



POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej

Katedra Inżynierii Układów Rozproszonych

Autoreferat - załącznik nr 3 do wniosku
w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego
w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych
w dyscyplinie inżynieria chemiczna

dr inż. Anna Jackiewicz-Zagórska

Warszawa 2023

SPIS TREŚCI

| | |
|--|----|
| 1. Dane wnioskodawcy..... | 3 |
| 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej..... | 3 |
| 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych..... | 3 |
| 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej..... | 3 |
| 4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego | 4 |
| 4.2. Publikacje naukowe będące podstawą wniosku o wszczęcie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego | 4 |
| 4.3. Opis badań, będących podstawą osiągnięcia naukowego..... | 10 |
| 4.3.1. Wprowadzenie..... | 10 |
| 4.3.2. Cel pracy | 12 |
| 4.3.3. Filtracja w strukturach włókninowych – podstawy procesu | 13 |
| 4.3.4. Narzędzia, które posłużyły do osiągnięcia celu założonego w ramach cyklu publikacji..... | 15 |
| 4.3.4.1. Metody otrzymywania filtracyjnych struktur włókninowych | 15 |
| 4.3.4.2. Metodyka i aparatura badawcza | 18 |
| 4.3.5. Omówienie najważniejszych wyników wchodzących w skład osiągnięcia naukowego..... | 22 |
| 4.3.5.1. Określenie wpływu struktury warstwy filtracyjnej na zachowanie cząstki..... | 22 |
| 4.3.5.2. Wpływ morfologii cząstek na ich zachowanie w strukturze włókninowej | 37 |
| 4.3.5.3. Rozdmuch z roztworu | 47 |
| 4.3.6. Podsumowanie | 50 |
| 4.4. Przyszłe cele badawcze..... | 54 |
| 4.5. Bibliografia | 55 |
| 4. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej..... | 55 |
| 4.1. Współpraca z ośrodkami naukowymi | 55 |
| 4.2. Współpraca z przemysłem (ośrodki badawczo-rozwojowe)..... | 57 |
| 4.3. Współpraca wewnątrz Politechniki Warszawskiej | 59 |
| 5. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę..... | 60 |
| 5.1. Osiągnięcia dydaktyczne | 60 |
| 5.2. Osiągnięcia organizacyjne | 66 |
| 5.3. Popularyzacja nauki | 67 |
| 6. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej..... | 67 |
| 6.1. Nagrody i wyróżnienia..... | 67 |

1. Dane wnioskodawcy

Imię i Nazwisko: Dr inż. Anna Jackiewicz-Zagórska
Afilacja: Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej,
Politechnika Warszawska
Identyfikator ORCID: 0000-0002-1021-1536
ResearcherID: M-8385-2018

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne - z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- magister inżynier inżynierii chemicznej i procesowej, 2004 r., Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej (**dyplom ukończenia studiów wyższych magisterskich z wynikiem celującym**)
- doktor nauk technicznych w dziedzinie inżynierii chemicznej, 2010, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, tytuł rozprawy doktorskiej: „*Investigation into filtration of aerosol particles in inhomogeneous fibrous filters*” (**rozprawa wyróżniona przez Radę Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej**)

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

Od 01.01.2011 do chwili obecnej jestem zatrudniona na stanowisku adiunkta na etacie badawczo-dydaktycznym na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej.

Podczas swojej kariery naukowej dwukrotnie przebywałam na urloпах macierzyńskich w okresach: 01-06.2008 r. oraz 05.2017-04.2018 r.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

Osiągnięciem naukowym, o którym mowa w art. 219 ust. 1, pkt.2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.), jest cykl 12 spójnych tematycznie artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych z listy JCR (**H1-H12**), 1 rozdział w punktowanej monografii (**H13**) oraz 1 recenzowany materiał z konferencji międzynarodowej (**H14**). Wszystkie włączone do cyklu prace powstały po uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora. Poprzez podkreślenie nazwiska wskazałam na autora korespondencyjnego.

W zestawieniu w punkcie 4.2. podano IF z roku opublikowania artykułu, IF z roku 2021/2022 r., punktację według Komunikatu Ministra Edukacji i Nauki z dnia 17 lipca 2023 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych oraz określono wkład habilitanta w powstanie publikacji.

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

„ *Transport i depozycja cząstek aerozolowych w filtrach włókninowych* ”

4.2. Publikacje naukowe będące podstawą wniosku o wszczęcie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego

(H1) Jackiewicz-Zagórska, A., Mika, K., Penconek, A. B., Moskał, A. (2022). Non-woven filters made of PLA via solution blowing process for effective aerosol nanoparticles filtration. *Processes*, 10, 1–17. <https://doi.org/10.3390/pr10122598>

IF₂₀₂₂ = 3,500 ; IF₂₀₂₂ = 3,500; MNiSW₂₀₂₃ = 100 pkt

opis mojego wkładu w pracę: zainicjowanie badań, koncepcja badań, przygotowanie metodyki badawczej, koordynacja prac badawczych związanych z charakteryzacją uzyskiwanych struktur z polilaktydu oraz z wyznaczaniem parametrów filtracyjnych, wykonanie analizy uzyskanych wyników i ich interpretacja, przygotowanie manuskryptu, kontakt z redakcją i dyskusja z recenzentami, korekta manuskryptu

szacowany udział procentowy w pracy: 50%

(H2) Przekop, R., **Jackiewicz-Zagórska, A.** (2020). Effect of mesoscale inhomogeneity and fibers size distribution on the initial stage of deep-bed filtration process. *Journal of Aerosol Science*, 142, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105522>

