filter configurations. The bolded symbol shows the layer which increase of mass has been plotted.

Fig. 7 characteristic shape of liquid bridge (indicated by the white ellipse) which forms when two droplets deposited on two different fibers connect has been found.

The second difference is that, by looking at the efficiency graph (Fig. 6), two stages of the process may be distinguished. In the initial phase, the efficiency shows small oscillations of a random nature around a certain average value. However, from a certain moment (about 30 min from the start of filtration) slow, but systematic increase in efficiency can be observed, which is caused by the accumulation of liquid in areas such as fiber intersections or places with a larger local packing density.

Two stages of filtration were also observed during the filtration of liquid and mixed aerosols in case of the mist droplets which well wetted the fiber [21,24]. Although it needs to be noted that the nature of the changes is somewhat different in current research, because filtration efficiency was determined with respect only to the solid particles concentrations. Moreover, by observing the dynamics of the pressure drop two stages of filtration can also be observed. The curves of pressure drop as a function of time is shown in Fig. 8a. During the first stage one can observe a slow increase of the resistance of the gas flow through the filter. In opposite, the second stage starts with the rapid increase followed by decrease in pressure drop across the filter. After this pressure jump value of the flow resistance sets at a higher level in relation to the initial one. From comparison of changes dynamics in filter efficiency with changes dynamics of pressure drop in case of F6 filter, it can be seen that the transition points between the stages overlap (Fig. 8b). After the rapid jump in pressure drop, the filtration efficiency curve becomes more smooth.

5. Filtration on multilayer filter

Fig. 9 presents the dependence of filtration efficiency and pressure drop versus time for different two-layer structures during filtration of nanoparticles aerosols. Both efficiency as well as pressure drop depend on the structure of the filter, therefore are related to the type and number of layers which filter consists of. It needs to be noted however that the dependence of process parameters on sequence of layers is rather insignificant. Therefore the efficiency of e.g. F8-F6 filter is at the similar level compared to the efficiency of F6-F8 filter. Similar

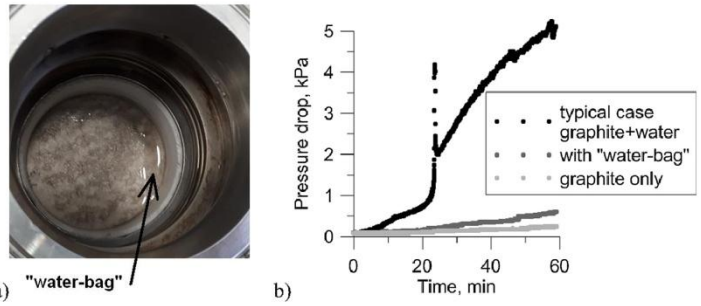


Fig. 14. Effect of "water-bag" during the filtration of graphite aerosol in the presence of water droplets on F6 filter: a picture (a) and influence on pressure drop (b). See explanation in text.

observation can be made for pressure drop across the filters consisted of the same layer types arranged in different sequence.

Quite a different situation was observed during the filtration of a mixture of graphite nanoparticles and water droplets. These results are presented in Fig. 10. We observe that the values and the general trend of filtration efficiency and (to a lesser extent) pressure drop is still similar for filters consisted of the same layers in different arrangement (i.e. F6-F8 behave similarly to F8-F6 and 2F6-F8 to F8-2F6). Though the differences may be also observed.

Fig. 11a presents the dependence of pressure drop versus time during filtration of mixture aerosol on filters F6, F6-F8 and F8-F6. We recognize the same characteristic pressure jump as for homogeneous layer filters (see Fig. 8a). However in this case sudden increase of pressure drop starts earlier for the filter F8-F6 than for F6 and F6-F8. The "pressure jump" for F6 filter is observed at the latest from these three filters. Similar tendency, even more pronounced, is observed when comparing three filters containing F8 layer, as seen in Fig. 11b. In this case the increase of pressure drop is observed at the latest for F8 homogeneous filter. This tendency is caused by the fact that homogenous filters are thinner than multilayer filters. On the other hand, the difference between pressure drop evolution for F6-F8 and F8-F6 filters proves that the sequence of the layers inside the multilayer filters influences the dynamics of filtration on such filters.

The mass distribution of deposited nanoparticles together with trapped water in individual filter layers was analyzed. In case of test aerosol without water droplets, it was observed that both the total weight gain and differences between the mass of deposits in particular layers are very small. The results obtained in case of filtration of a mixed solid-liquid aerosol are different. Dissimilarities in deposited masses in individual layers are quite significant. Fig. 12 shows the masses of the deposits in individual layers of the filters F6-F8 and F8-F6 after 20, 40 and 60 min of the filtration process. It can be seen that in both cases the amount of the deposited mass in the front layers, i.e. F6 layer for F6-F8 filter and F8 layer for F8-F6 filter, significantly exceeds the mass deposited in the second layer. Moreover, it was observed that the mass deposited in F6 layer of F6-F8 filter is similar to the mass deposited in F8 layer of F8-F6 filter. One can argue, that physical properties of both layers are too similar to distinguish their effect on filtration processes, but even though both layers have nearly the same porosity, thickness and mean fiber diameter, they showed vastly different behavior in evolution of filtration efficiency and pressure drop during single-layer experiments (Figs. 6 and 8). For multilayer systems difference between individual layers in various configurations is overshadowed by the influence of the position of the layers (Fig. 12). Thus it can be concluded, that the position of the layer has a more significant impact on the mass of the deposit than its structure of this layer, understood as the average diameter of the fibers and the distribution of these diameters.

Fig. 13 presents the comparison of mass deposited in the F8 layer in multilayer filters with various configurations after 20, 40 and 60 min of the filtration process. In two tested configurations F8 filter was the first (more upstream) layer, while in two other the last (more downstream) layer. It was observed that the mass deposited on each individual layer depends on the position of the given layer. In two configurations where F8 was the upstream layer, both exhibit similar amount of deposited mass (0,6 g), which is significantly higher compared to two configuration where F8 is downstream (0.2 g).

6. Discussion and conclusions

The efficiency of filtration of graphite nanoparticles aerosol in the presence or absence of water drops in fibrous polypropylene filters was investigated. It was found that the filtration of sole graphite nanoparticles has a completely different dynamic compared to the filtration of nanoparticles when the water droplets are present in feed gas. This difference manifests itself in lower efficiency and higher pressure drop during the filtration in the presence of water droplets. Especially the pressure drop differs in these two cases. During the graphite aerosol filtration this quantity reach the value 600 Pa or less, whereas during the filtration of graphite particles and water droplets the value of 6 kPa or more is obtained. The main origin of this discrepancy is the different shape of deposits appearing in these two cases. In turn, this shape arises from the interactions – or lack thereof – between graphite nanoparticles, water droplets and polymer fibers. During the filtration in presence of water droplets the water trapped inside the filter structure also increases the pressure drop by impeding the gas flow. Similar effect has been also observed in previous work concerning on filtration of silica and oil mixture aerosol [24]. The main difference is that in work of Frising et al. the value of pressure drop during the second stage of filtration (after pressure jump) has remained at a more or less stable level while in our current research we observed the distinct increase of this value in second stage of the process. The origin of this effect is caused by the low wettability of filtration fibers by the water.

It is also worth noting that at some cases the water has not penetrated inside the filter structure. Inside of that it formed a fragmentary layer which can be called as a "water-bag" (Fig. 14a). In this case the gas flow entered the filter through the area which was free of water. Then the pressure jump – characteristic for the filtration of liquid aerosols – has not appeared. Instead of that, the evolution of pressure drop has been similar as for the cases of filtration of graphite only (Fig. 14b).

Considering the filtration on multilayer filters it was noted that mass deposited on individual layers depends mostly on the position of these layers rather than on their characteristics defined by e.g. porosity or mean fiber diameter. Probably the influence of filter structure would be stronger if the parameters of filtration layers differed more significantly than in our cases. This subject is calling for further investigations.

Most of the results obtained in current paper arise simply from the hydrophobicity of filtration fibers. It can be expected that the evolution of filtration efficiency and pressure drop may be different in case when instead of the water, a liquid with better wettability of the fibers (e.g. some kind of oil) would be considered. The investigations on such systems are now in progress.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgement

Mateusz Kamiński and Jakub M. Gac thank Dean of Faculty of Chemical and Process Engineering, Warsaw University of Technology for the financial support of their work.

This paper has been based on the results of a research task carried out within the scope of the fourth stage of the National Programme "Improvement of safety and working conditions" partly supported in 2017–2019 — within the scope of state services — by the Ministry of Family, Labour and Social Policy. The Central Institute for Labour Protection – National Research Institute is the Programme's main coordinator.

References

[1] K.W. Lee, B.Y.H. Liu, Experimental study of aerosol filtration by fibrous filters, Aerosol Sci. Technol. 1 (1981) 35–46, https://doi.org/10.1080/02786828208958577.

[2] K.W. Lee, B.Y.H. Liu, Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters, Aerosol Sci. Technol. 1 (1982) 147–161, https://doi.org/10.1080/02786828208958584.

[3] K.L. Liu, B.Y.H. and Rubow, Efficiency, Pressure Drop and Figure of Merit of High Efficiency Fibrous and Membrane Filter Media, in: Proc. 5th World Filtr. Congr.,

1990, p. 112.
[4] F. Löffler, Air filtration. Von C. N. Davies. Academic Press Inc., London 1973. Aulf., X 171 Ss., zahlr. Abb., £4.00 , Chemie Ing. Tech. 46 (2004) 364–364. doi:10.1002/cite.330460823.
[5] R. Mead-Hunter, A.J.C. King, B.J. Mullins, Aerosol-mist coalescing filters – a review, Sep. Purif. Technol. 133 (2014) 484–506, https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.06.057.
[6] A. Brochocka, K. Majchrzycka, K. Makowski, Modified melt-blown nonwovens for respiratory protective devices against nanoparticles, Fibres Text. East. Eur. 100 (2013) 106–111.
[7] R. Przekop, L. Gradoń, Deposition and filtration of nanoparticles in the composites of nano- and microsized fibers, Aerosol Sci. Technol. 42 (2008) 483–493, https://doi.org/10.1080/02786820802187077.
[8] T.D. Elmøe, A. Tricoli, J.-D. Grunwaldt, S.E. Pratsinis, Filtration of nanoparticles: evolution of cake structure and pressure-drop, J. Aerosol Sci. 40 (2009) 965–981, https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2009.09.002.
[9] A. Jackiewicz-Zagórska, Ł. Werner, Separation of nanoparticles from air using melt-blown filtering media, Aerosol Air Qual. Res. 15 (2015) 2422–2435, https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.04.0236.
[10] G.P. Broom, Adhesion of Particles in Fibrous Air Filters, Loughborough University of Technology, 1978.
[11] R. Przekop, A. Moskal, L. Gradoń, Lattice-Boltzmann approach for description of the structure of deposited particulate matter in fibrous filters, J. Aerosol Sci. 34 (2003) 133–147, https://doi.org/10.1016/S0021-8502(02)00153-2.
[12] D. Thomas, P. Contal, V. Renaudin, P. Penicot, D. Leclerc, J. Vendel, Modelling pressure drop in HEPA filters during dynamic filtration, J. Aerosol Sci. 30 (1999) 235–246, https://doi.org/10.1016/S0021-8502(98)00036-6.
[13] J.M. Gac, Re-entrainment of the droplets during the mist filtration on fibrous filters – experimental and numerical study, in: Proc. 42nd Int. Conf. Slovak Soc. Chem. Eng., Tatranské Matliare, 2015.
[14] J.M. Gac, A. Jackiewicz-Zagórska, Ł. Werner, S. Jakubiak, Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters, Sep. Purif. Technol. 170 (2016), https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.06.057.
[15] J.M. Gac, L. Gradoń, Analytical investigation and numerical modeling of collisions between a droplet and a fiber, J. Colloid Interface Sci. 369 (2011) 419–425, https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.12.018.
[16] J.M. Gac, L. Gradoń, Modeling of axial motion of small droplets deposited on smooth and rough fiber surfaces, Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 414 (2012) 259–266, https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.08.041.
[17] I.E. Agranovski, R.D. Braddock, Filtration of liquid aerosols on nonwettable fibrous filters, AIChE J. 44 (1998) 2784–2790, https://doi.org/10.1002/aic.690441219.
[18] I.E. Agranovski, R.D. Braddock, Filtration of mists on wettable fibrous filters, AIChE J. 44 (1998) 2775–2783, https://doi.org/10.1002/aic.690441218.
[19] P. Contal, J. Simao, D. Thomas, T. Frising, S. Callé, J.-C. Appert-Collin, D. Bémer, Clogging of fibre filters by submicron droplets. phenomena and influence of operating conditions, J. Aerosol Sci. 35 (2004) 263–278, https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2003.07.003.
[20] A. Charvet, Y. Gonthier, E. Gonze, A. Bernis, Experimental and modelled efficiencies during the filtration of a liquid aerosol with a fibrous media, Chem. Eng. Sci. 65 (2010) 1875–1886, https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.11.037.
[21] T. Frising, D. Thomas, D. Bémer, P. Contal, Clogging of fibrous filters by liquid aerosol particles: experimental and phenomenological modelling study, Chem. Eng. Sci. 60 (2005) 2751–2762, https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.12.026.
[22] J.M. Gac, A simple numerical model of pressure drop dynamics during the filtration of liquid aerosols on fibrous filters, Sep. Sci. Technol. 50 (2015) 2015–2022, https://doi.org/10.1080/01496395.2015.1014496.
[23] R. Mead-Hunter, A. Bredin, A.J.C. King, A.V. Larcher, T. Becker, B. Mullins, The influence of soot nanoparticles on the micro/macro-scale behaviour of coalescing filters, Chem. Eng. Sci. 84 (2012) 113–119, https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.08.016.
[24] T.K. Müller, J. Meyer, E. Thébault, G. Kasper, Impact of an oil coating on particle deposition and dust holding capacity of fibrous filters, Powder Technol. 253 (2014) 247–255, https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.11.036.
[25] T. Frising, V. Gujisaite, D. Thomas, S. Callé, D. Bémer, P. Contal, D. Leclerc, Filtration of solid and liquid aerosol mixtures: Pressure drop evolution and influence of solid/liquid ratio, Filtr. Sep. 41 (2004) 37–39, https://doi.org/10.1016/S0015-1882(04)00075-8.
[26] J. Gac, A. Jackiewicz-Zagórska, Ł. Werner, S. Jakubiak, Numerical modeling of solid deposits reorganization during consecutive solid-liquid aerosol filtration: Influence on the dynamics of filtration efficiency, J. Aerosol Sci. 119 (2018), https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.02.008.
[27] C.N. Davies, Air Filtration, Academic Press, London, NY, 1973.
[28] A. Jackiewicz, A. Podgórski, L. Gradoń, J. Michalski, Nanostructured media to improve the performance of fibrous filters, KONA Powder Part. J. 30 (2013) 244–255, https://doi.org/10.14356/kona.2013023.
[29] A. Podgorski, A. Maißer, W.W. Szymanski, A. Jackiewicz, L. Gradon, Penetration of monodisperse, singly charged nanoparticles through polydisperse fibrous filters, Aerosol Sci. Technol. 45 (2011) 215–233, https://doi.org/10.1080/02786826.2010.531300.
[30] S. Payet, D. Boulaud, G. Madelaine, A. Renoux, Penetration and pressure drop of a HEPA filter during loading with submicron liquid particles, J. Aerosol Sci. 23 (1992) 723–735, https://doi.org/10.1016/0021-8502(92)90039-X.
[31] W.W.-F. Leung, C.-H. Hung, Investigation on pressure drop evolution of fibrous filter operating in aerodynamic slip regime under continuous loading of sub-micron aerosols, Sep. Purif. Technol. 63 (2008) 691–700, https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.07.015.

Aerosol and Air Quality Research

ORIGINAL RESEARCH
https://doi.org/10.4209/aaqr.210258

Filtration of Submicron Soot Particles, Oil Droplets, and their Mixtures on Single- and Multi-layer Fibrous Filters

Mateusz Kamiński[1*], Jakub M. Gac[1], Piotr Sobiech[2], Paweł Kozikowski[2], Szymon Jakubiak[2], Tomasz Jankowski[2]

[1] Faculty of Chemical and Process Engineering, Warsaw University of Technology, 00-645 Warsaw, Poland
[2] Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, 00-701 Warsaw, Poland

ABSTRACT

The dynamics of filtration efficiency and pressure drop during the simultaneous filtration of soot and oil aerosols on single- and multi-layer filters were investigated, and the determined filtration efficiency was compared with the theoretical efficiency obtained via the classical filtration theory. Additionally, the influence of liquid-phase aerosols on the morphology of the formed deposits was investigated. It was concluded that the addition of oil aerosols decreased the filtration efficiency and lowered the pressure drop increase rate for multi-layer filters. Additionally, for the filtration of aerosols containing soot and high oil concentrations, once maximum filtration efficiency was reached, an efficiency decrease occurred. The system imperfection factor was proposed as a mean to predict the efficiency of multi-layer filters. The modified version of the single fibre efficiency method was used to calculate filter mass change with reasonable accuracy.

Keywords: Fibrous filters, Filtration dynamics, Filtration efficiency, Mixed aerosols, Submicron aerosols

OPEN ACCESS

Received: September 29, 2021
Revised: February 4, 2022
Accepted: February 7, 2022

* **Corresponding Author:**
Mateusz.Kaminski.dokt@pw.edu.pl

Publisher:
Taiwan Association for Aerosol Research
ISSN: 1680-8584 print
ISSN: 2071-1409 online

Copyright: The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are cited.

1 INTRODUCTION

Fibrous filters are widely utilised in industrial (Agranovski and Braddock, 1998a, b), health (González *et al.*, 2016; Praphawatvet *et al.*, 2020; Sutherland, 2008) and other applications, such as heating, ventilation, and air conditioning installations (HVAC) (González *et al.*, 2016). Fibrous filters have been thoroughly studied due to their common utilisation in removing solid and liquid particles suspended in gases and are continuously studied due to constant filter performance requirement revisions, filter adaptation for new applications, and overcoming filter limitations. The filtration process of solid particles from a gas stream utilising nonwoven filters is well established. The classical filtration theory (CFT), developed based on experimental results and theoretical concepts, allows the prediction and understanding of filtration efficiency dependence on particle diameter and filter morphology (Lee and Liu, 1982, 1981). The previous studies provided a description of the evolution of filtration efficiency and pressure drop during the filtration process (Thomas *et al.*, 1999).

According to the CFT, the initial filtration efficiencies of liquid and spherical solid particles can be described the same way (Agranovski and Braddock, 1998a, b; Contal *et al.*, 2004); however, the dynamics of the liquid droplet and solid particle filtration differ significantly because the droplets deposited on the filtration fibres form a liquid film or liquid bridges instead of the characteristic dendrite-like deposits formed by solid particles (Contal *et al.*, 2004). Multiple studies determined that the exact behaviour of a system during filter loading with liquid depends on various factors such as fibre wettability, change in fibre diameter during filtration, packing density, and surface area changes due to the different ways droplets can attach to the fibres (Contal *et al.*, 2004).

They also considered factors such as the kinetics of the collision between the droplet and the fibre and fibre/surface properties (Gac and Gradoń, 2012, 2011). These studies provide a theoretical description of the evolution of liquid droplet filtration on fibrous filters and have improved the description of the pressure drop dynamics during mist filtration (Gac, 2015). These theoretical results concur with the experimental results. Despite this significant progress, numerous uncertainties remain, such as the evolution of efficiency and pressure drop during filter loading with liquid aerosol, the simultaneous filtration of solid and liquid particles, phobic systems, entrainment, and secondary aerosol generation (Mead-Hunter *et al.*, 2014).

The logical continuation to investigation on single-phase aerosol filtration was the consideration of solid-liquid mixture aerosol filtration. Previous studies have been performed on the influence of trapped liquid in the filter structure on solid particle filtration and vice versa. Müller *et al.* (2014) investigated the pre-coating of filtration fibres with oil to improve dust filtration efficiency, whereas Mead-Hunter *et al.* (2012) studied the influence of deposited soot particles on oil mist filtration in fibrous filters. Another work on this subject is the paper by Boskovic *et al.* (2007) where the filtration of solid nanoparticles of different size on oil coated fibres has been considered. The authors found that after coating of fibres with oil the filter performance characteristics became similar for all particle shapes. The reason was that the oil coating minimizes the amount of particle motion along the fibre after the initial collision. Other studies investigated the consecutive filtration of solid and liquid aerosols (Gac *et al.*, 2018, 2016) to determine the influence of solid deposits on droplet filtration and the morphology reorganisation of these deposits during filtration. It has been proven that liquid aerosol addition results in lower efficiency in the consecutive filtration of solid and liquid particles because liquid droplets destroy the dendrite-like structures, and the liquid deposited on the fibres prevents their formation (Gac *et al.*, 2016). The origin of destruction (collapse) of dendritic structures by addition of liquids during or before deposition of solid particles has been first proposed by Müller *et al.* (2014). The full numerical model of this phenomenon was presented in details in our previous work (Gac *et al.*, 2018). We have shown that in the presence of liquid film during the aerosol deposition, additional interactions between solid particles appear, which build the agglomerate. These interactions are: Capillary forces that act between solid particles trapped on the surface of liquid or immersed liquid film (Kralchevsky *et al.*, 1995) and liquid bridging forces which result from the presence of so-called "liquid bridges" between solid particles. When solid particles are close enough but do not touch each other and are connected by a liquid bridge, the surface tension of liquid acts on the solid particles (Lian *et al.*, 1993). In the paper (Gac *et al.*, 2018) numerical simulations have been carried which allowed to track the change in the structure of agglomerates. The obtained results are consistent with scanning electron microscopy (SEM) observations.

Some of the above-mentioned results apply to the filtration of solid-liquid aerosol mixtures; however, these processes have been minimally investigated. Frising *et al.* (2004) analysed the evolution of pressure drop during mixed aerosol filtration, and our previous study (Kamiński *et al.*, 2020) provided insight into the influence of water droplets in gas on the filtration of solid particles and the morphology of deposits. However, advanced studies and data on efficiency and pressure drop that allow easy comparison and validation of the results, e.g., complex systems involving both solid and liquid aerosols (Mead-Hunter *et al.*, 2014), have not yet been performed.

This study investigates the dynamics of the simultaneous filtration of solid and liquid nanoparticles on fibrous filters and focuses on the evolution of filtration efficiency and pressure drop caused by particle deposition on the fibres. The results show the effect of the dendrite-like structure formation on the surface of the fibres on the efficiency and pressure drop and the effect of the addition of oil (di-ethylhexyl-sebacate, DEHS) on their initial values and evolution. Solid particles are represented by soot due to its similarity to diesel soot, one of the most common air pollutants (Löffler, 2004). The liquid particle aerosol was produced utilising DEHS due to its fibre wetting ability, which complements our previous study that utilised water (Kamiński *et al.*, 2020).

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Filters

The filters utilised in the experiments were made of polypropylene via the melt-blown technique.

Table 1. Properties of layers utilised in the experiments.

Filtration layer	Mean fibre diameter (μm)	Layer thickness (mm)	Packing density (-)
F1	1.38 ± 0.89	2.128 ± 0.073	0.035 ± 0.001
2F1		3.733 ± 0.137	0.031 ± 0.001
F6	6.67 ± 4.24	0.878 ± 0.089	0.127 ± 0.012
2F6		2.050 ± 0.089	0.115 ± 0.005
F13	13.24 ± 7.53	0.969 ± 0.050	0.182 ± 0.009
2F13		1.291 ± 0.062	0.246 ± 0.012

The layers are named after their mean fibre diameters, as listed in Table 1, and layer names beginning with "2" indicate layers with higher thicknesses but do not mean the layer is twice as thick. The diameters of the fibres were determined from images of fibres taken using a scanning electron microscope (HITACHI SU8010). The thickness of the layers was measured utilising mechanical contact method thickness tester (Tilmet 79). The thickness of the layers, their mass and the density of the material, were used to calculate the packing density.

The layers listed in Table 1 and their different combinations (e.g., F6/F13 and F13/2F6) were experimentally tested; however, layers F1 and 2F1 were not utilized in the multi-layer systems due to their high initial efficiencies, which prevents measurable changes in efficiency over time.

2.2 Experimental Setup

Filtration efficiency and pressure drop measurements were performed utilising the experimental setup presented in Fig. 1. The principal component of the setup is a horizontal stainless steel duct with an inner diameter of 80 mm, which has one inlet for the test aerosol: soot particle or oil droplet (di-ethyl-hexyl-sebacate, DEHS) aerosol, or mixtures of these aerosols. The aerosols were diluted with purified air, and the composition of the test aerosol was controlled utilising valves and mass flow controllers. The filter holder was designed for flat filter media with an effective filtration area of 50 cm^2, and the face velocity on the filter surface was 0.2 m s^{-1}. The residence time of the aerosol in the system from its formation to contact with the filter was 10.9 s. The purified air utilised for aerosol dilution was introduced at the central installation of compressed air and filtered via a filtered air supply 3074 B (TSI Inc., USA).

The soot particles were generated in an argon atmosphere utilising a GFG 1000 spark generator (Palas GmbH, Germany). The argon volume flow rate was 5 dm^3 min^{-1}, the spark frequency between the graphite electrodes during the experiment was 450 Hz, and the graphite density was 2090 kg m^{-3}.

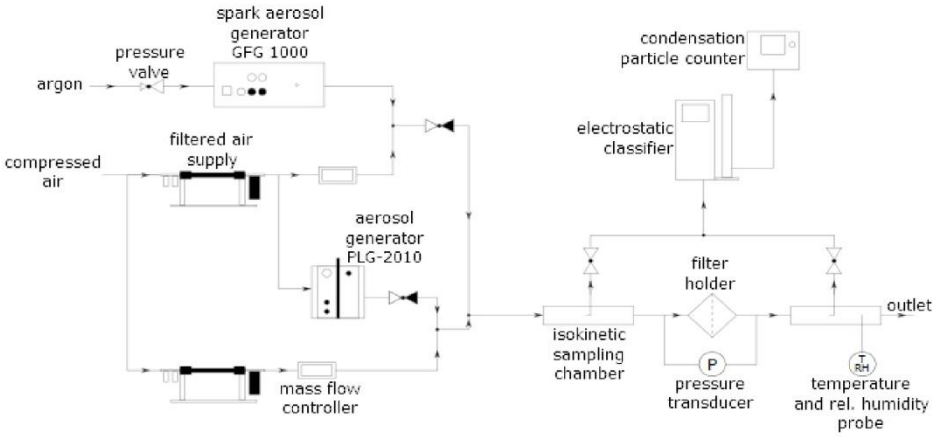


Fig. 1. Experimental setup utilised to investigate filter efficiency and pressure drop during aerosol particle filtration.

Oil droplets were generated utilising a PLG-2010 generator (Palas GmbH, Germany). The oil density was 914 kg m^{-3}, and generator pressures of 1 and 2 bar achieved for the flow of 14.3 and 22.7 dm^3 min^{-1} were utilized to produce the low- and high-concentration oil aerosols, respectively. Descriptions of the aerosols are provided in the following section.

The aerosol filtration efficiencies were determined based on the overall particle number concentrations downstream of the filter. These concentrations were measured utilising a scanning mobility particle sizer (SMPS) spectrometer (TSI Inc., USA) which enabled the measurement of the concentration of particles with sizes ranging from 32.2–735.6 nm. It consist of an ultrafine condensation particle counter (UCPC 3776) and electrostatic classifier 3082 utilising a DMA 3081A. A P26 differential pressure transducer (Halstrup Walcher, Germany) was utilised to measure the pressure drop across the filters, and the temperature and relative humidity of the air downstream of the filter were measured utilising a thermo-hygrometer HP23-A (Rotronic, Switzerland). The temperature of aerosols was about 295 K, and the relative humidity of air was about 5%.

After loading with soot and oil particles, the fibres were observed utilising a HITACHI SU8010 high-resolution field emission scanning electron microscope. The samples were coated with gold utilising a Quorum Q150T ES sputter coater to increase the conductivity. Observations were conducted at acceleration voltages and magnifications of 10 kV and 2000× (Fig. 4(a)), 5 kV and 500× (Fig. 4(b)), and 2 kV and 500× (Fig. 4(c)).

2.3 Aerosols

Five different aerosols were utilised in the experiments, soot aerosol, high- (oil_h) and low- (oil_l) concentration oil aerosols.The authors decided to also investigate two mixture systems differing in liquid particles concentration (soot+oil_h, soot+oil_l). The main purpose of showing a series containing a lower oil concentration (soot+oil_l) is to draw attention to the lack of clearly visible maximum in the efficiency in this system. Comparison of the two mixture cases allows conclusions to be drawn about the effect of the amount of oil deposited on the fibres on the occurrence of this effect. The case of sole soot and sole oil aerosol is intended as a background for a more interesting mixture aerosol case allowing a comparison, using scanning electron microscopy, of the differences in the structure of the deposits on the filter fibres and their influence on filtration efficiency.

Total concentration, weighted arithmetic mean particle diameter, and their standard deviations were calculated based on 55 measurements of the soot and oil_h aerosols and 85 measurements of the other aerosols and are presented in Table 2. The total concentrations of the mixed aerosols are lower than the sum of their component aerosols due to the high particle concentration, resulting in particle interactions.

The size distributions of the aerosols are presented in Fig. 2. It can be seen that for oil_h aerosol the particle concentration for the cut-off size (735.6 nm) is significantly higher compared to the other aerosols.

An important issue is to determine whether the flow of mixed aerosol (soot particles and DEHS droplets) between the place where they are mixed and the filter where they are captured does not cause particles or droplets to merge with each other. To this end, we carried out aerosol distribution measurements (without the presence of a filter) for three lengths of the inlet pipe. For each of these lengths, we have determined the first three distribution moments, defined as follows:

$$M_k = \int v^k n(v,t) dv \quad (1)$$

These first three moments have a well-defined physical meaning. The moment $M_0 = \int n(v,t) dv$

Table 2. Properties of the aerosols utilised in the experiments.

Aerosol	soot	oil_h	soot+oil_h	oil_l	soot+oil_l
Mean particle diameter (nm)	88.32	226.69	190.34	224.84	103.25
Diameter standard deviation (nm)	56.18	138.11	141.88	145.78	78.69
Total concentration (particles cm^{-3})	8.64E6	8.89E6	12.82E6	0.77E6	9.39E6
Concentration standard deviation (particles cm^{-3})	0.07E6	0.16E6	0.12E6	0.05E6	0.06E6

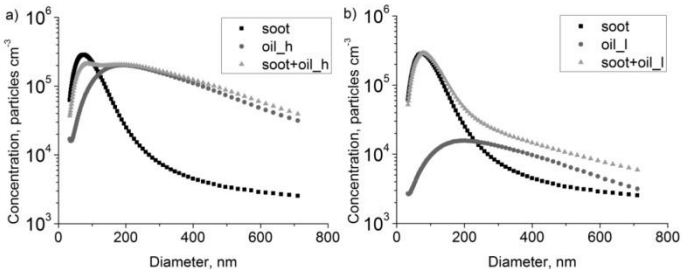


Fig. 2. Particle size distributions of generated (a) soot particles, high-concentration oil aerosol (oil_h), and their mixture (soot+oil_h), and (b) soot particles, low-concentration oil aerosol (oil_l), and their mixture (soot+oil_l)

is a total concentration of particles of any volume, the moment $M_1 = \int v \cdot n(v,t)dv$ is a total volume of all the particles (per the volume of the system) and the moment M_2 is connected with mean particle volume by means of expression $\langle v \rangle = M_2/M_1$. This means that if there is agglomeration in the system, the zero moment should be decreasing, and the second moment - an increasing function of the inlet length. The values determined by us, however, did not confirm this tendency - hence the conclusion that the length of the aerosol inlet line does not play a significant role. The difference between the particle size distribution and total concentration of a mixed aerosol and the sum of the respective sole aerosols results from the agglomeration that occurs at the place where aerosols are mixed.

2.4 CFT Calculations

The filtration efficiency calculations were performed utilizing the single fibre efficiency method (see appendix A). For the calculations of later stages of filtration, the effect of loading the filters with deposits was taken into account. The volume of deposits affects the packing density, which leads to a change in average velocity in the filter and diameter of the fibres. In the case of solid particles, their effective density depends on their actual dimensional structure. The effective density for solid and mixture aerosols was calculated. Based on that, for each time step, the volume of deposits, the mass of deposits, packing density, average velocity, and fibre diameter was calculated (see appendix B). Based on these values, the new filtration efficiency was obtained, and all the calculations were repeated for the next time step. The total efficiency of the filter was calculated based on the fractional efficiency and the shares of individual fractions of particles in the aerosol (Fig. 2).

3 RESULTS

3.1 Scanning Electron Microscopy

Fig. 3(a) shows the hierarchical structure of the agglomerates formed on the surface of the fibres during soot aerosol filtration. Fig. 3(b) shows that the surfaces of the fibres are covered with oil during oil_h aerosol filtration and that oil is collected at the fibre connection and contact points. Some barrel-shaped droplets were observed on the smaller fibre surfaces. Fig. 3(c) shows that for mixed aerosol soot+oil_h, the comprehensive dendrite structure made of soot particles was not present, and the soot particles clustered together and were oil covered. The particle clusters may be the remnants of a residual structure formed in the initial filtration phase when the fibres are not yet uniformly coated with oil. Similar to oil_h aerosol filtration, the fibres and their junction points were covered in oil.

3.2 Single-layer Filters

Fig. 4 presents the efficiency changes of the single-layer filters during loading. Each measurement period was 64 min, and the first 4 min were omitted due to reading instability during this period.

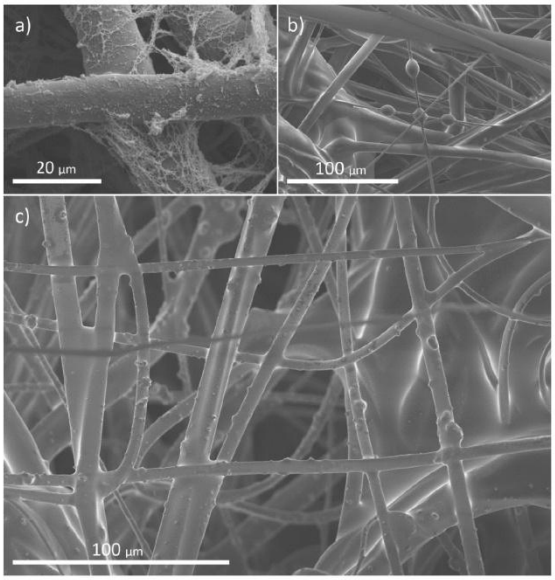


Fig. 3. Scanning electron microscope images of filtration deposits formed during (a) soot aerosol, (b) oil_h aerosol, and (c) soot+oil_h mixture filtration.

The lowest efficiency for all the filters occurred utilizing oil_h aerosol, followed by the soot+oil_h aerosol. The second-highest efficiency occurred utilizing the soot+oil_l aerosol, and the highest efficiency occurred utilizing the soot aerosol, except for filters F13 and F1, where the last two are in reverse order. For the soot+oil_h aerosol, there is an evident efficiency increase until the maximum efficiency is reached, after which the efficiency decreases or stabilizes. The efficiency of the oil_h aerosol was constant for the measurement period, except when utilized on the high-efficiency filters (F1 and 2F1), where the efficiency significantly decreases. A lower oil concentration does not drastically change the efficiency (particularly initial efficiencies for the soot and soot+oil_l aerosols are nearly equal for all the filters). However, a higher oil concentration results in an obvious efficiency decrease, attributed to the particles sliding on the fibres covered with a thin oil layer, which similarly occurs with the oil_h aerosol. This effect is more evident with higher oil concentrations.

Evident maximum efficiencies and significantly greater mass change (Section 3.5) occurred during soot+oil_h and oil_h aerosol filtration. The stage of coalescence was reached utilizing high-efficiency filters F1 (Fig. 4(e)) and 2F1 (Fig. 4(f)) for the filtration of oil_h aerosol, which decreased the filtration surface area which concurs with previous study results (Charvet and Thomas, 2017). The addition of soot produced maximum efficiency. This study determined that the initial efficiency increase was attributed to the increased efficiency of liquid (oil) particle filtration due to the presence of solid (soot) particles. The solid particles and hierarchical solid structures created additional surface areas for the adherence of the oil droplets. It can be expected that when maximum efficiency was reached, the filter was clogged with liquid and solid particles, causing deposit reorganisation (due to the presence of liquid bridges), increased particle velocity (due to reduced flow area), and entrainment (due to fibres reaching maximum capacity for particle attachment). It could explain the efficiency decrease that occurred after maximum efficiency was reached. This phenomenon is more evident for filters F1 and 2F1 than for filters 2F13 and 2F6 (Figs. 4(e), 4(f), 4(b), and 4(d), respectively), and this effect was more pronounced as the overall filter efficiency increased.

Fig. 5(a) shows the pressure drop change as a percentage of the initial value for filter F13 during the filtration of all the aerosols. It shows typical behaviour for filters 2F13, F6, 2F6. Fig. 5(b) shows

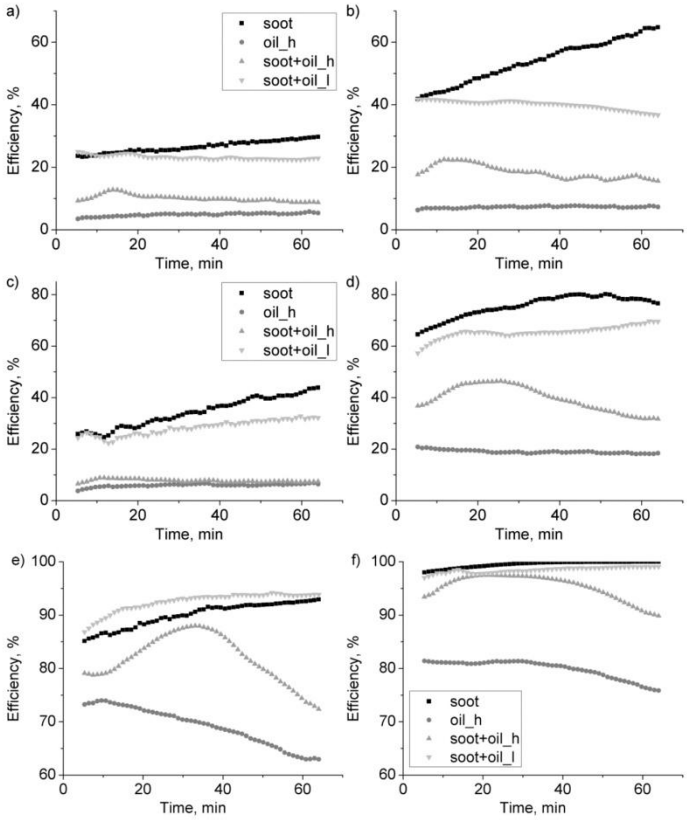


Fig. 4. Efficiency evolution for filters (a) F13, (b) 2F13, (c) F6, (d) 2F6, (e) F1, and (f) 2F1.

the pressure drop evolutions during soot aerosol filtration and the evident pressure drop increases for all the filters. Moreover, the addition of oil prevents the pressure drop from increasing to the same extent as that of soot aerosol. Figs. 5(c) and 5(d) show that the pressure drop increases for filters F1 and 2F1, attributed to their high efficiencies, causing them to become clogged by oil. This explains why the pressure drop change is lower when utilizing soot+oil_l aerosol, which destroys the solid structure on the fibres, but the concentration is not high enough to clog the filter.

Table 3 presents the measured and calculated initial stage efficiencies. The soot aerosol values have the highest correlation except for filter 2F6. The addition of oil aerosol significantly increases the difference, and the CFT overestimates the efficiency in cases when a high amount of oil is present in the system. The largest difference was observed for the oil_h aerosol.

To quantify the difference between the calculated efficiency using CFT and those measured a coefficient will be introduced describing the difference. We will call it the system imperfection factor (SIF). The expression defining the SIF is as follow:

$$E_{measured} = SIF \cdot E_{CFT} \tag{2}$$

where $E_{measured}$ and E_{CFT} denote the efficiency of the filter measured and computed utilizing CFT, respectively. It is expected that for filters and systems that meet CFT assumptions SIF is close to one, while when these assumptions, are not met - it can take any positive numbers. Table 3 shows the derived SIF values for single-layer filters and various systems.

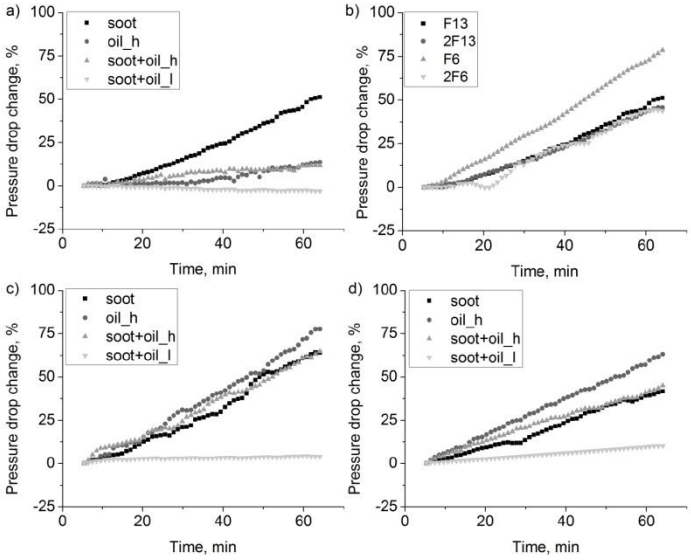


Fig. 5. Pressure drop evolution for filter (a) F13, (c) F1, (d) 2F1 during the filtration of different aerosols and (b) pressure drop evolution comparison for filters F13, 2F13, F6, and 2F6 during soot aerosol filtration.

Table 3. Efficiency comparison between calculated and measured initial stage efficiencies for single-layer filters and values of system imperfection factor.