IF₂₀₂₀ = 3,433 ; IF₂₀₂₂ = 4,586; MNiSW₂₀₂₃ = 70 pkt

opis mojego wkładu w pracę: zainicjowanie badań, koncepcja badań, wykonanie części doświadczalnej - wyprodukowanie trzech materiałów filtracyjnych o różnej morfologii, scharakteryzowanie ich struktury, wyznaczenie początkowych parametrów charakteryzujących pracę filtrów, opracowanie wyników doświadczeń, przeprowadzenie analizy i interpretacji uzyskanych wyników, udział w przygotowaniu manuskryptu, przygotowanie odpowiedzi na uwagi recenzentów

szacowany udział procentowy w pracy: 50%

(H3) Gac, J. M., 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. *Journal of Aerosol Science*, 119, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.02.008>

IF₂₀₁₈ = 2,240 ; IF₂₀₂₂ = 4,586; MNiSW₂₀₂₃ = 70 pkt

opis mojego wkładu w pracę: pozyskanie środków na badania, zainicjowanie badań, koncepcja badań, opieka merytoryczna nad częścią doświadczalną prac - naprzemienna filtracja aerozoli stałych i ciekłych, analiza zachowania depozytów, interpretacja wyników, udział w przygotowaniu publikacji

szacowany udział procentowy w pracy: 40%

(H4) Jackiewicz-Zagórska, A., Szwałt, M., Gac, J. M., Werner, Ł., Zalewski, M., Jakubiak, S. (2018). New methods of natural gas adjusting for technological purposes based on modern filtration materials. *Ecological Chemistry and Engineering S-Chemia I Inżynieria Ekologiczna S*, 25, 61–72. <https://doi.org/10.1515/eces-2018-0004>

IF₂₀₁₈ = 1,700 ; IF₂₀₂₂ = 1,900; MNiSW₂₀₂₃ = 200 pkt

opis mojego wkładu w pracę: pozyskanie środków na badania, zainicjowanie badań, koncepcja badań dotycząca filtrów warstwowych, koordynacja części doświadczalnej dotyczącej filtracji w wielowarstwowych filtrach włókninowych, wykonanie części badań doświadczalnych, zaprojektowanie wkładu filtracyjnego do wytworzonej instalacji, interpretacja wyników, przygotowanie manuskryptu, kontakt z redakcją i dyskusja z recenzentami

szacowany udział procentowy w pracy: 50%

(H5) Przekop, R., Jackiewicz-Zagórska, A., Woźniak, M. and Gradoń, L. (2018), Effect of work of adhesion on deep bed filtration process. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 28 No. 4, pp. 786-798. <https://doi.org/10.1108/HFF-03-2016-0131>

IF₂₀₁₈ = 1,958 ; IF₂₀₂₂ = 5,181; MNiSW₂₀₂₃ = 100 pkt

opis mojego wkładu w pracę: zainicjowanie badań, koncepcja badań, koordynowanie prac polegających na wyznaczeniu siły adhezji cząstek aerozolowych z włóknami polipropylenowymi wykorzystując mikroskopię sił atomowych, interpretacja wyników, udział w przygotowaniu publikacji

szacowany udział procentowy w pracy: 40%

(H6) Gac, J. M., Jackiewicz, A., Werner, Ł., Jakubiak, S. (2016). Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters. *Separation and Purification Technology*, 170, 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.06.057>

IF₂₀₁₆ = 3,731 ; IF₂₀₂₂ = 9,097; MNiSW₂₀₂₃ = 140 pkt

opis mojego wkładu w pracę: pozyskanie środków na badania, zainicjowanie badań, koncepcja badań, koordynacja części doświadczalnej prac - naprzemienna filtracja aerozoli stałych i ciekłych, analiza zachowania depozytów na podstawie zdjęć wykonanych mikroskopem skaningowym, interpretacja wyników, udział w przygotowaniu publikacji

szacowany udział procentowy w pracy: 50%

(H7) Jakubiak, S., Tomaszewska, J., Jackiewicz-Zagórska, A., Michalski, J., Kurzydłowski, K. (2016). Polypropylene - zinc oxide nanorod hybrid material for applications in separation processes. *Chemical and Process Engineering*, 37, 393–403. <https://doi.org/10.1515/cpe-2016-0032>

IF₂₀₁₆ = 1,060 ; IF₂₀₂₂ = 0,630; MNiSW₂₀₂₃ = 100 pkt

opis mojego wkładu w pracę: konsultacje dotyczące koncepcji badań, zaprojektowanie włókniny z polipropylenu, która była poddawana modyfikacji tlenkiem cynku, badania sprawności materiału referencyjnego oraz pokrytego ZnO, analiza porównawcza uzyskanych wyników, udział w przygotowaniu manuskryptu

szacowany udział procentowy w pracy: 30%

(H8) Jackiewicz, A., Jakubiak, S., Gradoń, L. (2015). Analysis of the behavior of deposits in fibrous filters during non-steady state filtration using X-ray computed tomography. *Separation and Purification Technology*, 156, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.10.004>

IF₂₀₁₅ = 3,726 ; IF₂₀₂₂ = 9,097; MNiSW₂₀₂₃ = 140 pkt

opis mojego wkładu w pracę: zainicjowanie badań, koncepcja badań, nawiązanie współpracy z Wydziałem Inżynierii Materiałowej PW w celu wykonania analiz za pomocą zaawansowanych technik pomiarowych, zaplanowanie badań, wykonanie badań doświadczalnych polegających na obładowaniu wgłębnym struktur włókninowych o różnej morfologii stałymi cząstkami krzemionki, koordynowanie części polegającej na analizie próbek tomografem komputerowym, przeprowadzenie analizy i interpretacji wyników doświadczeń, przygotowanie manuskryptu, kontakt z redakcją, przygotowanie odpowiedzi na uwagi recenzentów

szacowany udział procentowy w pracy: 80%

(H9) Jackiewicz, A., Werner, Ł. (2015). Separation of nanoparticles from air using melt-blown filtering media. *Aerosol and Air Quality Research*, 15, 2422–2435. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.04.0236>

IF₂₀₁₅ = 2,744 ; IF₂₀₂₂ = 4,375; MNiSW₂₀₂₃ = 100 pkt

opis mojego wkładu w pracę: zainicjowanie badań, koncepcja badań, koordynowanie badań filtracji nanoaerozli stałych i ciekłych, przeprowadzenie analizy i interpretacji wyników doświadczeń, przygotowanie manuskryptu, kontakt z redakcją, przygotowanie odpowiedzi na uwagi recenzentów

szacowany udział procentowy w pracy: 70%

(H10) Penconek, A. B., Jackiewicz, A., Moskal, A. (2015). Penetration of Diesel Exhaust Particles (DEPs) through Fibrous Filters Produced Using Melt-Blown Technology. *KONA Powder and Particle Journal*, 32, 184–195. <https://doi.org/10.14356/kona.2015008>

IF₂₀₁₅ = 2,857 ; IF₂₀₂₂ = 3,400; MNiSW₂₀₂₃ = 70 pkt

opis mojego wkładu w pracę: zainicjowanie badań, dyskusje dotyczące koncepcji badań, zaprojektowanie sześciu filtrów włókninowych do badań (trzy filtry mechaniczne, trzy filtry o

naładowanych włóknach, tzw. elektretowe), charakteryzacja materiałów, analiza uzyskanych wyników, udział w przygotowaniu manuskryptu, udział w dyskusji z recenzentami

szacowany udział procentowy w pracy: 50%

(H11) Jackiewicz, A., Podgórski, A., Gradoń, L., Michalski, J. (2013). Nanostructured media to improve the performance of fibrous filters. *KONA Powder and Particle Journal*, 244–255. <https://doi.org/10.14356/KONA.2013023>

IF₂₀₁₃ = 0,891 ; IF₂₀₂₂ = 3,400; MNiSW₂₀₂₃ = 70 pkt

opis mojego wkładu w pracę: koncepcja badań, wykonanie części doświadczalnej – charakterystyka wytworzonych na potrzeby badań struktur, zbadanie zdolności filtracyjnych materiałów wykonanych techniką melt-blown o średnicach włókien od mikro- do nanometrów, wytworzonych z różnych polimerów, przeprowadzenie obliczeń zgodnie z klasyczną teorią filtracji oraz z zaproponowanym modelem uwzględniającym niehomogeniczny rozkład średnic włókien w filtrze, opracowanie uzyskanych wyników, przeprowadzenie analizy i interpretacji wyników doświadczeń, przygotowanie manuskryptu, kontakt z redakcją, przygotowanie odpowiedzi na uwagi recenzentów

szacowany udział procentowy w pracy: 70%

(H12) Podgórski, A., Maißer, A., Szymanski, W. W., **Jackiewicz, A.**, Gradoń, L. (2011). Penetration of monodisperse, singly charged nanoparticles through polydisperse fibrous filters. *Aerosol Science and Technology*, 45, 215–233. <https://doi.org/10.1080/02786826.2010.531300>

IF₂₀₁₁ = 2,964 ; IF₂₀₂₂ = 4,809; MNiSW₂₀₂₃ = 70 pkt

opis mojego wkładu w pracę: konsultacje dotyczące koncepcji badań, wykonanie charakterystyk strukturalnych sześciu badanych filtrów, określenie rozkładów średnic włókien i przybliżenie ich rozkładem logarytmiczno-normalnym, sporządzenie zdjęć SEM analizowanych materiałów, udział w badaniach doświadczalnych penetracji nanocząstek (pięciu rodzajów protein oraz dwóch rodzajów krzemionki) przez sześć filtrów włókninowych, obliczenia według modelu klasycznej teorii filtracji opisujące uzyskane wyniki, udział w przygotowaniu manuskryptu

szacowany udział procentowy w pracy: 20%

Rozdział w monografii

(H13) Jackiewicz-Zagórska A., Gac J. M., Nowak B., Werner Ł. (2023). Modelowanie procesu usuwania z powietrza cząstek aerozolowych w nowoczesnych kompozytowych materiałach polipropylen-ZnO. *Rozwiązania technologiczne XXI wieku – skutki i perspektywy rozwoju. Tom 4, Wydawnictwo Naukowe Tygiel*, ISBN 978-83-67881-09-8, 254-266.

MNiSW₂₀₂₁ = 80 pkt (według Komunikatu Ministra Edukacji i Nauki z dnia 22 lipca 2021 r. w sprawie wykazu wydawnictw publikujących recenzowane monografie naukowe)

opis mojego wkładu w pracę: pozyskanie środków na badania, zainicjowanie badań, nawiązanie współpracy z Centralnym Instytutem Ochrony Pracy w celu wykonania badań z wykorzystaniem cząstek biotycznych, koncepcja badań, wyznaczenie długości pręcików tlenku cynku, którą następnie inkorporowano do modelu matematycznego, przygotowanie manuskryptu, kontakt z redakcją

szacowany udział procentowy w pracy: 40%

Recenzowany artykuł w materiałach konferencyjnych

(H14) Jackiewicz, A., Podgórski, A., Gradoń, L. (2012). Studies on filtration of aerosol particles in nonuniform fibrous filters, *11th World Filtration Congress, Graz, Austria*, 16-20.04.2012, 13 pages article.