Aerosol	soot			oil_h			soot+oil_h			soot+oil_l		
Filter	measured (%)	CFT (%)	SIF (-)	measured (%)	CFT (%)	SIF (-)	measured (%)	CFT (%)	SIF (-)	measured (%)	CFT (%)	SIF (-)
F1	85.5	96.5	0.89	73.4	97.7	0.75	78.9	97.1	0.81	87.5	96.6	0.91
2F1	98.1	99.3	0.99	81.3	99.5	0.82	93.7	99.4	0.94	97.3	99.3	0.98
F6	26.3	34.5	0.76	4.2	35.5	0.12	7.0	35.0	0.20	25.4	34.7	0.73
2F6	65.4	61.0	1.07	20.6	59.0	0.35	37.1	60.0	0.62	58.7	60.9	0.96
F13	22.0	21.4	1.03	3.8	17.9	0.21	9.5	19.6	0.48	24.7	21.1	1.17
2F13	42.5	40.9	1.04	6.7	37.9	0.18	18.4	39.4	0.47	41.4	40.8	1.01

As has been expected, for soot filtration the values of SIF are close to 1 for every filter and are in the range from 0.76 to 1.07. Also for filtration of mixture soot+oil_l the values of SIF are close to one (between 0.73 and 1.17). For filtration of oil_h and soot+oil_h the values of SIF are smaller than one. For F1 and 2F1 filters, these values are still relatively close to 1 while for the remaining filters - much lower, ranging from 0.12 to 0.62. The comparison of these values allows us to conclude that CFT describes the efficiency of the filter with good accuracy in the case of filtration of solid particles (possibly with a small admixture of liquid particles). CFT also describes well the filtration efficiency on filters with the thinnest fibres, regardless of aerosol type. On the other hand, in the case of filters with coarser fibres and a high content of liquid aerosol, this method breaks down.

3.3 Multi-layer Filters

Fig. 6 presents the efficiency changes of the multi-layer filters during filtration, and the "*" symbol denotes the first filter layer. The obtained results were similar to those of the single-layer filters. The highest filtration efficiency for all the filters was obtained utilizing soot aerosol.

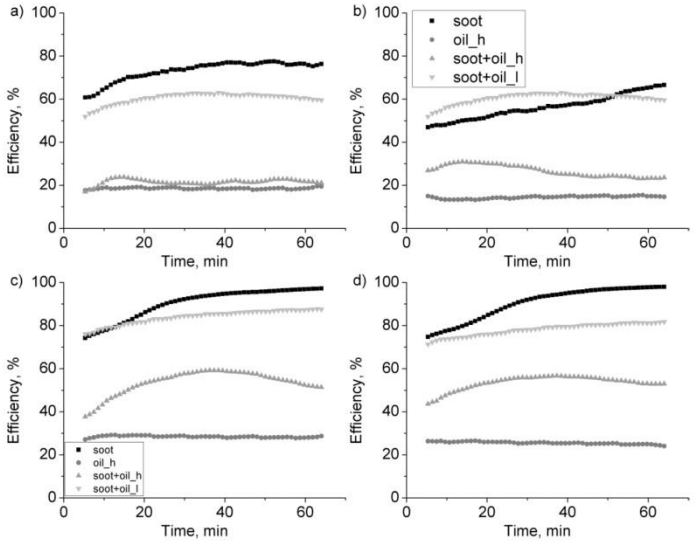


Fig. 6. Efficiency evolutions of filters (a) F6/F13*, (b) F6*/F13, (c) F13*/2F6, and (d) F13/2F6*.

The second-highest efficiency was obtained utilizing soot+oil_l aerosol for all the filters except filter F6*/F13, where the efficiency for soot was higher than for soot+oil_l just in the late stage of filtration. The third highest and the lowest efficiencies were obtained utilizing the soot+oil_h and oil_h aerosols, respectively. For the soot+oil_h aerosol, there is an evident maximum efficiency, after which the efficiency decreased or remained constant, and the efficiencies of all the filters utilising oil_h aerosol remained constant for the entire measurement period. Greater efficiency increases were observed utilizing soot and soot+oil_l aerosols with the multi-layer filters than with the single-layer filters.

A comparison of the efficiencies for the same multi-layer filters but with the layer order reversed shows that for both filters F13/2F6, there is no impact on efficiency due to the filter order. For filter F6/F13, the initial efficiency for soot was higher when F13 was the first filter, although a greater overall increase in efficiency was achieved when F6 was the first filter. A larger efficiency difference between the oil_h and soot+oil_h aerosols was observed for filter F6/F13 when F6 was the first filter. It can be attributed to the oil droplets sliding on the wetted fibres. When present in the system, soot helps capture the oil droplets, and because filter F6 has a higher efficiency towards soot than filter F13, a greater efficiency was achieved when filter F6 was the first layer.

Fig. 7(a) presents the pressure drop evolution of filter F6/F13* for four aerosols. The greatest pressure drop increase occurred utilizing soot aerosol, and for the aerosols containing oil, the pressure drop was significantly less or negligible than that of the soot aerosol. Like the single-layer filters, the addition of oil in the system significantly impacts the pressure drop evolution and produces a smaller pressure drop change.

A comparison of the pressure drop for the same multi-layer filters but with the order of the layers reversed shows that for filters F6/F13 and F13/2F6, there is no evident impact of the filter order on the pressure drop change during filtration of the oil-containing aerosols. It is evident from Fig. 7(b) that the only impact of the filter order was the filtration of soot aerosol by filter F6/F13, where a larger pressure drop change occurred when filter F13 was the first layer compared with F6 as the first layer. Although both layers had similar initial efficiencies (Figs. 4(a) and 4(c)), the higher packing density of filter F13 (Table 1) results in a more dynamic filling of the open spaces due to the expansion of the solid structure.

The pressure drop for all the single- and multi-layer filters increased during the filtration of soot aerosols due to the formation of a hierarchical structure on the surface of the fibres (Fig. 3(a)),

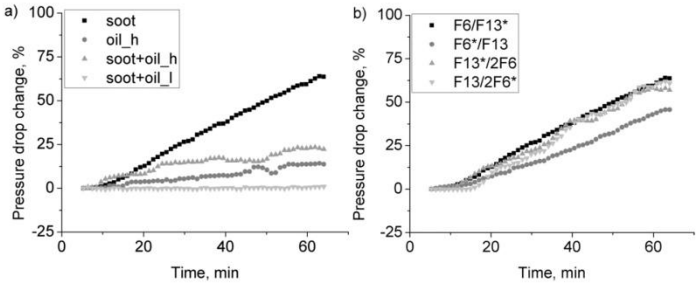


Fig. 7. (a) Pressure drop evolution for filter F6/F13* during the filtration of different aerosols and (b) comparison of the pressure drop evolution for filters F6/F13*, F6*/F13, F13*/2F6, and F13/2F6* during the filtration of soot aerosol.

which also increased the filtration efficiency. However, the presence of oil in the aerosol prevents soot structure formation (Fig. 3(c)), and consequently, the pressure drop does not change significantly, except for the highly efficient filters (F1 and 2F1). For the highly efficient filters (F1 and 2F1), the observed pressure drop increases were attributed to the filters becoming clogged with oil and soot particles, which also correlate with their mass changes, as shown in Fig. 8. Müller *et al.* (2014) determined that consecutive filtration of solid and liquid aerosols destroys the solid structure until the remaining areas are fully covered in liquid. For consecutive filtration of liquid and solid aerosols, the solid particles penetrate deep into the liquid film, creating a structure inside the film, and when the film capacity for solid particles is exhausted, the structure is built outside the film. However, this phenomenon was not observed in this study, even though the mass changes for the mixed aerosols were greater than that for the oil aerosols (Section 3.5). Simultaneous filtration of solid and liquid particles did not lead to solid structure formation because the constant collisions between the new particles captured from the aerosol stream and those already deposited on the fibres prevented structure formation.

Contrary to the results obtained by Mead-Hunter *et al.* 2012), the results of this study indicate that the presence of solid particles in a film formed on the surface of the fibres does not result in an increased pressure drop. This may be due to the formation of agglomerates in the oil captured on the fibres (Fig. 3(c)), which prevented solid particles from being evenly distributed in the oil film.

3.4 Multi-layer Filters Efficiency Calculations Utilising System Imperfection Factor

Table 4 compares the calculated and measured initial stage efficiencies for the multi-layer filters. Similar to the calculations for the single-layer filters, the theoretically expected efficiencies for the multi-layer filters were calculated utilizing the CFT as a product of the efficiencies of the respective layers assuming they perform independently, i.e.:

$$P_{filter} = P_{layer1,CFT} \cdot P_{layer2,CFT} \quad (3)$$

Table 4. Efficiency comparison between calculated and measured initial stage efficiencies for multi-layer filters.

Aerosol	soot			oil_h			soot+oil_h			soot+oil_l		
Filter	measured (%)	CFT (%)	CFT-SIF (%)	measured (%)	CFT (%)	CFT-SIF (%)	measured (%)	CFT (%)	CFT-SIF (%)	measured (%)	CFT (%)	CFT-SIF (%)
F6/F13*	61.0	48.5	42.5	17.9	47.1	7.9	17.7	47.8	15.8	53.0	48.5	48.9
F6*/F13	47.4			14.5			27.2			53.3		
2F6/F13*	75.1	69.3	73.0	27.6	66.3	23.6	38.7	67.8	43.1	76.4	69.2	71.7
2F6*/F13	75.5			26.3			44.3			72.2		

CFT: classical filtration theory; CFT-SIF: classical filtration theory modified with SIF.

$$E_{filter} = 100 - P_{filter} = 100 - (100 - E_{layer1,CFT})\cdot(100 - E_{layer2,CFT})/100 \quad (4)$$

where P_{filter} and E_{filter} are, respectively, penetration and efficiency of the multi-layer filter and $P_{layer1,CFT}$ and $E_{layer1,CFT}$ are the same quantities calculated for single layer utilizing CFT.

For the multi-layer filters, similar to the single-layer filters, relative differences for soot aerosol are low, and like for the single-layer filters, the addition of high concentration oil aerosol greatly increases the relative difference. The CFT overestimated efficiencies in all cases where a high amount of oil was present in the system and underestimated where a low amount of oil was present in the system.

We may improve the agreement between experimental and computational efficiency by replacement of Eq. (4) with the following equation, containing SIF coefficients, which have been introduced in the previous section Eq. (2):

$$E_{filter} = 100 - (100 - SIF_{layer1}\cdot E_{layer1,CFT})\cdot(100 - SIF_{layer2}\cdot E_{layer2,CFT})/100 \quad (5)$$

Results of calculations are presented in Table 4.

By analysing these results, we recognize that the agreement between experimental and theoretical results has been improved for aerosols containing oil. This improvement is much more visible for systems with a high amount of oil. The maximal value of relative difference is now about 60% (for 2F6/F13 filter) instead of over 200%, but for most filters, it does not exceed 30%. For sole soot aerosol, relative difference is lower for two cases, but for the other two, it's higher. Moreover, in almost every case (except 2F6/F13*, soot+oil_h), CFT modified with SIF underestimates the efficiency of multi-layer filters, which wasn't the case for unmodified CFT (overestimating for aerosols containing a high amount of oil and underestimating for other aerosols).

The CFT does not consider all the effects occurring in the filter during liquid aerosol filtration; therefore, it greatly overestimates the filtration efficiency when oil is present in the system. We introduced the system imperfection factor, which allowed us to describe the deviation of the filter efficiency value from the value determined using CFT in a situation where the assumptions of the latter method are not met. The values of this coefficient allowed us to determine the efficiency of multi-layer filters with reasonable accuracy (much better than pure CFT for aerosols containing a high amount of oil). On this basis, it can be concluded that the SIF coefficient may become a convenient tool for predicting the efficiency of filters with a complex structure.

3.5 Mass Changes

Fig. 8(a) presents the changes in the mass of the single-layer filters cause by fibre loading during filtration, and Fig. 8(b) shows the mass change of each layer of the multi-layer filters after filtration. For both the single- and multi-layer filters, the most significant changes occurred utilizing high oil concentration aerosols (oil_h and soot+oil_h), and the smallest change occurred utilising soot aerosol. Even a small addition of oil increases the mass change by one order of magnitude. The filter 2F1 mass change was lower than that of filter F1 for all the oil-containing aerosols. It can be attributed to their high efficiencies (Figs. 4(e) and 4(f)), resulting in most of the aerosols

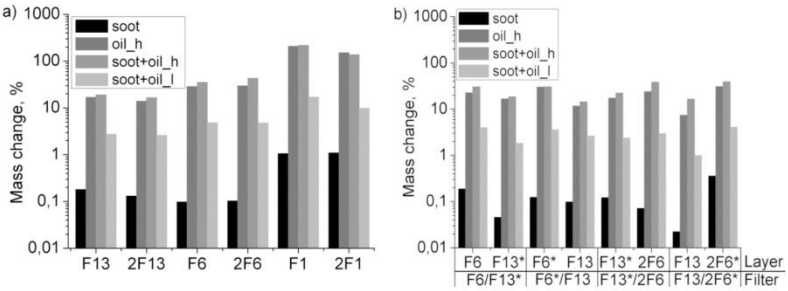


Fig. 8. Mass changes of (a) single- and (b) multi-layer filters utilizing different aerosols.

Table 5. The relative difference between the calculated and measured change in mass of filters for different aerosols.

Aerosol	soot			oil_h			soot+oil_h			soot+oil_l		
Filter	measured (g)	CFT (g)	RD (%)	measured (g)	CFT (g)	RD (%)	measured (g)	CFT (g)	RD (%)	measured (g)	CFT (g)	RD (%)
F1	0.0090	0.0111	23.4	1.1545	0.4536	–60.7	1.1649	0.5246	–55.0	0.1163	0.0787	–32.3
2F1	0.0097	0.0112	16.3	1.1866	0.4539	–61.7	1.1980	0.5250	–56.2	0.0917	0.0792	–13.6
F6	0.0049	0.0054	8.8	0.2722	0.3571	31.2	0.3123	0.4242	35.8	0.0477	0.0533	11.7
2F6	0.0057	0.0073	27.5	0.5097	0.3925	–23.0	0.7210	0.4601	–36.2	0.0663	0.0624	–5.8
F13	0.0024	0.0026	7.7	0.2157	0.2120	–1.7	0.2475	0.2578	4.2	0.0304	0.0314	3.3
2F13	0.0047	0.0055	16.4	0.3045	0.3549	16.6	0.3865	0.4209	8.9	0.0535	0.0539	0.8

CFT: classical filtration theory; RD: relative difference.

being captured at or near the filter surface. The areas located deeper in the high-efficiency filters do not capture a significant number of particles; therefore, the additional volume of these filters is not fully utilised, particularly for filter 2F1. The mass changes for the multi-layer filters were larger for the filtration of soot+oil_h aerosol than for oil_h aerosol. The addition of soot to the system increases the available surface area for oil to be captured because the solid soot particles are deposited on the fibres. As shown in Fig. 3(c), soot creates structures that protrude from the liquid film, increasing the surface area, and become coated with oil.

Table 5 shows the relative difference between the calculated and measured change in mass after 64 min long filtration and simulation. As the results presented are results for single-layer filters, the values were calculated without using SIF. In the case of sole soot aerosol results of our simulations provide good accuracy. In the case of oil_h used method underestimates the mass of the deposits for filters F1, 2F1, 2F6. It can be due to their high efficiency (Fig. 4). Our simulation takes into account particles of sizes from 32.2 to 735.6 nm. Particle size distribution (Fig. 2) shows that the particle concentration for the upper size limit does not reach zero. On this basis, it may be assumed that particles outside of this range are present in the system. The impact of those out-of-size range particles (above 735.6 nm) on the mass change is higher in the case of oil_h than soot because of their higher effective density. The effective density of liquid droplets does not change with their diameter. On the contrary, in the case of agglomerates of solid particles, their effective density is lower the bigger their diameter is. The same effect of underestimating the mass can be seen for mixed aerosols. Additionally, the value of the relative difference is lower when the amount of oil in the system is lower.

The final calculated values of effective densities utilized for efficiency calculations are as follows. In the case of sole soot aerosol, the effective density was the one calculated Eq. (B-4) for the mean particle diameter (Table 2) and was 280.28 kg m^{-3}. In the case of oil_h, it is the density of the DEHS oil (914.0 kg m^{-3}). We assume that droplets have no porosity and are perfect spheres. For the mixed aerosols, the effective density is based on their predicted contributions in the final mass change of the given filter according to soot and oil_h cases. It is because the presence of even a small amount of oil leads to greater change in mass than that associated with sole soot aerosol and it leads to the destruction of the solid structure. The value of effective density for soot+oil_h aerosol was 907.54 kg m^{-3} and for soot+oil_l was 857.24 kg m^{-3}.

The method used to calculate the mass of deposits captured by the filters is characterized by reasonably good accuracy. In the case of aerosols containing oil droplets, the accuracy for high-efficient filters was influenced by the presence of large-sized oil droplets in the system. However, an accurate quantitative description of the impact of these droplets is difficult to account for due to equipment limitations. The concept of effective density allowed for a good accuracy for sole soot aerosol and mixed aerosols.

4 CONCLUSIONS

This study indicates that the presence of oil in the aerosols produces lower filtration efficiency, and the oil concentration in the aerosol affects the initial efficiency and efficiency change during filter loading.

The addition of oil_l aerosol resulted in a slower increase in or decreased efficiency, although its initial efficiency is similar to that of soot aerosol. Additionally, the pressure drop during filter loading with oil_l aerosol was significantly lower than that of the soot, oil_h, and soot+oil_h aerosols.

The addition of oil_h aerosol resulted in lower initial efficiency and the presence of an obvious maximum efficiency. Once the maximum efficiency was reached, the efficiency decreased, and the higher the overall filter efficiency, the greater the effect.

The proposed system imperfection factor (SIF) can be used to predict the efficiency of multi-layer filters.

The calculations carried out for the case of loading filters with particles and droplets have satisfactory accuracy. It can be further improved by including the presence of larger particle sizes in the model, especially in the case of mixed aerosols.

ACKNOWLEDGEMENT

This publication has been based on the results of a research task carried out within the scope of the fourth stage of the National Programme "Improvement of safety and working conditions" (2017–2019) - within the scope of state services - by the Ministry of Family, Labour and Social Policy. The Central Institute for Labour Protection - National Research Institute is the Programme's main co-ordinator.

APPENDIX A

The efficiency of the filter was calculated utilizing Eq. (A-1), which is based on the summary efficiency of different filtration mechanisms (A-2). We take into account interception (A-3), diffusion (A-6), inertia (A-9), and interactions between diffusion and interception (A-11).

$$E = 1 - \exp\left(1 - \frac{4 \cdot \eta \cdot \alpha \cdot Z}{(1-\alpha) \cdot \pi \cdot d_f}\right) \tag{A-1}$$

E - filter efficiency, η - calculated single fibre efficiency, α - packing density, Z - filter thickness, d_f - fibre diameter

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{in})(1 - \eta_d)(1 - \eta_i)(1 - \eta_{di}) \tag{A-2}$$

η_{in} - interception mechanism efficiency, η_d - diffusion mechanism efficiency, η_i - inertia mechanism efficiency, η_{di} - efficiency of diffusion and interception interactions

$$\eta_{in} = \frac{1+R}{2 \cdot Ku}\left(2 \cdot \ln(1+R) - 1 + \alpha + \left(\frac{1}{1+R}\right)^2\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) - \frac{\alpha}{2}(1+R)^2\right) \tag{A-3}$$

$$R = \frac{d_p}{d_f} \tag{A-4}$$

$$Ku = \frac{4 \cdot \alpha - \alpha^2 - 3}{4} - \frac{\ln(\alpha)}{2} \tag{A-5}$$

R - interception parameter, d_p - particle diameter, Ku - hydrodynamic factor of Kuwabara flow,

$$\eta_d = 1.6\left(\frac{1-\alpha}{Ku}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot Pe^{-\frac{2}{3}} \tag{A-6}$$

$$Pe = \frac{u \cdot d_f}{D} \tag{A-7}$$

$$D = \frac{k_B \cdot T \cdot C}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_f} \tag{A-8}$$

$$C = 1 + Kn\left(1.142 + 0.558 \cdot \exp\left(-\frac{0.999}{Kn}\right)\right) \tag{A-9}$$

$$Kn = \frac{\lambda}{d_f} \tag{A-10}$$

Pe - Peclet number, *u* - average flow velocity in filter, *D* - diffusion coefficient, k_B - Boltzmann constant, *T* - temperature, *C* - Cunningham slip correction factor, μ - fluid viscosity, *Kn* - Knudsen number, λ - mean free path

$$\eta_i = \left(\frac{Stk}{4 \cdot Ku^2}\right)\left(\left(29.6 - 28 \cdot \alpha^{0.62}\right) \cdot R^2 - 27 \cdot R^{2.8}\right) \tag{A-11}$$

$$Stk = \frac{\rho_e \cdot u \cdot d_p^2}{\mu \cdot d_f} \tag{A-12}$$

Stk - Stokes number, ρ_e - effective particle density,

$$\eta_{di} = 1.24\left(\frac{R^{\frac{2}{3}}}{(Ku \cdot Pe)^{0.5}}\right) \tag{A-13}$$

APPENDIX B

Eq. (B-1) was used to calculate new packing density after the total volume of deposits was captured by the filter during all the time steps up to the current one. New packing density was used to calculate the new average flow velocity in the filter (B-2) and the diameter of the fibre (B-3).

$$\alpha = \frac{V_f + V_d}{V_t} \tag{B-1}$$

$$u = \frac{u_0}{1 - \alpha} \tag{B-2}$$

$$d_f = d_p\left(\frac{\alpha}{\alpha_p}\right)^{0.5} \tag{B-3}$$

α - packing density, V_f - fibres volume, V_d - deposits volume, V_t - total clean filter volume, *u* - average flow velocity in filter with deposits, u_0 - average flow velocity in clean filter, d_f - calculated fibre diameter, d_p - clean fibre diameter, α_p - clean filter packing density

The effective density of solid particles was calculated with Eq. (B-4). The value of coefficient *f* = 2.3 was in accordance with (Maricq and Xu, 2004). The diameter of primary particles D_{pp} = 5 nm was based on the aerosol generator specification sheet.