opis mojego wkładu w pracę: koncepcja badań, koordynowanie produkcji filtrów metodą rozdmuchu stopionego polimeru, wykonanie pomiarów skuteczności filtracji i spadków ciśnienia dla filtrów o różnej budowie, opracowanie wyników doświadczeń, obliczenia współczynników, które mówią o stopniu niejednorodności struktury filtracyjnej, interpretacja uzyskanych wyników, przygotowanie prezentacji ustnej na konferencję, przygotowanie artykułu do materiałów konferencyjnych, kontakt z recenzentami

szacowany udział procentowy w pracy: 60%

Podsumowanie cyklu publikacji naukowych będących podstawą wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego (dane z dnia 31.08.2023):

Liczba publikacji: 14

Sumaryczny IF zgodnie z datą opublikowania: 30,804

Sumaryczny IF zgodnie z datą 31.08.2023: 54,561

Sumaryczna liczba punktów ministerialnych wg wykazu MEiN aktualnego w dniu 31.08.2023 : 1310

Liczba cytowań (z dn. 26.09.2023): 157 (Scopus)

Liczba cytowań bez autocytowań (z dn. 26.09.2023): 133 (Scopus)

Liczba cytowań (z dn. 26.09.2023): 145 (Web of Science)

Liczba cytowań bez autocytowań (z dn. 26.09.2023): 124 (Web of Science)

Oświadczenia współautorów, określające ich merytoryczny wkład w powstanie prac (H1-H14) stanowią treść **załącznika nr 5** do wniosku. Załącznik ten nie zawiera oświadczenia prof. dr hab. inż. Alberta Podgórskiego, który był promotorem mojej pracy magisterskiej i doktoratu, ponieważ profesor zmarł 17.12.2010.

Kopie prac wchodzących w skład cyklu stanowią treść **załącznika nr 6** do niniejszego wniosku.

4.3. Opis badań, będących podstawą osiągnięcia naukowego

4.3.1. Wprowadzenie

W kręgu moich zainteresowań naukowych znajdują się zagadnienia separacji skondensowanych form materii, tj. cząstek fazy stałej lub kropli, z fazy ciągłej – gazu. Układy takie nazywane są aerozolami. Cząstki te mogą mieć różne rozmiary, od kilku nanometrów do kilku mikrometrów, różne kształty (np. kubiczne, sferyczne) i mogą być pochodzenia naturalnego (np. pyły mineralne, krople morskie) lub antropogenicznego (np. spaliny, pyły przemysłowe). Cząstki aerozolowe mogą być nośnikami substancji toksycznych, alergenów i mikroorganizmów. Ich wdychanie może prowadzić do różnych problemów zdrowotnych, takich jak choroby układu oddechowego, sercowo-naczyniowego, a nawet nowotwory. Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) podaje, że w 2019 r. ponad 90% światowej populacji zamieszkiwało obszary, na których odnotowywane stężenia pyłu zawieszonego PM_{2,5} przekraczały wyznaczone przez organizację dopuszczalne poziomy. W państwach członkowskich Unii Europejskiej (UE) w 2020 r. odnotowano 238 000 przedwczesnych zgonów, które były wynikiem narażenia na drobny pył zawieszony w powietrzu. Obecność cząstek w powietrzu wpływa na jego jakość, co ma znaczenie nie tylko dla zdrowia ludzi, ale również dla środowiska. Na przykład, aerozole mogą wpływać na widoczność, co jest szczególnie problematyczne w kontekście ruchu drogowego i lotniczego. Niektóre aerozole mają zdolność do absorpcji lub odbijania promieniowania słonecznego, co wpływa na bilans energetyczny atmosfery i może mieć konsekwencje dla globalnego klimatu. Cząstki aerozolowe mogą przyczyniać się do korozji metali i degradacji różnych materiałów, co ma znaczenie w kontekście utrzymania infrastruktury i długowieczności urządzeń. W kontekście

przemysłowym, obecność aerozoli może wpływać na jakość i efektywność procesów, na przykład przez zanieczyszczenie surowców lub końcowych produktów. W niektórych przypadkach, takich jak przemysł chemiczny czy energetyczny, aerozole mogą stanowić bezpośrednie zagrożenie w postaci zagrożenia wybuchem lub pożarem.

Z powyższych względów, kontrola i usuwanie cząstek aerozolowych z powietrza jest kluczową kwestią w wielu dziedzinach, od medycyny i ochrony zdrowia publicznego, przez inżynierię środowiska, aż po technologie przemysłowe. Istnieje wiele metod separacji (rozdzielania) aerozoli, które można podzielić w zależności od mechanizmu działania, np. sedymentacja - w tym przypadku cząstki są oddzielane od gazu poprzez działanie siły grawitacji, jest ona efektywna głównie dla większych cząstek; separacja odśrodkowa – wykorzystuje ruch wirowy strumienia do separacji cząstek na podstawie ich masy; filtracja - wykorzystuje porowatą przegrodę/złoże do zatrzymywania cząstek na jej powierzchni lub w objętości; separacja elektrostatyczna - wykorzystuje pole elektrostatyczne do ładowania cząstek, które są następnie przyciągane do elektrod o przeciwnym znaku. Każda z tych metod ma swoje zalety i wady, a ich efektywność zależy od wielu czynników, takich jak wielkość cząstek, ich skład chemiczny, temperatura i wilgotność strumienia gazu. W praktyce często stosuje się kombinację różnych metod w celu osiągnięcia optymalnej efektywności.

Jednym z najskuteczniejszych procesów stosowanych do usuwania cząstek ze strumienia powietrza jest filtracja, a materiałami używanymi najczęściej w tym procesie są filtry włókninowe. Mają one szerokie zastosowania, m.in. w systemach wentylacyjno-klimatyzacyjnych w budynkach czy też w pojazdach, jako środki ochrony osobistej, w różnych gałęziach przemysłu, w tym w przemyśle farmaceutycznym, elektronicznym, spożywcym. Z uwagi na swoje zalety, tj. głównie wysokie sprawności dla szerokiego zakresu średnic cząstek od nano- do mikrometrycznych, przy stosunkowo niewielkich oporach przepływu, zakres ich zastosowań ciągle rośnie. W ostatnich latach stały się one bardzo obiecującym materiałem bazowym do tworzenia kompozytów, które są skuteczniejsze od materiału jednoskładnikowego oraz posiadają nowe właściwości. Pozwala to na intensyfikację procesu i redukcję gabarytów instalacji. W najbliższych latach w naszym kraju ze szczególną intensywnością będą realizowane działania mające na celu poprawę jakości powietrza, która jest jednym z celów strategicznych zawartych w Polityce ekologicznej państwa 2030 – strategia rozwoju w obszarze środowiska i gospodarki wodnej. Ponadto, pandemia COVID-19 ukazała konieczność tworzenia/ulepszenia masek ochronnych do skutecznej separacji wirusów przenoszonych drogą kropelkową. Dlatego też stworzenie skutecznych filtrów włókninowych do oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń aerozolowych będzie miało ogromne znaczenie dla zapewnienia zdrowego i czystego środowiska.

Co powinien zapewnić taki filtr:

1. wysoka skuteczność filtracji – podstawowym celem filtra włókninowego jest skuteczne usuwanie cząstek z powietrza, dlatego też jego struktura powinna być odpowiednio zaprojektowana, aby zatrzymywać konkretny typ zanieczyszczeń;
2. niskie opory przepływu powietrza – struktura filtracyjna powinna być tak zaprojektowana, aby minimalizować opory przepływu;
3. duża pyłochłonność – jest to zdolność filtra włókninowego do zatrzymywania i gromadzenia cząstek pyłu w swojej strukturze;

4. trwałość i żywotność - włókna filtracyjne powinny być odporne na uszkodzenia i utratę efektywności filtracyjnej w wyniku eksploatacji, a także na działanie czynników zewnętrznych, takich jak wilgoć czy temperatura; czas użytkowania filtra jest istotny zarówno z punktu widzenia efektywności oczyszczania powietrza, jak i ekonomicznego użytkowania.

Ważnym czynnikiem, który jest ostatnio bardzo pożądanym w kontekście zrównoważonego rozwoju, jest biodegradowalność materiału, z którego wykonane są filtry włókninowe. Tutaj należy nadmienić, że głębokie filtry włókninowe są nieregenerowalne. Oznacza to, że po osiągnięciu określonego przez producenta lub wynikającego ze względów wytrzymałościowych spadku ciśnienia jest on wymieniany na nowy, a ten zużyty musi zostać odpowiednio zutylizowany. Dlatego też biodegradowalność materiału jest istotna z kilku powodów m.in.: zmniejszenia obciążenia składowisk, czy też oszczędności zasobów. Biodegradowalność może być ważnym kryterium wyboru materiału, ale nie jest jedynym. Należy również uwzględnić inne czynniki, takie jak wydajność filtracji, koszty i dostępność materiału.

Zatem stworzenie skutecznego filtra włókninowego do oczyszczania powietrza z cząstek aerozolowych to kompleksowe zadanie, które wymaga dokładnego poznania lokalnych zjawisk decydujących o zachowaniu cząstki w strukturze filtracyjnej, właściwie dobranego materiału i struktury włókna, oraz dbałości o efektywność, niskie opory przepływu i długi czas użytkowania.

4.3.2. Cel pracy

Biorąc pod uwagę złożoność procesu separacji aerozoli w filtrach włókninowych, na którą składają się: niejednorodna struktura materiału filtracyjnego, a co za tym idzie skomplikowany ruch cząstek w takim materiale, niestabilny charakter procesu, interakcje cząstka – włókno i cząstka – cząstka, jego opis jest trudnym wyzwaniem, zarazem bardzo istotnym i ciekawym. Dlatego też celem badań przeprowadzonych w ramach cyklu publikacji **(H1-H14)** badań było dogłębne poznanie procesów transportowych cząstek w filtrze. Wszystkie badane procesy/zjawiska w skali makro i mikro są bardzo istotne w kontekście stworzenia efektywnego filtra do oczyszczania gazu, czyli takiego, w którym cząstki będą skutecznie deponowały się na włóknach, będą równomiernie zabudowywały objętość materiału, bo to z kolei będzie gwarantem wysokiej sprawności filtracji, powolnego wzrostu spadku ciśnienia oraz długiego czasu użytkowania filtra. Ponadto, rozważałam nie tylko etap początkowy procesu, którego to opisy dominują w literaturze przedmiotu, ale również proces niestabilny w czasie, którego przebieg jest kluczowy z punktu widzenia używania filtra w warunkach rzeczywistych, czyli dla użytkowników, jak i projektantów filtrów. Do tej pory głęboki filtr włókninowy był swojego rodzaju czarną skrzynką. Znane i zdefiniowane były strumienie aerozolu na wlocie i wylocie z filtra, natomiast to co działo się z cząstkami wewnątrz było nie do końca poznane. Przeprowadzone badania angażujące zaawansowane techniki umożliwiają lepsze zrozumienie zjawisk zachodzących na różnych etapach procesu filtracji oraz w różnych jego warunkach. Zgromadzona przeze mnie wiedza pozwoli na projektowanie skutecznych materiałów filtracyjnych w zależności od ich przeznaczenia, np. filtracja

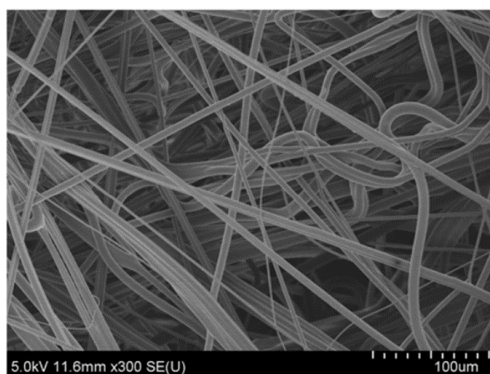
środowiskowa, przemysłowa, ochrona osobista, biorąc pod uwagę różne obiekty podlegające separacji.