$$\rho_e = \rho_0 \left(\frac{D_p}{D_{pp}} \right)^{f-3} \quad \text{(B-4)}$$

D_{pp} - primary particle diameter, D_p - measured particle diameter, ρ_0 - particle bulk density, ρ_e - effective particle density, f - fractal dimension

SUPPLEMENTARY MATERIAL

Supplementary material for this article can be found in the online version at https://doi.org/10.4209/aaqr.210258

REFERENCES

Agranovski, I.E., Braddock, R.D. (1998a). Filtration of liquid aerosols on nonwettable fibrous filters. AIChE J. 44, 2784–2790. https://doi.org/10.1002/aic.690441219

Agranovski, I.E., Braddock, R.D. (1998b). Filtration of liquid aerosols on wettable fibrous filters. AIChE J. 44, 2775–2783. https://doi.org/10.1002/aic.690441218

Boskovic, L., Agranovski, I., Braddock, R. (2007). Filtration of nanosized particles with different shape on oil coated fibres. J. Aerosol Sci. 38, 1220–1229. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2007.09.003

Charvet, A., Thomas, D. (2017). 6 - Filtration of Liquid Aerosols, in: Thomas, D., Charvet, A., Bardin-Monnier, N., Appert-Collin, J.C. (Eds.), Aerosol Filtration, Elsevier, pp. 161–188. https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-215-1.50006-8

Contal, P., Simao, J., Thomas, D., Frising, T., Callé, S., Appert-Collin, J.C., Bémer, D. (2004). Clogging of fibre filters by submicron droplets. phenomena and influence of operating conditions. J. Aerosol Sci. 35, 263–278. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2003.07.003

Frising, T., Gujisaite, V., Thomas, D., Callé, S., Bémer, D., Contal, P., Leclerc, D. (2004). Filtration of solid and liquid aerosol mixtures: Pressure drop evolution and influence of solid/liquid ratio. Filtr. Sep. 41, 37–39. https://doi.org/10.1016/S0015-1882(04)00075-8

Gac, J., Gradoń, L. (2011). Analytical investigation and numerical modeling of collisions between a droplet and a fiber. J. Colloid Interface Sci. 369, 419–425. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.12.018

Gac, J., Gradoń, L. (2012). Modeling of axial motion of small droplets deposited on smooth and rough fiber surfaces. Colloids Surf., A 414, 259–266. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.08.041

Gac, J. (2015). A Simple Numerical model of pressure drop dynamics during the filtration of liquid aerosols on fibrous filters. Sep. Sci. Technol. 50, 2015–2022. https://doi.org/10.1080/01496395.2015.1014496

Gac, J., Jackiewicz-Zagórska, A., Werner, Ł., Jakubiak, S. (2016). Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters. Sep. Purif. Technol. 170, 234–240. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.06.057

Gac, J., Jackiewicz-Zagórska, A., Werner, Ł., Jakubiak, S. (2018). Numerical modeling of solid deposits reorganization during consecutive solid-liquid aerosol filtration: Influence on the dynamics of filtration efficiency. J. Aerosol Sci. 119, 13–21. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.02.008

González, L.F., Joubert, A., Andrès, Y., Liard, M., Renner, C., Le Coq, L. (2016). Filtration performances of HVAC filters for PM_{10} and microbial aerosols— Influence of management in a lab-scale air handling unit. Aerosol Sci. Technol. 50, 555–567. https://doi.org/10.1080/02786826.2016.1167833

Kamiński, M., Gac, J.M., Sobiech, P., Kozikowski, P., Jakubiak, S. (2020). Filtration of aerosols containing graphite nanoparticles or their mixture with water droplets on single and multi-layer fibrous filters. Sep. Purif. Technol. 237, 116378. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116378

Kralchevsky, P.A., Paunov, V.N., Nagayama, K. (1995). Lateral capillary interaction between

particles protruding from a spherical liquid layer. J. Fluid Mech. 299, 105–132. https://doi.org/10.1017/S0022112095003442

Lee, K.W., Liu, B.Y.H. (1981). Experimental study of aerosol filtration by fibrous filters. Aerosol Sci. Technol. 1, 35–46. https://doi.org/10.1080/02786828208958577

Lee, K.W., Liu, B.Y.H. (1982). Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters. Aerosol Sci. Technol. 1, 147–161. https://doi.org/10.1080/02786828208958584

Lian, G., Thornton, C., Adams, M.J. (1993). A theoretical study of the liquid bridge forces between two rigid spherical bodies. J. Colloid Interface Sci. 161, 138–147. https://doi.org/10.1006/jcis.1993.1452

Löffler, F. (2004). Air filtration. Von C. N. Davies. Academic Press Inc., London 1973. Chemie Ing. Tech. 46, 364–364. https://doi.org/10.1002/cite.330460823

Maricq, M.M., Xu, N. (2004). The effective density and fractal dimension of soot particles from premixed flames and motor vehicle exhaust. J. Aerosol Sci. 35, 1251–1274. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.05.002

Mead-Hunter, R., Bredin, A., King, A.J.C., Larcher, A.V., Becker, T., Mullins, B.J. (2012). The influence of soot nanoparticles on the micro/macro-scale behaviour of coalescing filters. Chem. Eng. Sci. 84, 113–119. https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.08.016

Mead-Hunter, R., King, A.J.C., Mullins, B.J. (2014). Aerosol-mist coalescing filters – A review. Sep. Purif. Technol. 133, 484–506. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.06.057

Müller, T.K., Meyer, J., Thébault, E., Kasper, G. (2014). Impact of an oil coating on particle deposition and dust holding capacity of fibrous filters. Powder Technol. 253, 247–255. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.11.036

Praphawatvet, T., Peters, J.I., Williams, R.O. (2020). Inhaled nanoparticles–An updated review. Int. J. Pharm. 587, 119671. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119671

Sutherland, K. (2008). Section 6 - Gas Filtration, in: Sutherland, K. (Ed.), Filters and Filtration Handbook (Fifth Edition), Elsevier, Oxford, pp. 369–450. https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-464-0.00006-7

Thomas, D., Contal, P., Renaudin, V., Penicot, P., Leclerc, D., Vendel, J. (1999). Modelling pressure drop in HEPA filters during dynamic filtration. J. Aerosol Sci. 30, 235–246. https://doi.org/10.1016/S0021-8502(98)00036-6

Aerosol and Air Quality Research

ORIGINAL RESEARCH
https://doi.org/10.4209/aaqr.220039

Mixture Aerosols Filtration on Filters with Wide Fibre Diameter Distribution - Comparison with Theoretical and Empirical Models

Mateusz Kamiński[1*], Jakub M. Gac[1], Piotr Sobiech[2], Paweł Kozikowski[2], Tomasz Jankowski[2]

[1] Faculty of Chemical and Process Engineering, Warsaw University of Technology, ul. Waryńskiego 1, 00-645 Warsaw, Poland
[2] Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warsaw, Poland

ABSTRACT

A methodology for calculating aerosol filtration efficiency using non-woven filters with polydispersity distribution of fibre diameters was formulated. In order to verify the results of the calculations experimentally, filters made of polypropylene non-woven fabric were used to filter solid (soot) and liquid (oil) aerosols and their mixtures with different concentrations. In order to increase the accuracy of the calculations, the division of the diameter distribution into several (1–100) ranges of values was considered. The influence of the number of these intervals for theoretical and empirical equations available in the literature was investigated. This effect was found to be significant, and replacing one diameter value representing all the fibres in the filter with twenty diameter ranges, each representing only a fraction of the total fibres, is sufficient to minimize the error due to the underrepresentation of the actual fibre distribution in the filter. Calculation of the mean particle size after the filter was performed using a set of theoretical and empirical equations. The calculations take into account the change in packing density, flow velocity and fibre diameter over time as a result of filling the filter with particles deposited on it. The obtained results were compared with the measurement results. It has been found that such changes in the monofilament performance model are insufficient to properly describe the effects inside the filter.

Keywords: Fibrous filters, Filter clogging, Filtration dynamics, Efficiency models, Mixture aerosols

OPEN ACCESS

Received: January 24, 2022
Revised: March 25, 2022
Accepted: April 26, 2022

* **Corresponding Author:**
Mateusz.Kaminski.dokt@pw.edu.pl

Publisher:
Taiwan Association for Aerosol Research
ISSN: 1680-8584 print
ISSN: 2071-1409 online

Copyright: The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are cited.

1 INTRODUCTION

The single fibre efficiency model is widely used to calculate initial filter efficiency. Its simplicity allows it to be used for calculations for different types of particles and filters. At the same time, its accuracy is insufficient in many cases, i.e., filters with polydisperse fibres distribution (Kirsch and Stechkina, 1973; Steffens and Coury, 2007), especially as the area of interest has shifted towards submicron particles and the evolution of filtration efficiency during the process (Löffler, 2004). In addition, the multitude of methods for manufacturing non-woven filters and their widespread use in filtration processes poses the challenge of finding methods to describe as accurately as possible the behaviour of filters with different properties (Hutten, 2007; Mao, 2016).

Many improvements to the single fibre efficiency model have been proposed. These improvements have taken into account both polydispersity of fibrous filters and the formation of particle deposits which could also change the filtration efficiency at later stages of the process.

First group of improved models have assumed that, though the polydispersity of fibrous media, all the fibres may be considered as having the same mean or "effective" diameter (Löffler, 2004; VanOsdell *et al.*, 1990). The next step was the assumption, that the fibre diameter distribution

has a predetermined form, e.g., log-normal distribution (Jackiewicz *et al.*, 2013; Tronville *et al.*, 2008). The next step was the use of Fully Segregated Flow Model (FSFM) and Perfectly Mixed Flow Model (PMFM) which allowed to consider practically any distribution of fibre diameters (Podgorski *et al.*, 2011). The application of these models has improved reliability and accuracy for particle sizes close to the most penetrating particle size (MPPS) (Jung *et al.*, 2013; Lee and Liu, 1980; Podgorski *et al.*, 2011). Parallelly, approaches based on the numerical description of the fluid flow through the filter medium were used. The classical computational fluid dynamics (CFD) methods were used as numerical methods: finite element method (Kang *et al.*, 2019; Sambaer *et al.*, 2011) or lattice Boltzmann method (Zhou *et al.*, 2017). The consideration of particle deposits formation inside the filter and on the filter surface allowed for a significant increase in accuracy when describing the clogging of the filter with solid particles (Fotovati *et al.*, 2012; Thomas *et al.*, 2019, 1999).

However, all the above research focuses on the use of filters with a polydisperse distribution of fibre diameters, primarily for the filtration of solid particles, less often-liquid particles. However, real-world applications require consideration of the presence of mixture aerosols. In many cases, the filtration process deals with the simultaneous removal of solid particles of different morphology and liquid particles of different wettability towards the filter fibres.

Filtration of mixture aerosols differs from filtration of sole solid or sole liquid aerosols. Interactions between particles in the case of simultaneous filtration of solid and liquid particles lead to changes in the filter structure that have a significant impact on filter efficiency (Agranovski and Shapiro, 2001; Gac *et al.*, 2018, 2016; Mullins *et al.*, 2003). Previous studies carried out for consecutive filtration of solid and liquid particles have partly revealed the mechanisms of formation and degradation of the solid structure formed from the solid particles deposited on the fibres. In earlier studies, solid particle filtration was also investigated when the fibres were pre-coated with liquid (Müller *et al.*, 2014).

This study investigates the changes in an average particle size downstream from the filter during filtration of sole solid, sole liquid and simultaneous solid and liquid particles. For solid particles, soot-like graphite particles were utilised due to their presence in the air as a common pollutant (Löffler, 2004). For liquid particles, di-ethylhexyl-sebacate (DEHS) oil was utilised due to the stability of the formed aerosol and its widespread use as a research material, which enables easy verification of the results and data comparison (Mead-Hunter *et al.*, 2014). The data obtained from experiments were compared with simulation performed for two sets of equations. The simulation of filter loading with deposited particles took changes in packing density, flow velocity and fibre diameter into account. For that reason, chosen equations had to be reliable in a wide range of parameter changes. Additionally, the influence of the number of diameters taken for the single fibre efficiency model calculations was investigated.

2 METHODS

2.1 Experimental Setup

Measurements were performed utilising the setup presented below in Fig. 1. The filter samples were disc-shaped with a diameter of 100 mm, with only a segment of 80 mm in diameter being exposed to aerosol flow. Based on measured aerosol flow from generators, the flow of air was adjusted to keep the face velocity on the filter surface at 0.2 m s^{-1} for each aerosol. The soot particles were generated from a graphite electrode with a density of 2090 kg m^{-3} by means of a spark aerosol generator GFG 1000 (Palas, Germany). The liquid particles were generated from DEHS oil with a density of 914 kg m^{-3} by means of Laskin nozzle based generator PLG-2010 (Palas, Germany). Each measurement cycle was 64 min long. Although some filter loading happens during the first 4 min, they are omitted on graphs due to instability in initial readings provided by the particle counter UCPC 3776 (TSI Inc. USA). Utilised experimental setup allowed the concentration measurements for particles with sizes ranging from 32.2–735.6 nm. The temperature of aerosols was about 295 K, and the relative humidity of air was 5%.

2.2 Filters

The properties of filters utilised in experiments are listed in Table 1. Filters were made of polypropylene using the melt-blown technique. The filters utilised in experiments were not

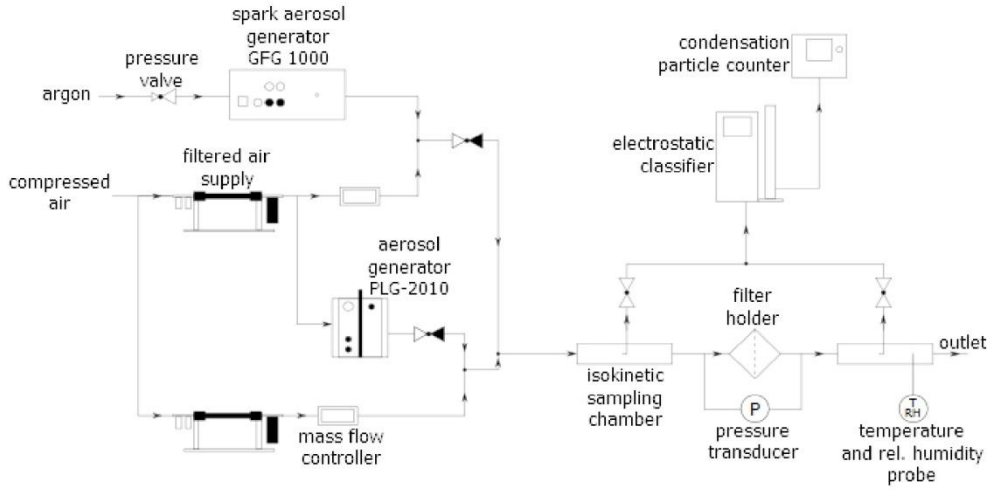


Fig. 1. Experimental setup utilised for efficiency and filter loading investigation.

Table 1. Properties of filters utilised in the experiments.

Filtration layer	Mean fibre diameter (μm)	Layer thickness (mm)	Packing density (-)	Initial pressure drop (Pa)
F6	6.04 ± 2.75	0.913 ± 0.074	0.127 ± 0.010	120 ± 17
2F6		2.050 ± 0.086	0.115 ± 0.005	200 ± 20
F8	7.64 ± 3.25	0.953 ± 0.080	0.126 ± 0.011	60 ± 10

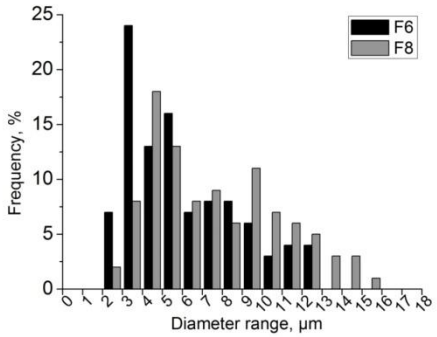


Fig. 2. Fibre diameter distribution for utilised filters.

charged with static charges. Filters F6 and F8 have similar packing density and layer thickness. Their main difference is mean fibre diameter. Filter 2F6 is made of the same fibres as F6, but its thickness is double that of F6. Fig. 2 shows that the distribution of fibre diameters cannot be described precisely by standard statistical models.

2.3 Aerosols

Eight different types of aerosol were utilised in the experiments, four pure (soot_h, soot_l, oil_h, oil_l) and four mixture aerosols (soot_h + oil_h, soot_h + oil_l, soot_l + oil_h, soot_l + oil_l). Fig. 3(a) shows the pure aerosols consisting of either solid soot particles or liquid DEHS oil

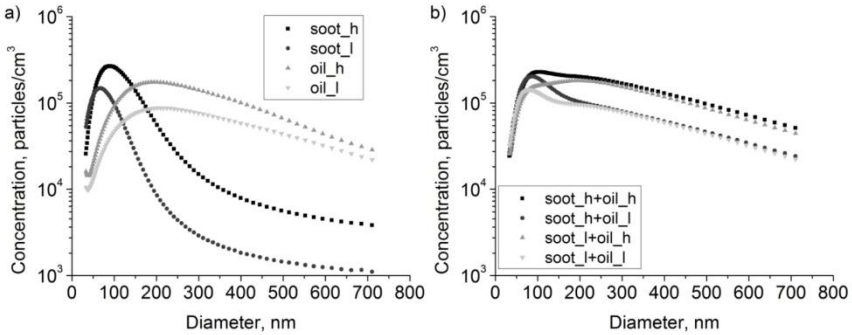


Fig. 3. Concentrations of (a) pure and (b) mixture aerosols.

Table 2. Aerosol properties.

Aerosol	Mean particle diameter (nm)		Total concentration (particles cm^{-3})	
soot_h	107.62		8.46E6	
soot_l	80.16		4.44E6	
oil_h	231.50		7.63E6	
oil_l	242.67		4.12E6	
soot_h + oil_h	90.1	201.9	2.35E6	12.56E6
	227.7		10.21E6	
soot_h + oil_l	87.1	163.3	3.49E6	8.92E6
	212.5		5.42E6	
soot_l + oil_h	76.9	211.3	1.08E6	10.38E6
	227		9.30E6	
soot_l + oil_l	79.4	172.5	3.09E6	7.41E6
	238.9		4.43E6	

particles of different concentrations (h–high concentration, l–low concentration, where high concentration is approximately two times greater than the low one). The mixture aerosols were their respective mixtures, as shown in Fig. 3(b).

Table 2 shows the mean particle diameter and total concentration for each aerosol. The total concentration of mixture aerosol is lower than the sum of concentrations for pure aerosols it consists of. It is due to interactions between solid and liquid particles in aerosol. The mean particle diameter for mixture aerosol components is based on their expected share in mixture aerosol and is calculated as weighted average of the shares of each size. These values are utilised in efficiency and average particle size downstream calculations.

2.4 Calculations

The calculations of efficiency were based on the single fibre efficiency method. In our calculations, we took into account mechanisms of diffusion, interception and impaction. Due to the nature of our analysis, the primary selection criterion was a wide range of parameter variability so as not to affect the applicability and reliability of the equations. Two sets of equations were utilised. The first one consists of theoretical equations (Eqs. (1), (2) and (3)).

Diffusion (Lee and Liu, 1981):

$$\eta_{dif_t} = 2.6\left(\frac{1-\alpha}{Ku}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot Pe^{-\frac{2}{3}} \quad (1)$$

Interception (Givehchi and Tan, 2014):

$$\eta_{int_t} = \frac{1+R}{2\cdot Ku}\left(2\cdot\ln(1+R) - 1 + \alpha + \left(\frac{1}{1+R}\right)^2\left(1-\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{\alpha}{2}(1+R)^2\right) \quad (2)$$

Impaction (Stechkina *et al.*, 1969):

$$\eta_{imp_t} = \left(\frac{Stk}{4\cdot Ku^2}\right)\left(\left(29.6 - 28\cdot\alpha^{0.62}\right)\cdot R^2 - 27.5\cdot R^{2.8}\right) \quad (3)$$

The second one of empirical equations (Eqs. (4), (5) and (6)).
Diffusion (Wang *et al.*, 2007):

$$\eta_{dif_e} = 0.84\cdot Pe^{-0.43} \quad (4)$$

Interception (Lee and Liu, 1982):

$$\eta_{int_e} = 0.6\left(\frac{1-\alpha}{Ku}\right)\left(\frac{R^2}{1+R}\right) \quad (5)$$

Impaction (Gougeon, 1994):

$$\eta_{imp_e} = 0.0334\cdot Stk^{1.5} \quad (6)$$

The efficiency of each mechanism was then utilised to calculate the resultant efficiency of all the mechanisms (Eq. (7)) and total efficiency of the filter (Eq. (8)). The equations utilised for calculating the parameter values are listed in the appendix section.
Resultant efficiency of all the mechanism (Thomas, 2017):

$$\eta = 1 - (1-\eta_{dif})(1-\eta_{int})(1-\eta_{imp}) \quad (7)$$

Total filter efficiency (Thomas, 2017):

$$E = 1 - \exp\left(-\frac{4\cdot\eta\cdot\alpha\cdot Z}{(1-\alpha)\cdot\pi\cdot d_f}\right) \quad (8)$$

η_{dif}–diffusion mechanism efficiency, η_{int}–interception mechanism efficiency, η_{imp}–inertia mechanism efficiency, η–calculated single fibre efficiency, E–filter efficiency, α–packing density, Z–filter thickness, d_f–fibre diameter.