Szczegółowe cele obejmowały następujące zagadnienia:

1. Określenie wpływu struktury warstwy filtracyjnej na zachowanie się w niej cząstki (H2, H4, H11, H14).
2. Określenie wpływu struktury włókna na zachowanie się cząstki w filtrze (H7, H13).
3. Analizę zjawisk lokalnych zachodzących podczas kontaktu cząstka – włókno i cząstka – cząstka (H5, H8).
4. Określenie wpływu morfologii cząstek na ich zachowanie się w materiale filtracyjnym (H9, H10, H12).
5. Analizę procesu filtracji aerozoli mieszanych (H3, H6).
6. Wytworzenie i zbadanie włókninowego filtra z materiału biodegradowalnego (H1).

4.3.3. Filtracja w strukturach włókninowych – podstawy procesu

Filtry włókninowe to bardzo porowate materiały zbudowane z nieregularnie ułożonych włókien, usytuowanych przeważnie prostopadle do kierunku przepływu oczyszczanego medium, o szerokim zakresie średnic od nanometrów do kilkudziesięciu mikrometrów (Rys. 1).



Rys. 1. Zdjęcie wykonane skaningowym mikroskopem elektronowym SEM przedstawiające strukturę filtra włókninowego

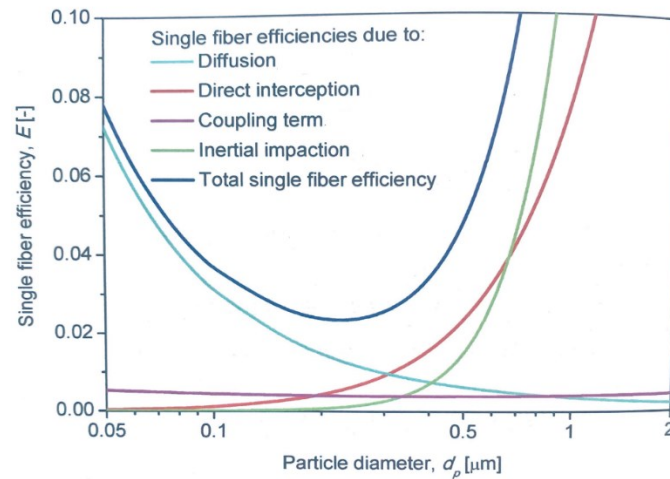
Ich budowa jest niejednorodna, ma więc polidispersyjny rozkład średnic włókien oraz porów. Grubość materiału uzależniona jest od średnicy pojedynczego włókna oraz ilości warstw filtracyjnych. Wszystkie te wielkości bardzo silnie wpływają na pracę filtra. Główne parametry mówiące o efektywności pracy filtra to sprawność filtracji (ile cząstek zostało zatrzymanych w filtrze w stosunku do ilości cząstek w strumieniu wlotowym), opory przepływu, pyłochłonność oraz czas życia. Z uwagi na powyższe, chcąc zaprojektować skuteczny, energooszczędny filtr, musimy wziąć pod uwagę dwa parametry charakteryzujące go, tj. sprawność i spadek ciśnienia i pamiętać by uzyskać dla danego procesu możliwie najwyższe skuteczności przy stosunkowo

niskich, wolno rosnących oporach przepływu. Filtry są zwykle charakteryzowane za pomocą współczynnika jakości filtra QF (quality factor):

$$QF = -\frac{\ln P}{\Delta p} \quad (1)$$

gdzie: P jest penetracją cząstek (penetracja = 1-sprawność), a Δp jest spadkiem ciśnienia.

Podczas przepływu aerozolu przez filtr cząstki deponują (osadzają) się na kolektorach (włóknach) dzięki działaniu kilku mechanizmów, tj. dyfuzja brownowska, inercja (bezwładność), bezpośrednie zaczepienie oraz mechanizm elektrostatyczny w przypadku, gdy cząstki i/lub włókna są naładowane. Występuje jeszcze mechanizm grawitacyjny, który ma znaczenie dla cząstek o średnicach rzędu kilkudziesięciu mikrometrów. W moich pracach nie zajmowałam się tak dużymi cząstkami, dlatego też mechanizm ten został pominięty w rozważaniach. Na rys. 2 przedstawiono przebieg sprawności pojedynczego włókna dla poszczególnych mechanizmów depozycji jako funkcję średnicy cząstki.



Rys. 2. Przebieg sprawności pojedynczego włókna dla poszczególnych mechanizmów depozycji cząstki

Widać tutaj charakterystyczne minimum, które odpowiada średnicy cząstki, która najłatwiej penetruje przez strukturę filtracyjną, stąd jej nazwa z języka angielskiego MPPS (the most penetrating particle size). Projektując filtry dąży się do tego, by przesunąć MPPS w stronę cząstek mniejszych.