For efficiency calculations, there is usually the classical filtration theory (CFT) applied (Brown, 1993; Dorman, 1966). According to this method, the efficiency of the filter is computed by assuming that all the filtration fibres have the same diameter which is set to equivalent fibre diameter. The equivalent fibre diameter may be interpreted as arithmetic or geometric mean (VanOsdell *et al.*, 1990), volume-surface diameter (Podgórski, 2009) or effective Davies diameter (Japuntich *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2012; Löffler, 2004). The distribution of fibre diameters can deviate significantly from a standard statistical distributions, this can be seen in Fig. 2. In opposite to this standard method, for cases involving wide fibre size distribution, we propose the concept of effective fibre diameters distribution, which is as follows. Instead of using one single fibre diameter to describe all the fibres in the filter, we use some different values of fibre diameters. In this paper we decided to compare the use of 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 values of diameters. For this purpose, the images were taken with a scanning electron microscope, and the measurements of 100 fibres diameters were performed for each filter. The obtained diameters were then set in ascending order and divided into groups containing mentioned above number of diameters. For each group, the average value representing it was calculated. These average diameters were then utilised for efficiency calculations, and the total efficiency of the filter was determined based on the share

of individual groups. For example, in the case of "20 diameters", the 100 measured fibres diameter were divided into 20 groups, each containing 5 diameters, then the average value for each of the groups was calculated, filter efficiency for each average diameter and total filter efficiency with a share of each group being 0.05. This procedure is similar to that presented by Frising *et al.* (2003)—defined there as "parallel approach". The main difference is that the group of Frising *et al.* (2003) assumed the log-normal distribution of fibre diameters while the method presented in our work can be successfully applied for any kind of distribution. The exact values of fibre diameter are listed in supplementary data.

In calculations, we implemented the effective density concept. Its aim is to improve the efficiency calculations for solid particles. Especially in the case of soot-like particles, we are dealing with the advanced spatial structure of particles built with smaller particles. This structure affects the effective density of particles and can be a source of calculation errors. The effective density of solid particles was calculated with Eq. (9) (Maricq and Xu, 2004). The primary particle diameter was D_{pp} = 5nm, the fractional dimension f = 2.3, the initial particle density ρ_0 = 2090 kg m^{-3} and the particle diameter D_p as measured by the particle counter. The obtained effective density was then utilised in efficiency calculations.

$$\rho_e = \rho_0 \left(\frac{D_p}{D_{pp}} \right)^{f-3} \tag{9}$$

Fig. 4 shows block diagram of the calculation procedure. To simulate the filter being clogged with deposited particles for each time step t = 1 s, the current total filter efficiency was calculated. For the known aerosol particle size distribution, the number of particles captured by the filter was calculated. The number of particles captured on the filter was then converted to volume based on their density and effective density in the case of solid particles. This volume was then utilised to calculate the new packing density of the filter:

$$\alpha = \frac{V_f + V_d}{V_t} \tag{10}$$

and with new packing density, flow velocity:

$$u = \frac{u_0}{1-\alpha} \tag{11}$$

and fibre diameters:

$$d_f = d_p \left(\frac{\alpha}{\alpha_p} \right)^{0.5} \tag{12}$$

In Eqs. (10), (11) and (12) the meaning of the symbols is as follow: α–packing density, α_p–clean filter packing density, V_f–fibres volume, V_d–deposits volume, V_t–total clean filter volume, u–average flow velocity in filter with deposits, u_0–average flow velocity in clean filter, d_f–calculated fibre diameter and d_p–clean fibre diameter.

The calculations were carried out for 64 minutes of constant filtration, with first 4 being omitted on graphs, to make the comparison with experimental measurements easier (due to instability in initial readings provided by particle counter). In the case of more than one diameter utilised for efficiency calculations, each diameter changes proportionally. We did not introduce new fibres built with solid particles as a concept to describe filter loading because of limitations of theoretical equations and the presence of liquid particles in the case of mixture aerosols.

The calculations of average particle size in aerosol upstream and downstream of the filter were based on aerosol particle size distribution. The average size was calculated as weighted arithmetic mean with a share of individual size fraction as weights. The change in average particle size over

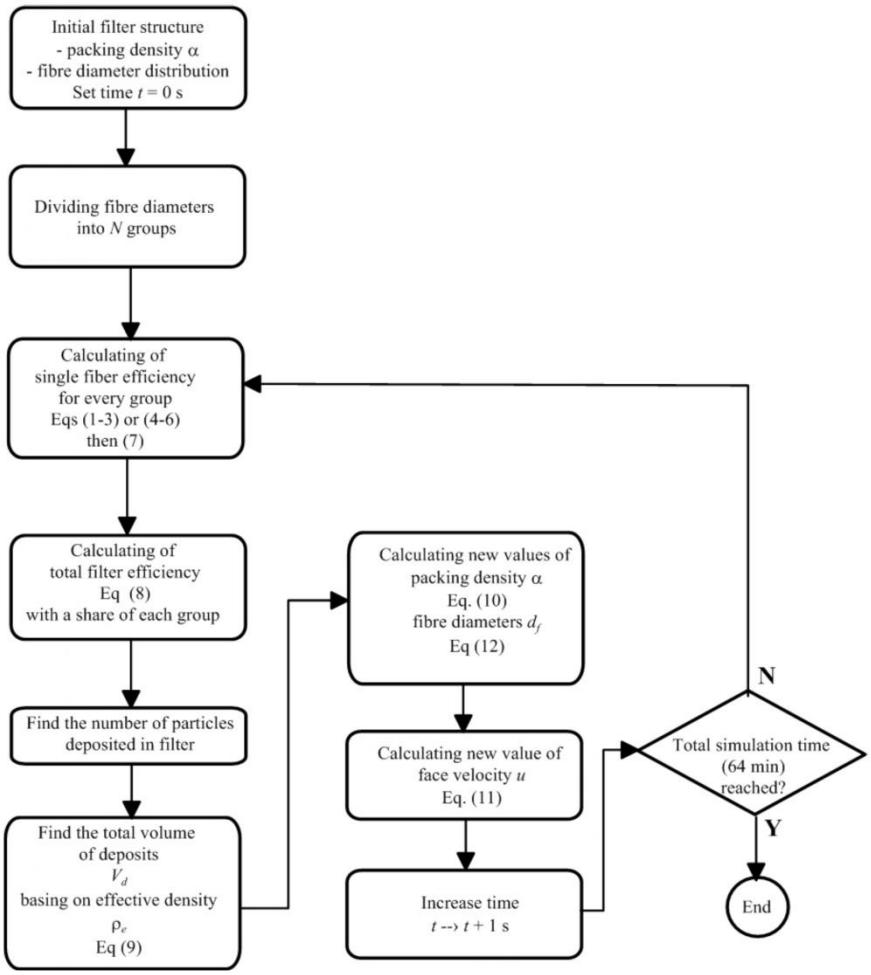


Fig. 4. The block diagram of the calculation procedure utilised to calculate filter efficiencies and their changes over time as a result of filter clogging with particles.

time, with a constant and unchanging aerosol particle size distribution upstream of the filter, was due to a change in filter efficiency due to aerosol particle interaction and deposition on the filter.

3 RESULTS

3.1 Number of Diameters and Accuracy for Initial Particle Size

Fig. 5(a) shows the results of filtration efficiency calculations for various aerosols for filter F8. It is representative of the results obtained for all the other filters. The increased number of diameters utilised in efficiency calculations results in increased efficiency for all considered cases. The change is rapid for the first four cases (1, 2, 5, 10 diameters) and stabilises for ten diameters and more. The relative difference between efficiency for a given number of diameters and reference, which is the result for 100 diameters, falls below 0.1% for the number of diameters

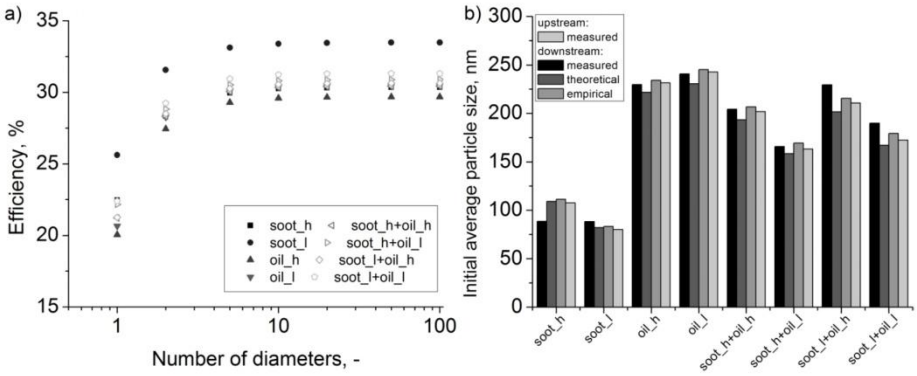


Fig. 5. Efficiency calculated with set of theoretical equations for (a) various aerosols and various number of diameters for F8 filter and (b) the initial average particle size for F8 filter for various aerosols.

above 20. For that reason, all further calculations are being carried out with 20 diameters being used to calculate filter efficiency. For exact values for each efficiency data point and difference between them, please refer to supplementary data.

Fig. 5(b) shows comparison between measured and calculated initial average particle size downstream from the filter and initial average particle size upstream from the filter (by initial size we mean size after first four minutes). Results for both theoretical and empirical models agree well with measurements. The average particle size downstream does not differ substantially from the upstream. The difference between measured upstream and downstream values for soot_h aerosol can be explained by the presence of the filter and the mentioned understanding of the initial value as that 4 min after the start of filtration. Filter clogging with soot particles leads to increased filtration efficiency for large particles due to formation of secondary fibres made out of soot particles. At the same time in case of mixture aerosols the presence of oil prevents such effect from occurring.

3.2 Aerosol Deposition over Time

Figs. 6 and 7 shows that the measured change in average particle size downstream from filters is much higher than the calculated one for the theoretical set of equations (Figs. 8(a), 9(a), 10(a)) and empirical set of equations (Figs. 8(b), 9(b), 10(b)). Note the same range on the graphs for measured values and a variable range for calculated values.

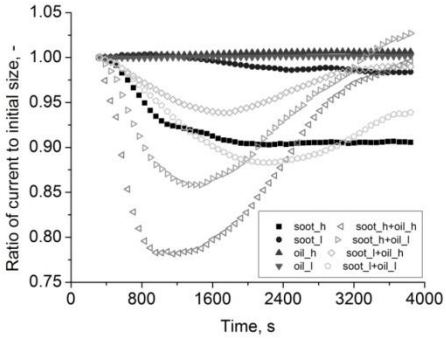


Fig. 6. Measured change in average particle size downstream from 2F6 filter as a fraction of initial size downstream.

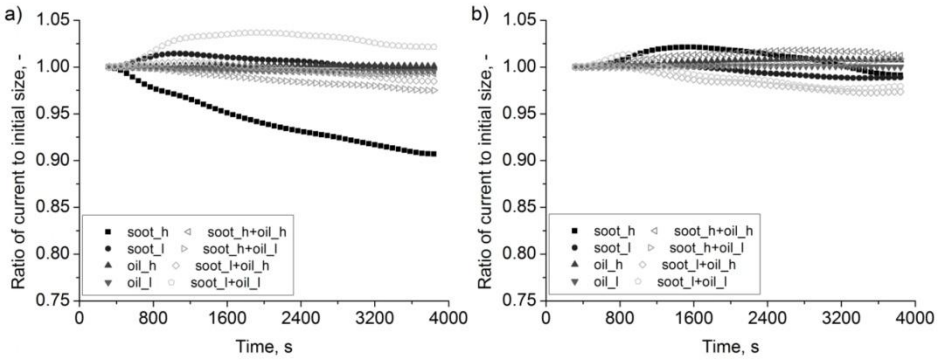


Fig. 7. Measured change in average particle size downstream from (a) F6 filter and (b) F8 filter as a fraction of initial size downstream.

In the case of measured values (Figs. 6 and 7), significant changes for soot_h aerosol are observed for F6 and 2F6 filters. Moreover, for the 2F6 filter, significant changes occurred for all mixture aerosols. For both F6 and 2F6, the decrease in average particle size downstream for soot_h aerosol reached 90% of the initial value. Based on the curve for the F6 filter, it can be concluded that a similar plateau on the curve will occur as for the 2F6 filter.

The presence of only soot particles and their deposition on fibres leads to the formation of secondary fibres made out of soot particles. The contribution of these secondary fibres to the total filter efficiency increases with time. This structure can grow above the surface of the filter and be responsible for the majority of filtration efficiency (Thomas *et al.*, 2019). It results in stabilisation of packing density, flow velocity and fibres diameter in the zone where the majority of deposition happens.

In the case of theoretical equations (Figs. 8(a), 9(a), 10(a)), for F6 and F8 filters, the decrease in average size occurs for all aerosols containing oil, for 2F6 filter only for aerosols: soot_h, soot_l, soot_h + oil_l, soot_l + oil_l (Table 2; aerosols influenced by the presence of oil in a limited way).

In the case of empirical equations (Figs. 8(b), 9(b), 10(b)) for 2F6 and F8 filters, the increase in average size occurs for all tested aerosols, for F6 filter only for aerosols influenced by the presence of oil in a limited way.

The measured values for the 2F6 filter for mixture aerosols the initial decrease followed by an increase in average particle size downstream from the filter can be observed. The average particle

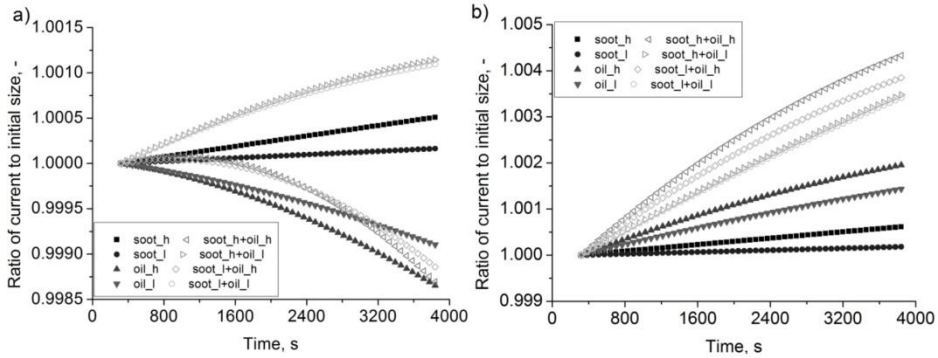


Fig. 8. (a) Calculated theoretical and (b) empirical change in average particle size downstream from 2F6 filter as a fraction of initial size downstream.

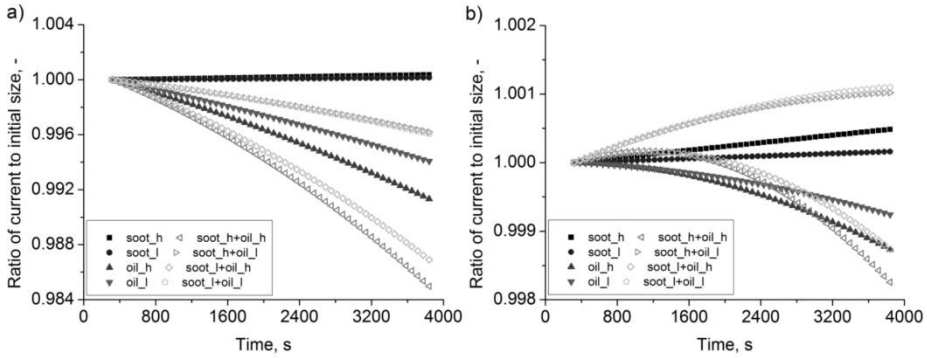


Fig. 9. (a) Calculated theoretical and (b) empirical change in average particle size downstream from F6 filter as a fraction of initial size downstream.

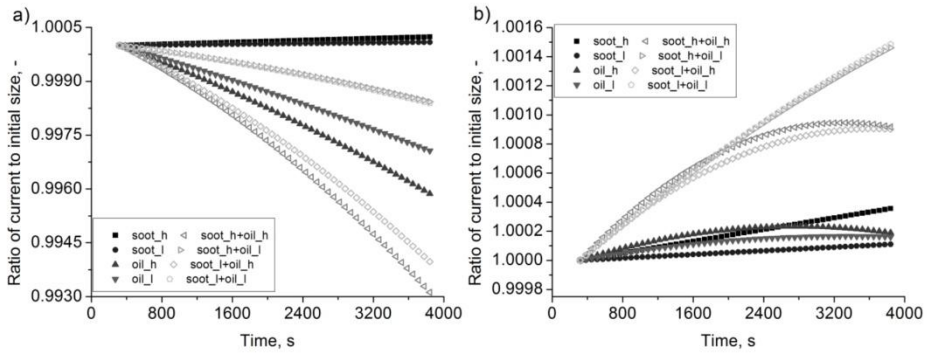


Fig. 10. (a) Calculated theoretical and (b) empirical change in average particle size downstream from F8 filter as a fraction of initial size downstream.

size decrease over time, downstream from the filter, can be explained by increased filtration efficiency for large oil particles and lowered efficiency for small soot particles. Such a change is the result of particle deposition in the surface filter layer, leading to an increase in packing density and flow velocity. The following increase in average particle size can be explained by the surface layer being filled with liquid deposits, a state of dynamic equilibrium is reached, the oil is transported deep inside the filter structure. At that point, the flow velocity does not change significantly, while the increase in packing density and fibre diameter still occurs, leading to increased filtration efficiency for small particles.

4 CONCLUSIONS

The calculations of the effect of the number of fibre diameters on total filter efficiency showed that in all examined cases, there is a significant effect for all utilised filters and aerosols. The increase in the number of diameters leads to increased calculated efficiency, and the use of twenty diameters is sufficient to reach satisfactory accuracy.

These conclusions are in line with the discussion that has existed for some time in the scientific literature, whether and to what extent it is possible to calculate the filtration efficiency based on the average value of the diameter of the fibres. In most cases and computation, it is a typical default assumption. Already Kirsch and Stechkina (1973) analysed the efficiency of filtration of

small particles numerically at the filter with fibres with nonequal diameters. To simplify the calculations, they considered the diffusion mechanism of a deposition only (as it is dominant for particles smaller than a few hundred nanometers in diameter). They concluded that the particle deposition efficiency and pressure drop could be calculated from the mean fibre diameter even when the diameters differ several times. This result then was subjected to criticism by other authors. For example Steffens and Coury (2007)—who also considered the filtration of solid nanoparticles but not limited themselves to the diffusion mechanism—noted that the heterogeneities in the filter structure (the differences in fibres diameters) have a strong effect on the filter performance. Also, Frising *et al.* (2003) noted the influence of fibre diameter distribution on filtration efficiency. By comparing with experimental results, they observed that the real penetration of the filter as well as the penetration obtained while taking into account the fibre diameter distribution is less than that computed by assuming one fibre diameter value. That means taking into consideration the distribution of fibre diameter leads to the higher value of filtration efficiency (while the relationship between efficiency and penetration is $E = 1 - P$)—what is consistent with our results. The influence of fibre diameter distribution on filtration efficiency has also been considered by Podgórski *et al.* (2011).

All the above-mentioned works did not deal with the mixture solid-liquid aerosols. They also did not consider the dynamics of efficiency in time. We have shown that it is possible to include polydispersity of the fibres into the consideration on mixture aerosol filtration. The results of such calculations are in good agreement with experimental measurements result for the initial moment of the filtration process. However, the simulation results do not agree with measurements in case of filter clogging with particles.

The single fibre efficiency model for predicting filter efficiency is not a sufficient way to describe the behaviour of filters utilised for mixture aerosol filtration, even if the mathematical description takes into account the effect of the volume of deposits on flow velocity, packing density and multiple fibre diameters. Further improvements to the model are required.

The difference between measured and calculated changes for both theoretical and empirical sets of equations can be explained by changes in the internal structure of the filter due to the deposition of particles.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper is published and based on the results of a research task carried out within the scope of the fifth stage of the National Programme "Improvement of safety and working conditions" supported within the scope of state services by the Ministry of Family and Social Policy.
task no. 2.SP.12
entitled "Development of a test method and a test stand for determining the emission of nano-objects from utility materials coated with functional layers.".
The Central Institute for Labour Protection – National Research Institute is the Programme's main co-ordinator.

APPENDIX A

Parameter utilised in efficiency calculations were obtained with following equations (Thomas, 2017):

$$R = \frac{d_p}{d_f} \tag{A1}$$

$$Ku = \frac{4 \cdot \alpha - \alpha^2 - 3}{4} - \frac{\ln(\alpha)}{2} \tag{A2}$$

$$Pe = \frac{u \cdot d_f}{D} \tag{A3}$$

$$D = \frac{K_B \cdot T \cdot C}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p} \tag{A4}$$

$$Kn = \frac{2 \cdot \lambda}{d_f} \tag{A5}$$

$$Stk = \frac{\rho_e \cdot u \cdot d_p^2 \cdot C}{18 \cdot \mu \cdot d_f} \tag{A6}$$

Cunningham correction factor (Allen and Raabe, 1985):

$$C = 1 + Kn\left(1.142 + 0.558 \cdot \exp\left(-\frac{0.999}{Kn}\right)\right) \tag{A7}$$

R–interception parameter, d_p–particle diameter, d_f–fibre diameter, Ku–hydrodynamic factor of Kuwabara flow, α–packing density, Pe–Peclet number, u–average flow velocity in filter, D–diffusion coefficient, k_B–Boltzmann constant, T–temperature, C–Cunningham slip correction factor, μ–fluid viscosity, Kn–Knudsen number, λ–mean free path, Stk–Stokes number, ρ_e–effective particle density.

SUPPLEMENTARY MATERIAL

Supplementary material for this article can be found in the online version at https://doi.org/10.4209/aaqr.220039

REFERENCES

Agranovski, I.E., Shapiro, M. (2001). Clogging of wet filters by dust particles. J. Aerosol Sci. 32, 1009–1020. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0021-8502(00)00123-3

Allen, M.D., Raabe, O.G. (1985). Slip Correction measurements of spherical solid aerosol particles in an improved millikan apparatus. Aerosol Sci. Technol. 4, 269–286. https://doi.org/10.1080/02786828508959055

Brown, R.C. (1993). Air filtration: An integrated approach to the theory and applications of fibrous filters. Pergamon Press, Oxford.

Dorman, R.G. (1966). Filtration, in: Davies, C.N. (Ed.), Aerosol Science, Academic Press, London, pp. 195–222.

Fotovati, S., Tafreshi, H.V., Pourdeyhimi, B. (2012). A macroscale model for simulating pressure drop and collection efficiency of pleated filters over time. Sep. Purif. Technol. 98, 344–355. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.07.009

Frising, T., Thomas, D., Contal, P., Bémer, D., Leclerc, D. (2003). Influence of filter fibre size distribution on filter efficiency calculations. Chem. Eng. Res. Des. 81, 1179–1184. https://doi.org/10.1205/026387603770866353

Gac, J., Jackiewicz-Zagórska, A., Werner, Ł., Jakubiak, S. (2016). Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters. Sep. Purif. Technol. 170, 234–240. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.06.057

Gac, J., Jackiewicz-Zagórska, A., Werner, Ł., Jakubiak, S. (2018). Numerical modeling of solid deposits reorganization during consecutive solid-liquid aerosol filtration: Influence on the dynamics of filtration efficiency. J. Aerosol Sci. 119, 13–21. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.02.008

Givehchi, R., Tan, Z. (2014). An Overview of airborne nanoparticle filtration and thermal rebound theory. Aerosol Air Qual. Res. 14, 46–63. https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.07.0239

Gougeon, R. (1994). Filtration des aérosols liquides par des filtres à fibres en régime d'interception et d'inertie. University of Paris XII.

Hutten, I.M. (2007). CHAPTER 8 - Air Filter Applications, in: Hutten, I.M. (Ed.), Handbook of Nonwoven Filter Media, Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 325–367. https://doi.org/10.1016/B978-185617441-1/50023-8

Jackiewicz, A., Podgórski, A., Gradoń, L., Michalski, J. (2013). Nanostructured media to improve the performance of fibrous filters. KONA Powder Part. J. 30, 244–255. https://doi.org/10.14356/kona.2013023

Japuntich, D.A., Franklin, L.M., Pui, D.Y., Kuehn, T.H., Kim, S.C., Viner, A.S. (2007). A comparison of two nano-sized particle air filtration tests in the diameter range of 10 to 400 nanometers. J. Nanoparticle Res. 9, 93–107. https://doi.org/10.1007/s11051-006-9179-1

Jung, C.H., Park, H.S., Kim, Y.P. (2013). Theoretical study for the most penetrating particle size of dust-loaded fiber filters. Sep. Purif. Technol. 116, 248–252. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.05.045

Kang, S., Lee, H., Kim, S.C., Chen, D.R., Pui, D.Y.H. (2019). Modeling of fibrous filter media for ultrafine particle filtration. Sep. Purif. Technol. 209, 461–469. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.07.068

Kirsch, A.A., Stechkina, I.B. (1973). Pressure drop and diffusional deposition of aerosol in polydisperse model filter. J. Colloid Interface Sci. 43, 10–16. https://doi.org/10.1016/0021-9797(73)90341-X

Lee, K.W., Liu, B.Y.H. (1980). On the minimum efficiency and the most penetrating particle size for fibrous filters. J. Air Pollut. Control Assoc. 30, 377–381. https://doi.org/10.1080/00022470.1980.10464592

Lee, K.W., Liu, B.Y.H. (1981). Experimental study of aerosol filtration by fibrous filters. Aerosol Sci. Technol. 1, 35–46. https://doi.org/10.1080/02786828208958577

Lee, K.W., Liu, B.Y.H. (1982). Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters. Aerosol Sci. Technol. 1, 147–161. https://doi.org/10.1080/02786828208958584

Li, L., Zuo, Z., Japuntich, D.A., Pui, D.Y.H. (2012). Evaluation of filter media for particle number, surface area and mass penetrations. Ann. Occup. Hyg. 56, 581–594. https://doi.org/10.1093/annhyg/mes034

Löffler, F. (1974). Air filtration. Von C. N. Davies. Academic Press Inc., London 1973. Aulf., X 171 Ss., zahlr. Abb., £4.00. Chemie Ing. Tech. 46, 364–364. https://doi.org/10.1002/cite.330460823

Mao, N. (2016). 10 - Nonwoven fabric filters, in: Kellie, G. (Ed.), Advances in Technical Nonwovens, Woodhead Publishing, pp. 273–310. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100575-0.00010-3

Maricq, M.M., Xu, N. (2004). The effective density and fractal dimension of soot particles from premixed flames and motor vehicle exhaust. J. Aerosol Sci. 35, 1251–1274. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.05.002

Mead-Hunter, R., King, A.J.C., Mullins, B.J. (2014). Aerosol-mist coalescing filters – A review. Sep. Purif. Technol. 133, 484–506. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.06.057

Müller, T.K., Meyer, J., Thébault, E., Kasper, G. (2014). Impact of an oil coating on particle deposition and dust holding capacity of fibrous filters. Powder Technol. 253, 247–255. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.11.036

Mullins, B.J., Agranovski, I.E., Braddock, R.D. (2003). Particle bounce during filtration of particles on wet and dry filters. Aerosol Sci. Technol. 37, 587–600. https://doi.org/10.1080/02786820300923

Podgórski, A. (2009). Estimation of the upper limit of aerosol nanoparticles penetration through inhomogeneous fibrous filters. J. Nanoparticle Res. 11, 197–207. https://doi.org/10.1007/s11051-008-9472-2

Podgórski, A., Maißer, A., Szymanski, W.W., Jackiewicz, A., Gradon, L. (2011). Penetration of monodisperse, singly charged nanoparticles through polydisperse fibrous filters. Aerosol Sci. Technol. 45, 215–233. https://doi.org/10.1080/02786826.2010.531300

Sambaer, W., Zatloukal, M., Kimmer, D. (2011). 3D air filtration modeling for nanofiber based filters in the ultrafine particle size range. AIP Conf. Proc. 1375, 320–333. https://doi.org/10.1063/1.3604492

Stechkina, I.B., Kirsch, A.A., Fuchs, N.A. (1969). Studies on fibrous aerosol filters—IV calculation of aerosol deposition in model filters in the range of maximum penetration. Ann. Occup. Hyg. 12, 1–8. https://doi.org/10.1093/annhyg/12.1.1

Steffens, J., Coury, J.R. (2007). Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: II. Heterogeneous fibers. Sep. Purif. Technol. 58, 106–112. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.07.012

Thomas, D., Contal, P., Renaudin, V., Penicot, P., Leclerc, D., Vendel, J. (1999). Modelling pressure drop in HEPA filters during dynamic filtration. J. Aerosol Sci. 30, 235–246. https://doi.org/10.1016/S0021-8502(98)00036-6

Thomas, D. (2017). 4 - Initial Pressure Efficiency of a Fibrous Media, in: Thomas, D., Charvet, A., Bardin-Monnier, N., Appert-Collin, J.C. (Eds.), Aerosol Filtration, Elsevier, pp. 79–122. https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-215-1.50004-4

Thomas, D., Pacault, S., Charvet, A., Bardin-Monnier, N., Appert-Collin, J.C. (2019). Composite fibrous filters for nano-aerosol filtration: Pressure drop and efficiency model. Sep. Purif. Technol. 215, 557–564. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.01.043

Tronville, P., Rivers, R.D., Zhou, B. (2008). Particle capture by air filter media having truncated log-normal fiber diameter distributions and random spacing of fibers. In Proceedings of 10th World Filtration Congress, pp. 132–136.

VanOsdell, D.W., Liu, B.Y.H., Rubow, K.L., Pui, D.Y.H. (1990). Experimental study of submicrometer and ultrafine particle penetration and pressure drop for high efficiency filters. Aerosol Sci. Technol. 12, 911–925. https://doi.org/10.1080/02786829008959403

Wang, J., Chen, D.R., Pui, D.Y.H. (2007). Modeling of filtration efficiency of nanoparticles in standard filter media. J. Nanoparticle Res. 9, 109–115. https://doi.org/10.1007/s11051-006-9155-9

Zhou, B., Xu, Y., Fan, J.Q., Chen, L.P., Li, F., Xue, K. (2017). Numerical simulation and experimental validation for the filtration performance of fibrous air filter media with LB method. Aerosol Air Qual. Res. 17, 2645–2658. https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.12.0554

polymers

MDPI

Article

Pressure Drop Dynamics during Filtration of Mixture Aerosol Containing Water, Oil, and Soot Particles on Nonwoven Filters

Mateusz Kamiński [1,*], Jakub M. Gac [1], Piotr Sobiech [2], Paweł Kozikowski [2] and Tomasz Jankowski [2]

[1] Faculty of Chemical and Process Engineering, Warsaw University of Technology, ul. Waryńskiego 1, 00-645 Warsaw, Poland
[2] Central Institute for Labour Protection-National Research Institute, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warsaw, Poland
* Correspondence: mateusz.kaminski.dokt@pw.edu.pl

Abstract: The pressure drop dynamics during the filtration of three-component mixture aerosols are investigated and compared with two and single-component aerosols. The main area of interest is the effect of the addition of a small quantity of liquid (oil) and solid (soot) particles during the filtration of aerosol containing water mist. In addition, calculations of the change in filter mass during oil aerosol filtration have been carried out and compared with the experimental results. The new, improved filtration efficiency model takes into account a better coefficient fitting in the filtration mechanism equations. The limitations in the change in fibre diameter and packing density resulting from the filter loading have been implemented in the model. Additionally, the calculation model employs the fibre size distribution representation via multiple average fibre diameters. The changes in fibre diameter are dependent on each fibre's calculated filtration efficiency. The improved filtration model has been utilised to predict the mass change of the filters during the filtration of pure and mixture aerosols. The pressure drop calculation model based on changes in filter mass has been formulated. The model is then utilised to calculate pressure drop changes resulting from the filtration of the oil aerosol and water and oil mixture aerosol.

Keywords: fibrous filter; filtration efficiency; mixture aerosol; pressure drop; wettability difference

check for updates

Citation: Kamiński, M.; Gac, J.M.; Sobiech, P.; Kozikowski, P.; Jankowski, T. Pressure Drop Dynamics during Filtration of Mixture Aerosol Containing Water, Oil, and Soot Particles on Nonwoven Filters. *Polymers* **2023**, *15*, 1787. https://doi.org/10.3390/polym15071787

Academic Editor: Alexey V. Volkov

Received: 6 February 2023
Revised: 24 March 2023
Accepted: 30 March 2023
Published: 4 April 2023

Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Fibrous filters are widely utilised in many industrial applications [1–3], environmental protection [4,5], and healthcare [6–8]. They are used to remove both solid and liquid particles from gas streams. A logical development of the described topic is the issue of the three-component aerosol filtration, i.e., consisting of solid particles and drops of two types of liquid that do not mix with each other, e.g., oil and water. This problem may be of great practical importance, especially in the case of engine exhaust filtration, where apart from solid soot aggregates, the water droplets resulting from the condensation from combustion and drops of unburned liquid fuel may appear [9]. Additionally, in the oil industry, a coexistence of oily liquids (crude oil), water, and solid particles from the parent rock may appear [10]. This work is the first attempt to describe the filtration process defined in this way.

The reason for the high demand for fibrous filters is their very high efficiency, which often exceeds 90%, and the relatively low cost of production. The extensive knowledge of the phenomena occurring inside these filters is also important, which allows the design of an appropriate nonwoven structure defined primarily by the porosity of the filter, the size distribution of fibres, and the material from which the fibres are made. Importantly, it does not have to be a homogeneous structure: often, the use of multi-layer or gradient filters gives better results or leads to easier modifications/alterations for specific usage [11,12]. As the production technologies allow for the production of such designed structures, it opens the way for further improvement of the separation properties of fibrous filters.

The first works on filtration on nonwoven filters, the efficiency of these filters, pressure drops, and the evolution of both of these values during filter operation dealt with the filtration of solid particles [3,13]. As part of these studies, the classical filtration theory (CFT) has been formulated, allowing to determine the filtration efficiency of particles of particular sizes depending on the average diameter of the filter fibres and the linear velocity of the gas [14,15]. More advanced studies on filtration efficiency have utilised more indirect simulations. There is a large number of studies describing the gas flow field in the filter by means of computational fluid dynamics (CFD) and the particle–fibre interactions by means of the discrete element method (DEM) [16–18]. Other methods for filtration efficiency simulations were based on the lattice Boltzmann method [19,20].

A description of the formation of filtration aggregates and their influence on changes in filtration efficiency and flow resistance through the filter was also formulated, both in terms of experimental studies and numerical simulations [21,22]. The formed aggregates increase the surface area of the fibres. Such an effect leads to an increase in filtration efficiency. At the same time, by reducing the porosity of the filter, they caused an almost monotonic increase in the flow resistance through the filter [23,24]. In subsequent studies, much attention was also paid to the phenomenon of re-entrainment, i.e., the secondary entrainment of deposited aerosol particles (individual particles or fragments of filter deposits) into the flowing gas stream [25,26]. This phenomenon resulted in an effective decrease in the filtration efficiency (secondary entrained particles appeared in the outlet stream) or a modification of the mass distribution of the retained dust inside the filter.

The next stage of filtration research on nonwoven filters was related to droplet filtration. It was quickly noticed that in the case of droplets with sizes below 10 µm, the initial filtration efficiency is described by the same relationships as the filtration efficiency for solid particles obtained from the classical theory of filtration [27]. However, the dynamics of filtration efficiency, as well as the dynamics of pressure drop, are completely different for both solid and liquid particles. This is due to a completely different nature of the liquid retained in the filter structure. While in the case of the filtration of solid particles, fractal-like, highly developed, but equally highly porous filtration aggregates were formed; the droplets formed relatively homogeneous layers surrounding the filter fibres. As more and more liquid accumulates, these layers join together to form liquid bridges, which constitute a very high resistance to the flowing gas [28]. This resulted in a characteristic shape of the dynamics of the pressure drop—after the initial, relatively smooth increase, there was a rapid, several-fold jump in the pressure drop [28,29]. Then, a state was developed close to dynamic equilibrium—the amount of liquid retained by the filter was balanced by the amount of liquid entrained from the filter, and the pressure drop did not experience any major changes.

Another development on the subject of filtration on nonwoven filters was the issue of the filtration of mixture aerosols, i.e., aerosols containing both solid particles and liquid drops. In one of the first studies [30], the dynamics of pressure drop during the filtration of such aerosols has been investigated. One of the main conclusions was the sharp jump in the flow resistance that is highly characteristic of mist filtration. Ref. [31] investigated the effect of oil deposited on filter fibres on the efficiency of the removal of solid particles from a gas stream. In contrast, in the work by [32], the influence of soot particles on the filtration efficiency of liquid aerosols was investigated. There are also studies on the alternating (consecutive) filtration of solid and liquid particles [33,34]. These works theoretically and experimentally observed as well as numerically described the collapse of the filtration deposits under the influence of the deposited liquid, which resulted in a decrease in filtration efficiency and flow resistance during such a process compared to the filtration of only solid particles. A simultaneous filtration of solid and liquid particles was investigated in our last work. By examining the simultaneous filtration of soot particles and water droplets [35], as well as soot particles and oil droplets [36], we observed similar effects as in the case of alternate filtration: the collapse of the filter deposits leading to a

decrease in efficiency and the evolution of the pressure drop similar to the filtration of liquid aerosols.

However, it should be emphasised that in the vast majority of the mentioned theoretical and numerical works, the authors focus mainly on determining the filtration efficiency and its evolution, ignoring the size of the pressure drop and its changes. The methods of determining the initial pressure drop, i.e., for unloaded filters, were presented in Davies' fundamental work [37] and the approximate formulas presented there, together with the concept of equivalent "Davies diameter", are utilised even today. Wang et al. [38] used stochastic modelling to determine the pressure drop values for filters of different porosity and thickness, obtaining similar results as from the approximate Davies equations. In [39], the pressure drop of nonwoven filters has been obtained by the means of the Hagen–Poiseuille equation for gas flow through porous materials. Changes in pressure drop due to filter deposits build-up has been addressed by Thomas et al. [23] using an approximate method that treats filter deposits as additional fibres that are present in the filter structure. When analysing the evolution of pressure drop during liquid aerosol filtration, one should note the works by Frising et al. [40] and Payet et al. [41] along with utilising a semi-empirical model work by Gac. When considering the filtration of mixed solid–liquid aerosols, to our knowledge, there are currently no papers numerically or analytically describing the changes in pressure drop during such a process.

Our current work is the next step in the topic of mixture aerosol filtration. We move from binary systems to ternary systems containing solid particles and liquid particles of two different liquids. The results of experimental research will be supported by an analytical description, which is a certain extension of Davies' description for the case of filtration of binary and ternary aerosol systems.

2. Materials and Methods

2.1. Experimental Setup

The setup of three independently operating generators was utilised (Figure 1). The GFG 1000 (Palas GmbH, Karlsruhe, Germany) spark discharge aerosol generator was utilised to generate solid particles aerosol. The graphite electrode with a density of 2090 kg/m^3 was utilised with the generator. The obtained nanostructured graphite particles will be referred to as soot due to their similarities in morphology. The PLG-2010 (Palas, Germany) Laskin nozzle aerosol generator was utilised to generate oil aerosol. The DEHS (di-ethylhexyl-sebacate) oil of a density of 914 kg/m^3 was utilised for that purpose. The membrane humidifier, placed in a metal tank with an air inlet and connector to a horizontal tank, was utilised to generate water mist. Additionally, the dry air (5% humidity) of adequate flow was utilised to ensure steady aerosol flow. Compressed air used for test aerosol generation was filtered using Filtered Air Supply 3074B (TSI Inc., Shoreview, MN, USA). The average flow velocity of the aerosol upstream from the filter was 0.2 m/s and was the same for all the experiments and independent of the aerosol composition. The temperature of the aerosol stream was around 295 K. The filter samples utilised in experiments were disc-shaped, with their primary diameter being 100 mm and the part exposed to the aerosol flow being 80 mm. The contact area between the aerosol stream and the sample was 50.3 cm^2. Graphite nanoparticles and DEHS particles concentration, distribution, and filter efficiency were determined using a scanning mobility particle sizer spectrometer (SMPS) comprising ultrafine condensation particle counter (UCPC 3776) and electrostatic classifier 3082 (TSI Inc., USA). Spraytec laser diffraction system (Malvern Instruments Ltd., Malvern, UK) was used to obtain the number size distribution of water droplets. Pressure drop across filters was measured using a P26 differential pressure transducer (Halstrup Walcher GmbH, Kirchzarten, Germany).

2.2. Filters

The material utilised for layer production was polypropylene, and layers were obtained by melt-blown fabrication method (Figure 2). This method involves extruding

molten polymer through the head holes surrounded by hot air, the flow of which helps to achieve the desired fibre size. Contact with cold air leads to the cooling of the polymer streams and the formation of fibres, which are then collected by a collector to form a layer of a given thickness (Figure 2). The average fibre diameter was calculated based on SEM (scanning electron microscope-HITACHI SU8010) images of filter samples. There were 120 fibres analysed for each filter, and around 20 images in different parts of multiple samples were taken. The thickness of each fibre was measured in three different parts of the fibre, and the obtained average value of the number of pixels for each fibre was then converted to the actual size based on the scale. The layer thickness was measured with a Tilmet-79 thickness gauge (high contact area) with an accuracy of 0.01 mm, and 20 measurements for each filter. The packing density was calculated based on sample weight and dimensions.

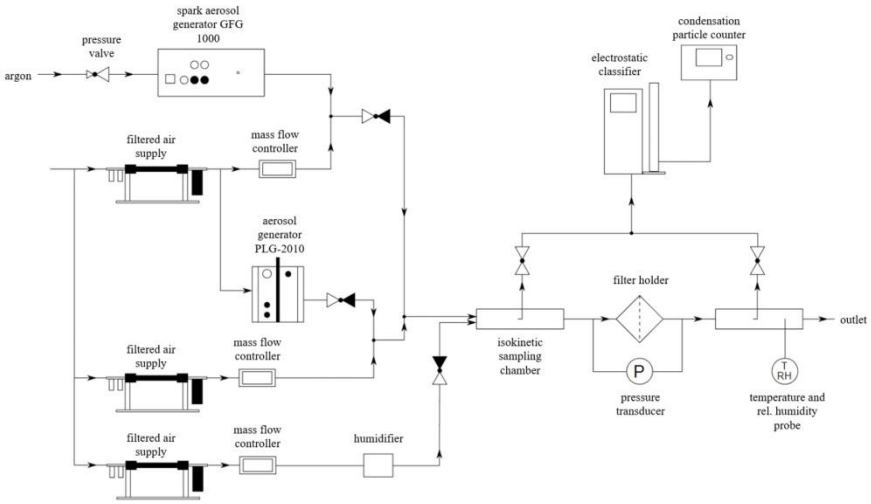


Figure 1. Experimental setup.