Na początkowym etapie filtracji, kiedy włókna są jeszcze „czyste”, sprawność zależy tylko od struktury filtra oraz od warunków procesowych (prędkość przepływu aerozolu, stężenie cząstek w gazie, rodzaj cząstek i gazu). W myśl klasycznej teorii filtracji początkowa skuteczność filtra wyrażona jest następująco:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{4(1-\varepsilon_0)EL}{\pi d_{F0}\varepsilon_0}\right) \quad (2)$$

gdzie: ε_0 oznacza porowatość czystego filtra bez cząstek w jego wnętrzu; E to sprawność pojedynczego włókna; L grubość materiału filtracyjnego oraz d_{F0} średnica czystego włókna. W miarę biegu procesu cząstki przyczepiają się do uprzednio zdeponowanych tworząc

rozgałęzione struktury dendrytyczne, które ostatecznie łączą się ze sobą i wypełniają pory materiału. Masa i struktura depozytów wpływają na zachowanie filtra. Ma miejsce tzw. filtracja wgłębna (deep-bed filtration). Kiedy wszystkie wolne przestrzenie wypełnią się depozytami, wówczas cząstki zaczynają osadzać się na powierzchni czołowej materiału (od strony wlotu strumienia aerozolu), wtedy to filtracja zmienia swój charakter z wgłębnej na plackową (cake filtration), obserwuje się wówczas szybki wzrost spadku ciśnienia. To, który rodzaj filtracji dominuje w danej strukturze filtracyjnej, jest związane przede wszystkim z jej budową, co zostanie zaprezentowane w dalszej części niniejszego opracowania. Jest to bardzo istotne w kontekście stworzenia filtra charakteryzującego się długim czasem pracy, a więc bardzo pyłochłonnego, w którym cząstki deponują się w całej objętości materiału, nie tylko w jego czołowej warstwie, a tym samym opory przepływu rosną wolno. Warto przypomnieć w tym miejscu, że włókninowe filtry wgłębne są materiałami nieregenerowalnymi, dlatego tym bardziej zależy nam na stworzeniu filtra, który jak najdłużej mógłby spełniać założone cele, dzięki posiadaniu struktury odpowiednio zaprojektowanej do separacji danego typu zanieczyszczeń. Ponadto, z uwagi na powyższe, warto też rozważyć zastosowanie materiałów biodegradowalnych do produkcji filtrów włókninowych, co również znalazło się w przedłożonym cyklu publikacji.

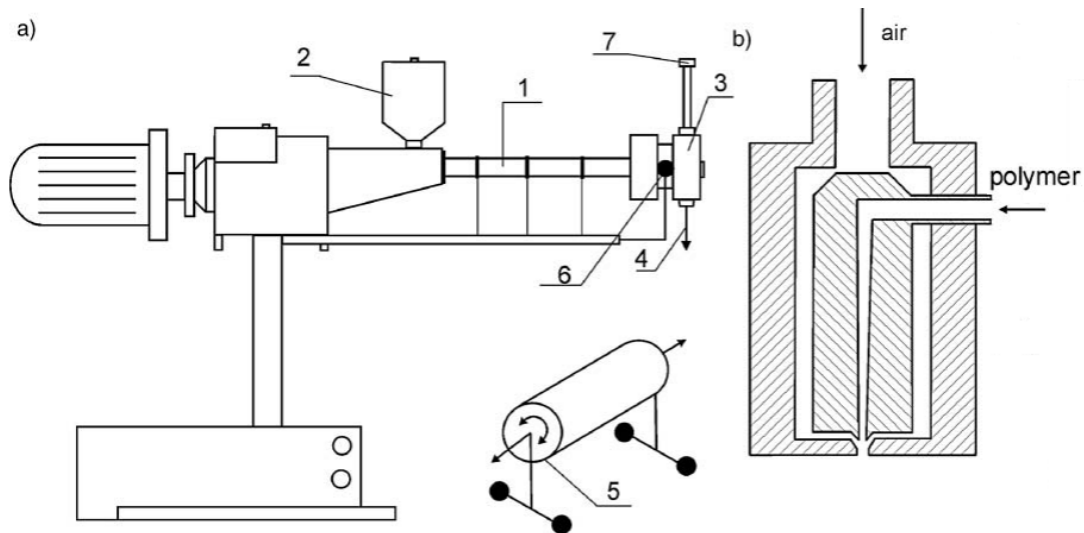
4.3.4. Narzędzia, które posłużyły do osiągnięcia celu założonego w ramach cyklu publikacji

4.3.4.1. Metody otrzymywania filtracyjnych struktur włókninowych

Do produkcji filtrów badanych w ramach prac wykorzystano technologię polegającą na rozdmuchu stopionego polimeru (melt-blown) oraz na rozdmuchu z roztworu (solution blow spinning). Oba stanowiska do wytwarzania materiałów włókninowych wymienionymi technikami znajdują się na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej PW.

Rozdmuch stopionego polimeru – melt-blown (MB)

Melt-blown jest to najważniejsza technologia do produkcji włókninowych mediów filtracyjnych o pożądanej strukturze, tj. odpowiedniej średnicy włókien od nanometrów do kilkudziesięciu mikrometrów, porowatości i grubości. Wydajność produkcji włókien jest znacznie wyższa niż w przypadku innych metod, zwłaszcza w odniesieniu do procesu elektroprzędzenia. Jest to też technologia stosunkowo tania i bezpieczna dla środowiska (podczas produkcji nie są emitowane żadne niebezpieczne opary, jak np. ma to miejsce we wspomnianej metodzie elektroprzędzenia). To stawia metodę melt-blown na czele technologii używanych do produkcji na skalę przemysłową. Schemat stanowiska wraz ze specjalnej konstrukcji dyszą rozwłókniającą, zlokalizowanego na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej PW przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. (a) Schemat stanowiska do produkcji filtrów włókninowych techniką melt-blown;
(b) konstrukcja dyszy rozwłókniającej

Granulowany polimer umieszczony w pojemniku 2 jest pobierany przez śrubę ekstrudera i przepychany do dyszy 3. Podczas transportu polimer jest podgrzewany z zewnątrz w trzech etapach przez elektroniczną grzałkę 1. Przepływ stopionego i zhomogenizowanego polimeru jest określany przez prędkość obrotową śruby, kontrolowaną przez falownik za pośrednictwem elektronicznego silnika. Stopiony polimer jest przetłaczany przez dyszę o specjalnej konstrukcji zaprezentowaną na rys. 3. Ciśnienie i temperatura polimeru w dyszy są mierzone za pomocą czujników 6. Strumień gorącego powietrza z kompresora 7, płynący wzdłuż stopionych filamentów polimerowych, rozciąga je do pożądanej średnicy. Utwardzone włókna 4 są zbierane na bębnie 5, który obraca się i porusza się ruchem posuwisto-zwrotnym, aby utworzyć odpowiednią strukturę filtra określoną przez średnicę włókna i lokalną gęstość upakowania włókien.