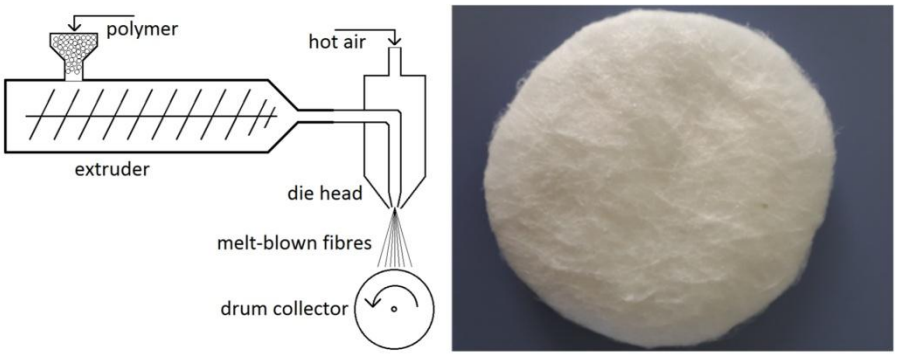


Figure 2. Melt-blown method overview (**left**) and obtained filter sample (**right**).

2.3. Aerosols

Table 1 lists the properties of pure aerosols. Additionally, mixtures of these aerosols were utilised in experiments. In the case of mixture aerosols, water would be responsible

for the vast majority of the mass captured by the filter due to larger particle sizes and mass flow. As shown in Figure 3, the entirety of the oil aerosol particle size distribution could not be measured due to equipment limitations. Oil and water aerosols were chosen for their differences in wettability towards filter material. In the case of a mixture of soot + oil aerosol, the total concentration is lower than the sum of components due to particle interactions before the aerosol reaches the filter. The average particle size is a weighted arithmetic mean (by share).

Table 1. Properties of aerosols utilised in experiments.

Aerosol	Average Particle Size, nm	Total Concentration, Particles/cm^3	Mass Flow, g/s
soot	107.6 ± 67.8	8.46×10^6	1.4×10^{-6}
oil	248.2 ± 176.4	7.82×10^6	3.3×10^{-4}
soot + oil	201.9 ± 146.6	12.56×10^6	3.3×10^{-4}
water	3427.1 ± 1247.6	1.39×10^6	2.9×10^{-2}

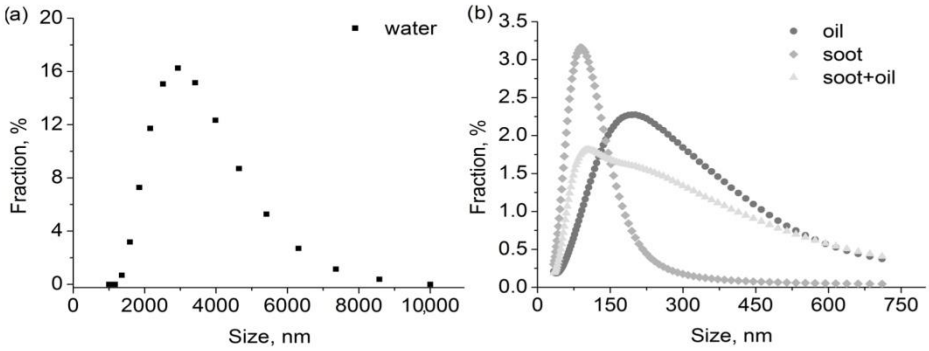


Figure 3. Particle size distribution for (**a**) water and (**b**) oil and soot aerosols.

2.4. Efficiency and Mass Changes Calculations

The filtration mechanism of diffusion, interception, and impaction were included in the calculation model. The electrostatic mechanism was omitted due to the filtration material not being charged with static charges (samples were neither intentionally charged nor discharged; however, the existence of some charges related to the manufacturing process may still be possible). The filtration efficiency calculations and its changes over time were based on the following empirical equations which were discussed in detail in our previous papers [36,42]:

$$\eta_{dif} = A \cdot Pe^{-B} \tag{1}$$

$$\eta_{int} = C\left(\frac{1-\alpha}{Ku}\right)\left(\frac{R^2}{1+R}\right) \tag{2}$$

$$\eta_{imp} = D \cdot Stk^{E} \tag{3}$$

where η_{dif}—diffusion mechanism efficiency (-), Pe—Peclet number (-), η_{int}—interception mechanism efficiency (-), α—packing density (-), Ku—hydrodynamic factor of Kuwabara flow (-), R—interception parameter (-), η_{imp}—impaction mechanism efficiency (-), and Stk—Stokes number (-).

The total filter efficiency was calculated based on the fractional efficiency towards aerosol particles and particle size distributions of the tested aerosols. For that purpose, the following equations for filter efficiency and single fibre efficiency were utilised:

$$\eta = 1 - \left(1 - \eta_{dif}\right)\left(1 - \eta_{int}\right)\left(1 - \eta_{imp}\right) \quad (4)$$

$$E = 1 - \exp\left(-\frac{4 \cdot \eta \cdot \alpha \cdot Z}{(1 - \alpha) \cdot \pi \cdot d_f}\right) \quad (5)$$

where η—calculated single fibre efficiency (-), E—filter efficiency (-), α—packing density (-), Z—filter thickness (m), and d_f—fibre diameter (m).

The values of the coefficients A, B, C, D, and E have been adjusted accordingly for each filter to increase the accuracy of the model. The same coefficients are applied to each pair of filters. The values were determined based on measured initial efficiency during the filtration of oil aerosol.

The changes in efficiency over time were dependent on the volume of deposits captured by the fibres. For that purpose, for each filter, the fibre size distribution was prepared via scanning electron microscope images. The measured distribution was reduced to ten average values, each representing one-tenth of all fibre diameters. This allowed the simplification of the model without significantly affecting the accuracy [42]. The calculations of efficiency change over time were performed for each of the fibre diameters independently, and their contribution to the total filter efficiency was weighed based on their share. The details of this method were described in our previous work [42].

The number of the captured particles was converted into their volume and subsequently into a change in packing density, average flow velocity inside the filter, and fibre diameter. Some restrictions were implemented to account for the accumulation of captured particles in the dead zones of the filter, the re-entrainment of the droplets, as well as the presence of a dynamic equilibrium between liquid particles being captured by the fibre and the movement of the liquid on the surface of the fibre:

- The maximum allowed change in fibre diameter (25% increase);
- The portion (15%) of the volume effectively influencing change in packing density in each time step.

The calculations were performed with the time step of 1 s, and the total time of predicted changes using the model was 3840 s.

2.5. Pressure Drop Changes Calculations

Similar to changes in efficiency, pressure drop changes were calculated based on changes in average flow velocity, packing density, and fibre diameters. The following equation was utilised in pressure drop calculations:

$$P = F \cdot \mu \cdot u \cdot Z \cdot \frac{\alpha^G}{d^H} \quad (6)$$

where P—pressure drop (Pa), μ—fluid viscosity (Pa·s), u—average flow velocity in a filter (m/s), Z—filter thickness (m), α—packing density (-), and d—fibre diameter (m).

For each tested filter, values of the coefficients F, G, and H were determined based on the filter properties before and after the filtration of oil aerosol. The same restrictions on changes as for efficiency and mass calculations have been applied for pressure drop changes calculations. The obtained equations were then utilised to calculate the changes during the filtration of the mixture aerosol.

In reality, the fluid viscosity depends on the composition and concentration of aerosol particles for sufficiently high concentrations. The average linear flow velocity of the fluid depends on the packing density and the average fibre diameter, which will vary dynamically during filtration. This change will occur non-uniformly throughout the thickness of

the filter and is strongly related to the aerosol properties. As for now, Equation (6) treats the entire filter layer as homogeneous at each time step. It does not take into account the mass distribution in the interior of the filter and changes in this distribution with time.

3. Results

3.1. Filter Properties

The nonwoven filters were analysed by SEM and the results are presented in Figure 4. The SEM analysis revealed that the filters possess a homogenous and uniform microstructure, with randomly arranged fibres. Additionally, the filters exhibited fibres of varying sizes. The determination of fibre size distribution was carried out using the measurement method depicted in Figure 5.

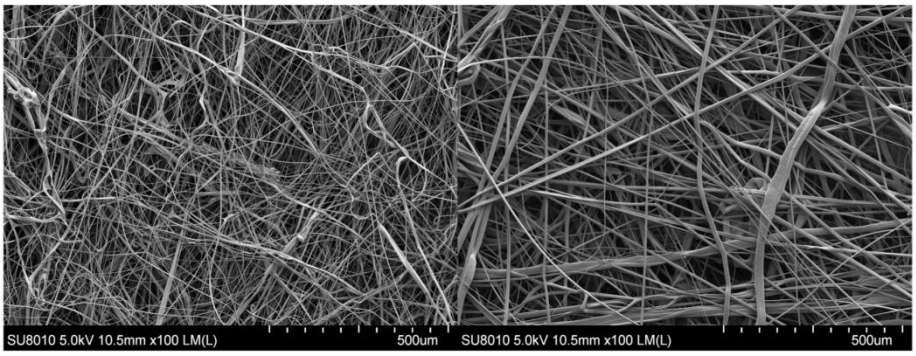


Figure 4. Structure of the (**left**) F1 filter and (**right**) F6 filter.

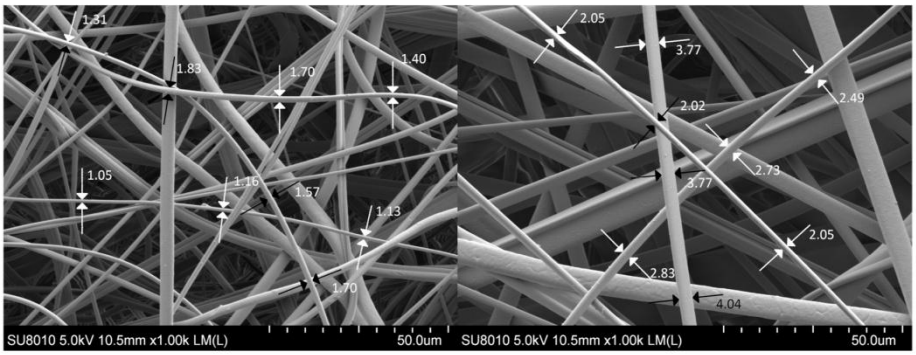


Figure 5. Example of the utilised measurement method for the (**left**) F1 filter and (**right**) F6 filter.

Table 2 shows the properties of filtration layers utilised in experiments. The designations of the F6 and F1 filters correspond to the average diameter of the fibres which the particular layer comprises. The layers marked as 2F6 and 2F1 consist of the same fibres as layers F6 and F1, but their thickness and mass are higher. The layer thickness of the F6 filter is clearly lower in comparison with any other tested filter. The 2F1 and F1 layers are characterised by a lower value of average fibre diameter and a higher value of pressure drop in comparison with 2F6 and F6 layers. The 2F6 and F1 filters have similar thickness. The average fibre diameter and its deviation are weighted arithmetic means (by share). Figure 6 shows the obtained fibre size distributions. The fibre size distribution for the F1 filter is more narrow than the one for the F6 filter.

Table 2. Filter properties.

Layer	Average Fibre Diameter, µm	Layer Thickness,mm	Average Sample Mass, g	Average Layer Mass, g/m^2	Packing Density, -	Initial Pressure Drop, Pa
2F6	6.57 ± 3.92	2.050 ± 0.089	1.722 ± 0.061	219.3 ± 7.8	0.115 ± 0.005	160 ± 17
F6		0.878 ± 0.089	0.842 ± 0.022	107.2 ± 2.8	0.127 ± 0.012	70 ± 11
2F1	1.31 ± 0.54	3.733 ± 0.137	0.787 ± 0.042	100.2 ± 5.3	0.031 ± 0.001	550 ± 35
F1		2.128 ± 0.073	0.552 ± 0.035	70.3 ± 4.5	0.035 ± 0.001	400 ± 29

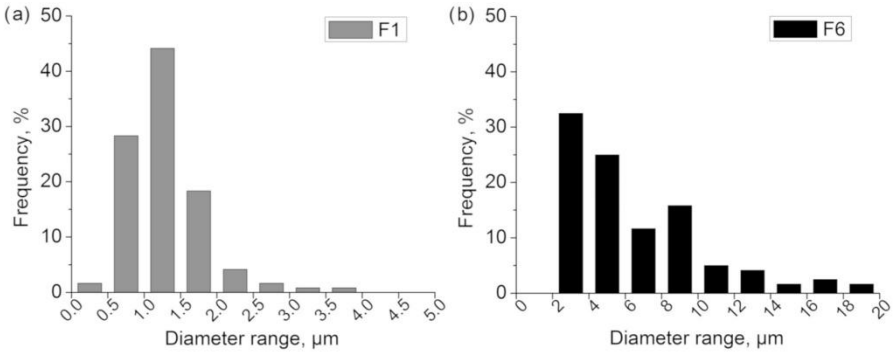


Figure 6. Measured fibre size distribution for (**a**) F1 filter and (**b**) F6 filter.

3.2. Calculated Oil Droplets Distribution

As previously mentioned, droplets larger than ~750 nm could not be measured due to equipment limitations. However, they cannot be ignored in the calculation of the filter loading. In order to include their presence in the stream in the calculations, modelling was carried out to complete the distribution. The exponential function based on the sizes between 400 and 710 nm was utilised for that purpose. The authors decided not to utilise the distribution fitting method due to the asymmetry of the distribution and its overall shape resulting partially from particle interactions (Smoluchowski's coagulation equation would be a more fitting and precise solution, yet is far more complicated to implement). Only the right side of the distribution was modelled. The smallest droplets were omitted due to their insignificant contribution to the change in filter characteristics. Figure 3 shows the results of the calculations.

Despite the small numeric fraction (Figure 7a), the additional droplets have a significant impact on the volume and mass of deposits retained on the filter due to their large size. The calculation results indicate that the droplets in the modelled range account for more than 40% (Figure 7b) of the total volume present in the aerosol stream during the oil aerosol filtration.

3.3. Calculated Efficiency and Mass Changes

Figure 8 shows the reasonably accurate results of the coefficients fitting for the 2F6 filter. The main consideration was to make the suitable fitting for the larger droplets, and thus the most relevant to the changes taking place inside the filter. Sizes below MPPS (most penetrating particle size) are less relevant due to their limited contribution to the changes occurring inside the filter.

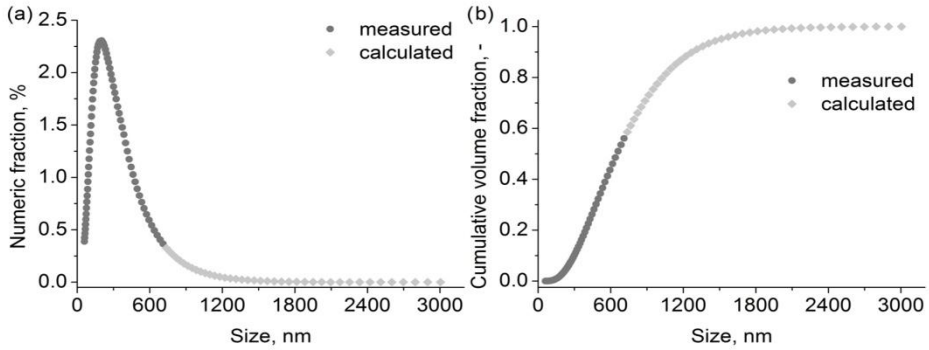


Figure 7. Calculated (**a**) numeric fraction and (**b**) cumulative volume fraction for oil aerosol.

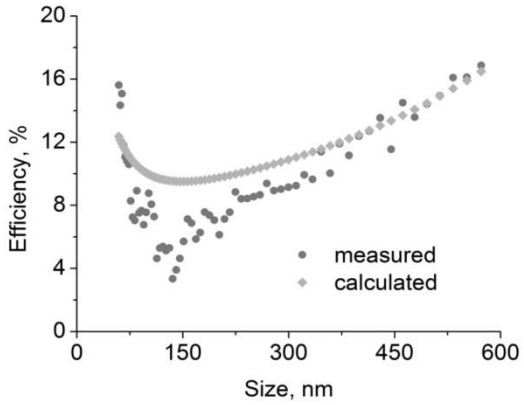


Figure 8. Measured and calculated fractional efficiencies for oil aerosol for 2F6 filter.

In the case of other filters, the differences between calculations and measurements are slightly greater than for the 2F6 filter (even though it is still of a similar order of magnitude, and there is a clear minimum of around 100–200 nm). However, this is not of great importance for further calculations because, as shown below, the dynamic of filter loading is significantly influenced by particles and droplets with diameters significantly exceeding the range presented in Figure 8.

Table 3 shows the obtained values of the mechanism efficiency coefficients for the tested filters for the oil aerosol. The coefficients were utilised to calculate the change in filter mass during the 3840 s long filtration process. The results for all filters are shown in Table 4.

Table 3. The efficiency equations coefficients values.

Filter	A	B	C	D	E
2F6	0.882	1.351	0.0032	0.087	0.541
F6					
2F1	0.782	0.605	0.1479	0.125	0.294
F1					

Table 4. Sample mass changes during oil aerosol filtration.

Filter	Filter Mass Change, g		
	Measured	Previous Model *	Current Model
2F6	0.5097	0.3925	0.5015
F6	0.2722	0.3571	0.3768
2F1	1.1866	0.4539	0.7246
F1	1.1545	0.4536	0.7244

* results were adapted with permission from [36].

The predicted mass change for the 2F6 filter is consistent with the measured value, and is considerably more accurate than the previous model, which did not take into account the presence of larger droplets. Similarly, in the case of the 2F1 and F1 filters, the consideration of additional droplets in the model and the new values of the coefficients clearly improved the agreement of the measured and calculated results with respect to the previously applied model.

While the higher mass change compared to the previous model is not surprising (we take into account the wider range of droplets), the discrepancy between the measured and calculated values in the case of the F6 filter is significant. This can be explained by the lower layer thickness of this particular filter. Interactions between fibres and large droplets which are destructive for the latter are not included in the current model. This can lead to a lower chance of further interactions and a lower actual efficiency for this filter. A similar effect could occur in the case of interactions between droplet and wet fibre. The high overall efficiency of 2F1 and F1 filter results from capturing occurring in the upstream side part of the filter. This results in a non-uniform change of properties within the filter, and the differences will be more significant the higher the filter efficiency. The current model does not take this effect into account.

3.4. Measured and Calculated Pressure Drop Changes for Oil Aerosol

Table 5 shows the obtained values of the pressure drop coefficients for the tested filters for the oil aerosol. The coefficients were utilised to calculate the change in pressure drop during the 3840s long filtration process. The results for all filters are shown in Figures 9 and 10. Utilising the determined values of the coefficients, we calculated the change in pressure drop over time. The first 320s were omitted to ensure stable readings after changes in flows resulting from the start-up of the aerosol generators. At the same time, the calculations start from the zero time point.

Table 5. The pressure drop equation coefficients values.

Filter	F	G	H
2F6	2.643	0.754	1.981
F6	1.651	0.953	2.043
2F1	1.647	0.550	1.888
F1	2.670	0.504	1.853

As the pressure drop calculation model is dependent on the filter efficiency model via changes in packing density, average flow velocity, and fibre diameter resulting from the capture of the particle droplets, the pressure drop change over time ought to be as accurate as mass change over time. The most accurate results were obtained for the 2F6 filter, for which the mass change prediction was also the most accurate. For the F6 filter, the calculated pressure drop change was higher than the measured one. Additionally, after the calculation time of the 2700 s, the change in fibre diameter reached the maximum allowed value (for the most efficient fibres), and the higher rate of change in pressure drop after that time point can be observed in the calculation results. For both the 2F1 and F1 filters,

the calculated change in pressure drop was lower than the measured one. However, as the pressure drop change is related to mass change, the same effects, as described in the previous section, which are relevant to mass change, could explain this discrepancy.

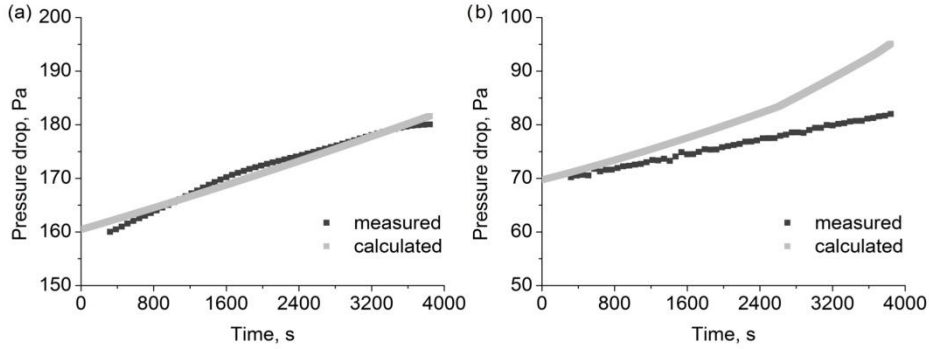


Figure 9. Pressure drop changes calculated and measured for (**a**) 2F6 and (**b**) F6 filters during oil aerosol filtration.

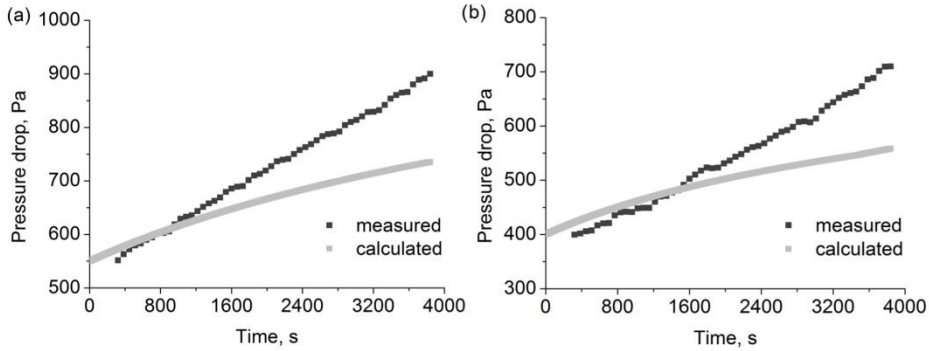


Figure 10. Pressure drop changes calculated and measured for (**a**) 2F1 and (**b**) F1 filters during oil aerosol filtration.

3.5. Measured and Calculated Pressure Drop Changes for Mixture Aerosols

Figure 11 shows the change of pressure drop for 2F6 and 2F1 filters as a result of the deposition of solid and liquid aerosol particles on the fibres and in the depth of the filter. The pressure drop for filter 2F6 is clearly lower than that for filter F1 (note the different scales on the two graphs). This is due to fewer deposits being retained on this filter due to the lower efficiency of this filter. At the same time, filter 2F6 has a higher packing density, which results in a lower total volume available for deposits. The efficiency of the filter is responsible for the rate at which this volume is being exhausted, and the packing density is responsible for the total capacity of the filter towards the deposits.

In both cases, the addition of an aerosol of oil droplets causes a significant acceleration in the filling of the layer with deposits. This results in an earlier occurrence of a rapid increase in pressure drop. According to Table 1, the mass flow of the oil-containing aerosol is two orders of magnitude lower than that of water, so the explanation for this phenomenon cannot be an increase in the mass of deposits retained on the layer in a given time unit. The reason should be considered as differences in fibre wettability by water droplets and oil droplets. The filters are made of polypropylene, which is a hydrophobic polymer. Even

a small mass addition of oil to the aerosol stream improves the wettability of the fibre and makes it easier for water droplets to penetrate the filter, as well as for the deposited liquid to move through the depth of the filter. This leads to an equal distribution of the liquid inside the filter and a lower pressure drop compared to an aerosol containing only water droplets.

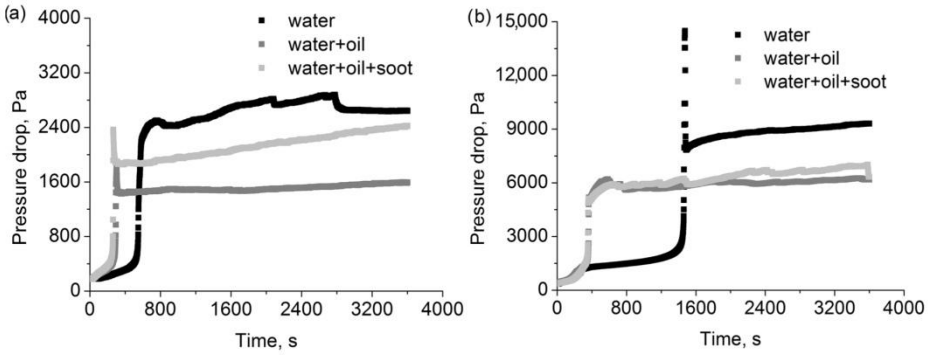


Figure 11. Pressure drop measured during filtration of various aerosols for (**a**) 2F6 and (**b**) F1 filters.

Despite the low mass of potential solid deposits, the addition of solid particles in the aerosol directed at the filter has a clear effect on the pressure drop, especially for the 2F6 filter. The pressure drop for an aerosol containing additional soot solid particles is significantly higher in the case of the 2F6 filter, and slightly higher (especially towards the end of the measurement) for the F1 filter. Additionally, the increase has a higher rate compared to a system containing only a mixture of liquid particles. The presence of solid particles in the aerosol and their deposition on the filter fibres lead to an increase in the efficiency of the effective capture of other aerosol particles. This effect is much less pronounced in the case of a filter which was characterised by high initial and overall filtration efficiency.

A high peak in pressure drop followed by a decrease and stabilisation of the pressure drop value is, in fact, present in all cases for the F1 filter (for aerosol containing only water) and for the 2F6 filter (for an aerosol containing water and oil and an aerosol containing water, oil, and graphite). Its absence from the graph for the other cases is due to insufficient time resolution of the measuring system (peak duration is a few seconds at most, depending on the case). The occurrence of this peak is a result of the top layer of the filter being filled with particles, which leads to a decrease in the surface available for the aerosol flow. In an extreme case, almost the entire cross-sectional area is filled, which would lead to an increase in the pressure drop to an infinite value. However, the rapidly increasing difference, in pressure drop, between the upstream and the downstream of the filter leads to the penetration and movement of the deposits collected on the surface layer of the filter deep inside the filter. As a result, the pressure drop stabilises at a new level, resulting from the distribution of deposits throughout the filter volume. The following increase in pressure drop for the aerosol, which contains solid particles, results from their capture on the surface part of the layer, which leads to an increase in filter capacity towards the liquid particles. In the case of mixture liquid aerosol, the presence of oil particles allows for the easier movement of the captured liquid through the filter, and the resulting pressure drop change is lower than that for the pure water aerosol.

Additionally, upon utilising the relations for the pressure drop determined for the oil aerosol, we carried out calculations for two selected filters by including in the model the presence of water droplets. The obtained results show an interesting tendency despite deviating considerably from the measured values. For both filters, in order to correct the calculated time of the occurrence of the pressure peak and match it with the corresponding

measured time, it must be taken into account that only 64% of the change in packing density is effective (Figure 12). Thus, part (36%) of the predicted deposits permanently retained in the filter actually leaves the filter, either by particle resuspension or by a different kind of liquid movement inside the filter. The same value for the two tested filters, which differ significantly in their structure and characteristics, suggests that the explanation should be attributed to the nature of the tested aerosol rather than the filters. The aerosols utilised in the experiment contains particles of different phobic properties. The difference in the pressure drop values may occur due to the aforementioned mass deposit distribution inside the layer of the filter and the local distribution of flow velocity inside a partially filled filter, including the presence of the dead zones in the flow field. All of these effects were not included in the current pressure drop model.

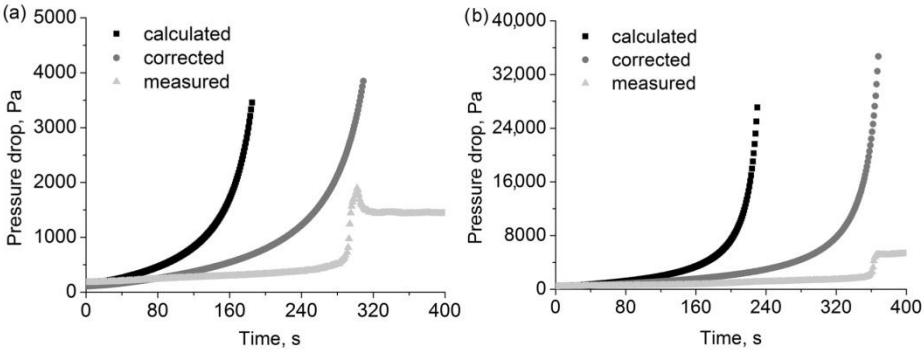


Figure 12. Pressure drop measured and calculated during filtration of water + oil aerosol for (**a**) 2F6 and (**b**) F1 filters.

4. Discussion

Taking into consideration the complete range of oil droplets, an updated filtration efficiency model with improved coefficient fitting and sizes predicts the mass change for three of the four filters with increased accuracy. Further improvements would require a consideration of the mass distribution of deposits within the filter structure, their effect on the local filter properties, and their non-uniform change over time.

The results show a major influence of aerosol composition on the pressure drop across the filter when the filter is loaded with various aerosol particles. The addition of the aerosol containing oil droplets to the aerosol containing water droplets results in an accelerated occurrence of the peak in the pressure drop and a significant decrease in the value to which the pressure drop falls after the peak. This effect can be explained by the differences in the wettability of both liquids in relation to the polypropylene from which the tested nonwoven filters have been made. In addition, in the case of a lower efficiency filter (2F6), the addition of soot particles results in a smaller decrease in peak pressure drop and a more rapid increase in pressure drop due to the deposition of particles on the filter fibres. The same increase over time can also be observed for the F1 filter. This can be explained by the increased efficiency resulting from the function of the solid particles as additional anchor points for droplets and as collection points for deposited liquid particles. The presence of these points will have a more pronounced effect in the case of the filter of lower efficiency.

The presented calculation results comprise the first stage of building a comprehensive model of the dynamics of pressure drop on the filters during the filtration of various types of aerosols. As shown in this work, this description works best in the case of a small load of aerosol particles and/or droplets on the fibres, i.e., during the initial stage of filtration. For further stages, the difference between the results of calculations and experiments becomes much more prominent. The solution to this problem would be a further modification of the model, e.g., by dividing the considered filter into separate thin layers. This approach

requires a much more detailed understanding of the distribution of deposits within the filter and the changes over time of this mass distribution. An entirely valid model should include two stages, pre-surge and post-surge of pressure drop. The first stage is an increase in resistance as a result of filling the filter space with deposits and the related mass distribution in the internal structure of the filter, which changes dynamically during filtration. The second stage is the dynamic equilibrium and is dominated by the process of the drainage and dripping of liquid deposits with minor changes, resulting from the slow filling of areas that previously remained empty, or in the case of solid particles, additional slow increase in the potential capacity of the filter due to the presence of new attachment points. In order to construct such a model, more detailed experimental observations of the mass distribution inside the filter and changes in this distribution over time should be carried out. We have no doubt that such research will be undertaken in the future. However, these studies go beyond the scope of this article, the aim of which was to present and qualitatively explain changes in flow resistance during filtration and the influence of the type of aerosol (binary solid–liquid, triple solid–liquid–liquid) on these changes.

5. Conclusions

An improved model based on the classical filtration theory performed better in predicting filter mass change in comparison with the previously utilised model. Improving the prediction of change in pressure drop over time would require further modifications to the model, considering the distribution of the mass of the deposits inside the filter structure.

Author Contributions: Conceptualization, M.K.; Data curation, M.K.; Formal analysis, M.K. and J.M.G.; Funding acquisition, P.S.; Investigation, M.K. and P.S.; Methodology, M.K. and P.K.; Project administration, M.K. and P.S.; Resources, P.S.; Software, M.K.; Supervision, J.M.G. and T.J.; Validation, M.K.; Visualization, M.K. and P.S.; Writing—original draft, M.K.; Writing—review and editing, M.K., J.M.G., P.S., P.K. and T.J. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This paper is published and based on the results of a research task carried out within the scope of the fifth stage of the National Programme "Improvement of safety and working conditions" supported within the scope of state services by the Ministry of Family and Social Policy task no. 2.SP.12, UM-2/DPR/PD/2020/02, entitled "Development of a test method and a test stand for determining the emission of nano-objects from utility materials coated with functional layers". The Central Institute for Labour Protection—National Research Institute is the Programme's main co-ordinator.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author. The data are not publicly available due to data being obtained based on a self-developed calculation programme which is not a part of the present manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Agranovski, I.E.; Braddock, R.D. Filtration of Liquid Aerosols on Wettable Fibrous Filters. *AIChE J.* **1998**, *44*, 2775–2783. [CrossRef]
2. Agranovski, I.E.; Braddock, R.D. Filtration of liquid aerosols on nonwettable fibrous filters. *AIChE J.* **1998**, *44*, 2784–2790. [CrossRef]
3. Callé, S.; Contal, P.; Thomas, D.; Bémer, D.; Leclerc, D. Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles. *Powder Technol.* **2002**, *128*, 213–217. [CrossRef]
4. Nazaroof, W.W. Indoor particle dynamics. *Indoor Air* **2004**, *14* (Suppl. S7), 175–183. [CrossRef]
5. Chavhan, M.V.; Mukhopadhyay, A. Fibrous Filter to Protect Building Environments from Polluting Agents: A Review. *J. Inst. Eng. Ser. E* **2016**, *97*, 63–73. [CrossRef]
6. González, L.F.; Joubert, A.; Andrès, Y.; Liard, M.; Renner, C.; Coq, L. Le Filtration performances of HVAC filters for PM10 and microbial aerosols—Influence of management in a lab-scale air handling unit. *Aerosol Sci. Technol.* **2016**, *50*, 555–567. [CrossRef]
7. Praphawatvet, T.; Peters, J.I.; Williams, R.O. Inhaled nanoparticles—An updated review. *Int. J. Pharm.* **2020**, *587*, 119671. [CrossRef] [PubMed]

8. Sutherland, K. Section 6—Gas Filtration. In *Filters and Filtration Handbook*, 5th ed.; Sutherland, K., Ed.; Elsevier: Oxford, UK, 2008; pp. 369–450. ISBN 978-1-85617-464-0.
9. Samec, N.; Kegl, B.; Dibble, R.W. Numerical and experimental study of water/oil emulsified fuel combustion in a diesel engine. *Fuel* **2002**, *81*, 2035–2044. [CrossRef]
10. Faramawy, S.; Zaki, T.; Sakr, A.A.-E. Natural gas origin, composition, and processing: A review. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* **2016**, *34*, 34–54. [CrossRef]
11. Chen, F.; Ba, Q.; Lu, W.; Liu, J.; Wu, X.; Ji, Z.; Chang, C. Preparation of combined oleophobic fibre filters with pore size gradients and their high-efficiency removal of oil mist droplets. *Sep. Purif. Technol.* **2023**, *306*, 122653. [CrossRef]
12. Sun, Q.; Leung, W.W.-F. Enhanced nano-aerosol loading performance of multilayer PVDF nanofiber electret filters. *Sep. Purif. Technol.* **2020**, *240*, 116606. [CrossRef]
13. Thomas, D.; Penicot, P.; Contal, P.; Leclerc, D.; Vendel, J. Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles Experimental and modelling study. *Chem. Eng. Sci.* **2001**, *56*, 3549–3561. [CrossRef]
14. Elimelch, M.; Gregory, J.; Jia, X. *Particle Deposition and Aggregation*; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 1998; ISBN 978-0-7506-0743-8.
15. Japuntich, D.A. Particle Clogging of Fibrous Filters. Ph.D. Thesis, Chemical Engineering Department, Loughborough University of Technology, Loughborough, UK, 1991.
16. Qian, F.; Huang, N.; Lu, J.; Han, Y. CFD–DEM simulation of the filtration performance for fibrous media based on the mimic structure. *Comput. Chem. Eng.* **2014**, *71*, 478–488. [CrossRef]
17. Yue, C.; Zhang, Q.; Zhai, Z. Numerical simulation of the filtration process in fibrous filters using CFD-DEM method. *J. Aerosol Sci.* **2016**, *101*, 174–187. [CrossRef]
18. Maddineni, A.K.; Das, D.; Damodaran, R.M. Air-borne particle capture by fibrous filter media under collision effect: A CFD-based approach. *Sep. Purif. Technol.* **2018**, *193*, 1–10. [CrossRef]
19. Przekop, R.; Moskal, A.; Gradoń, L. Lattice-Boltzmann approach for description of the structure of deposited particulate matter in fibrous filters. *J. Aerosol Sci.* **2003**, *34*, 133–147. [CrossRef]
20. Wang, H.; Zhao, H.; Guo, Z.; Zheng, C. Numerical simulation of particle capture process of fibrous filters using Lattice Boltzmann two-phase flow model. *Powder Technol.* **2012**, *227*, 111–122. [CrossRef]
21. Bourrous, S.; Bouilloux, L.; Ouf, F.-X.; Lemaitre, P.; Nerisson, P.; Thomas, D.; Appert-Collin, J.C. Measurement and modeling of pressure drop of HEPA filters clogged with ultrafine particles. *Powder Technol.* **2016**, *289*, 109–117. [CrossRef]
22. Elmøe, T.D.; Tricoli, A.; Grunwaldt, J.-D.; Pratsinis, S.E. Filtration of nanoparticles: Evolution of cake structure and pressure-drop. *J. Aerosol Sci.* **2009**, *40*, 965–981. [CrossRef]
23. Thomas, D.; Contal, P.; Renaudin, V.; Penicot, P.; Leclerc, D.; Vendel, J. Modelling pressure drop in HEPA filters during dynamic filtration. *J. Aerosol Sci.* **1999**, *30*, 235–246. [CrossRef]
24. Thomas, D.; Pacault, S.; Charvet, A.; Bardin-Monnier, N.; Appert-Collin, J.-C. Composite fibrous filters for nano-aerosol filtration: Pressure drop and efficiency model. *Sep. Purif. Technol.* **2019**, *215*, 557–564. [CrossRef]
25. Qian, Y.; Willeke, K.; Ulevicius, V.; Grinshpun, S.A. Particle Reentrainment from Fibrous Filters. *Aerosol Sci. Technol.* **1997**, *27*, 394–404. [CrossRef]
26. Gac, J.M.; Paziewska, A. Badanie porywania kropel zdeponowanych na włókninowych wkładach filtracyjnych. *Inż. I Apar. Chem.* **2015**, *54*, 82–84.
27. Charvet, A.; Thomas, D. 6—Filtration of Liquid Aerosols. In *Aerosol Filtration*; Thomas, D., Charvet, A., Bardin-Monnier, N., Appert-Collin, J.-C., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2017; pp. 161–188. ISBN 978-1-78548-215-1.
28. Gac, J. A Simple Numerical Model of Pressure Drop Dynamics during the Filtration of Liquid Aerosols on Fibrous Filters. *Sep. Sci. Technol.* **2015**, *50*, 2015–2022. [CrossRef]
29. Contal, P.; Simao, J.; Thomas, D.; Frising, T.; Callé, S.; Appert-Collin, J.-C.; Bémer, D. Clogging of Fibre Filters by Submicron Droplets. Phenomena and Influence of Operating Conditions. *J. Aerosol Sci.* **2004**, *35*, 263–278. [CrossRef]
30. Frising, T.; Gujisaite, V.; Thomas, D.; Callé, S.; Bémer, D.; Contal, P.; Leclerc, D. Filtration of solid and liquid aerosol mixtures: Pressure drop evolution and influence of solid/liquid ratio. *Filtr. Sep.* **2004**, *41*, 37–39. [CrossRef]
31. Müller, T.K.; Meyer, J.; Thébault, E.; Kasper, G. Impact of an oil coating on particle deposition and dust holding capacity of fibrous filters. *Powder Technol.* **2014**, *253*, 247–255. [CrossRef]
32. Mead-Hunter, R.; Bredin, A.J.C.; King, A.V.; Larcher, A.; Becker, T.; Mullins, B. The influence of soot nanoparticles on the micro/macro-scale behaviour of coalescing filters. *Chem. Eng. Sci.* **2012**, *84*, 113–119. [CrossRef]
33. Gac, J.; Jackiewicz-Zagórska, A.; Werner, Ł.; Jakubiak, S. Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters. *Sep. Purif. Technol.* **2016**, *170*, 234–240. [CrossRef]
34. Gac, J.; Jackiewicz-Zagórska, A.; Werner, Ł.; Jakubiak, S. Numerical modeling of solid deposits reorganization during consecutive solid-liquid aerosol filtration: Influence on the dynamics of filtration efficiency. *J. Aerosol Sci.* **2018**, *119*. [CrossRef]
35. Kamiński, M.; Gac, J.M.; Sobiech, P.; Kozikowski, P.; Jakubiak, S. Filtration of aerosols containing graphite nanoparticles or their mixture with water droplets on single and multi-layer fibrous filters. *Sep. Purif. Technol.* **2020**, *237*, 116378. [CrossRef]
36. Kamiński, M.; Gac, J.M.; Sobiech, P.; Kozikowski, P.; Jakubiak, S.; Jankowski, T. Filtration of Submicron Soot Particles, Oil Droplets, and their Mixtures on Single-and Multi-layer Fibrous Filters. *Aerosol Air Qual. Res.* **2022**, *22*, 210258. [CrossRef]
37. Löffler, F. Air filtration. Von C. N. Davies. Academic Press Inc., London 1973. *Chemie Ing. Tech.* **2004**, *46*, 364. [CrossRef]

38. Wang, X.; Kim, K.; Lee, C.; Kim, J. Prediction of air filter efficiency and pressure drop in air filtration media using a stochastic simulation. *Fibers Polym.* **2008**, *9*, 34–38. [CrossRef]
39. Biswas, S.; Winoto, S.H. Prediction of Pressure Drop in Non-Woven Filter Media Using a Hagen-Poiseuille Model. *Tribol. Trans.* **2000**, *43*, 251–256. [CrossRef]
40. Frising, T.; Thomas, D.; Bémer, D.; Contal, P. Clogging of fibrous filters by liquid aerosol particles: Experimental and phenomenological modelling study. *Chem. Eng. Sci.* **2005**, *60*, 2751–2762. [CrossRef]
41. Payet, S.; Boulaud, D.; Madelaine, G.; Renoux, A. Penetration and pressure drop of a HEPA filter during loading with submicron liquid particles. *J. Aerosol Sci.* **1992**, *23*, 723–735. [CrossRef]
42. Kamiński, M.; Gac, J.M.; Sobiech, P.; Kozikowski, P.; Jankowski, T. Mixture Aerosols Filtration on Filters with Wide Fibre Diameter Distribution—Comparison with Theoretical and Empirical Models. *Aerosol Air Qual. Res.* **2022**, *22*, 220039. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.