Kluczowym parametrem decydującym o jakości filtra jest średnica włókna. Szacowanie parametrów procesowych dla formowania włókien o założonej średnicy zostało zrealizowane poprzez modelowanie zjawiska rozwłókniania w jednej dyszy przy następujących założeniach: włókno ma kształt cylindryczny, polimer ma tę samą gęstość dla fazy stopionej i stałej, prędkość osiowa w stopionym włóknie jest jednolita w całym przekroju włókna, stopiony polimer jest cieczą newtonowską z zależnością lepkości od temperatury typu Arrheniusa, pojemność cieplna polimeru jest stała, przewodnictwo cieplne w kierunku osiowym jest zaniedbywalne, a rozkład temperatury jest jednolity w przekroju włókna. Ponadto, uwzględniono stałość objętościowego przepływu polimeru przy danym ciśnieniu i temperaturze w dyszy oraz przepływ i temperaturę powietrza w dyszy. Bilansując pęd i używając związku naprężenie-odkształcenie oraz bilansu energii, można było oszacować wpływ parametrów procesu na średnicę stałego włókna wytwarzanego z dyszy o określonej średnicy. Przedstawiam przykładowe wartości parametrów produkcyjnych przy metodzie melt-blown: temperatura polimeru (polipropylen) w dyszy z zakresu (260–280°C), ciśnienie w dyszy z zakresu (3–5

atm.), względna prędkość powietrza do prędkości polimeru w dyszy wynosiła 52 m/s, temperatura powietrza wynosiła 360°C.

Do produkcji materiałów włókninowych metodą melt-blown można używać tylko polimerów termoplastycznych, np. polipropylenu, polietylenu, poliamidu. Różnią się one od siebie indeksem płynięcia MFI (melt-flow index), który jest ważnym użytkowym wskaźnikiem przetwarzalności. Zależy od kilku czynników np. od średniego ciężaru cząsteczkowego polimeru i jego stopnia polimolekularności od stopnia rozgałęzienia makrocząsteczek, zawartości składników dodatkowych (zwłaszcza napełniaczy) i środków smarujących. W ramach moich prac do produkcji filtrów wykorzystywałam głównie polipropylen. Stosowałam jego różne rodzaje, ażeby sprawdzić jak wpływa MFI na otrzymywane włókna. Technika melt-blown umożliwia wytwarzanie włókien o średnicach z zakresu 0,4 µm do 20 µm, korzystnych dla optymalizacji struktury wysokosprawnego filtra dla zdefiniowanych wymogów separacyjnych.

Na podstawie wyników licznych badań wpływ różnych parametrów na strukturę otrzymywanej włókniny można podsumować następująco:

1. średnia średnica włókna – własności polimeru, konstrukcja dyszy, ciśnienie polimeru w dyszy, temperatura i natężenie przepływu powietrza w dyszy, temperatura i natężenie przepływu polimeru;
2. porowatość włókniny – odległość dyszy od bębna odbierającego włókna, szybkość obrotów bębna;
3. grubość włókniny – ilość obrotów bębna zbiorczego.

Mając tę wiedzę jesteśmy w stanie tak zaprojektować proces produkcji, by finalnie uzyskać materiał o pożądanej strukturze.

Rozdmuch z roztworu – solution blow spinning (SBS)

Jednym z nowoczesnych podejść do produkcji materiałów włókninowych jest technika rozdmuchu z roztworu. Opiera się ona na formowaniu włókien przez odparowywanie rozpuszczalnika z roztworu polimeru. Metoda ta pozwala na uzyskanie włókien o średnicach zbliżonych do tych uzyskiwanych metodą electrospinning, ale z wykorzystaniem prostszej aparatury i ze zwiększoną wydajnością. Duża uniwersalność tej metody wynika z możliwości użycia szerokiej gamy rozpuszczalników przy relatywnie niskich kosztach operacyjnych. Kluczowym wymogiem dla używanego polimeru jest jego rozpuszczalność w cieczy o wysokiej lotności. Dodatkowym atutem jest możliwość użycia szerokiej gamy kolektorów do zbierania włókien, od metalowych powierzchni po materiały organiczne. Jako stosunkowo nowa technologia, rozdmuch z roztworu jest w ostatnim czasie intensywnie rozwijany.

Układ do produkcji włókien metodą SBS składa się z pompy, która przepycha rozpuszczony polimer przez wąską dyszę, do której doprowadzane jest również sprężone powietrze. Głowica zawiera dwa koncentrycznie usytuowane kanały: zewnętrzny dla gazu pod ciśnieniem i wewnętrzny dla roztworu polimeru. Roztwór wypływający z wewnętrznego kanału jest przyspieszany przez strumień sprężonego powietrza, w wyniku czego formuje się z niego stożek. Powietrze musi mieć odpowiednio dobrane ciśnienie, żeby mogło porywać strugi

roztworu, z których następnie odparowuje rozpuszczalnik i tworzą się włókna zbierane na powierzchni kolektora. Strumień powietrza jest więc odpowiedzialny za wyciąganie włókien polimerowych, odparowanie rozpuszczalnika, jak również transport włókien do kolektora.

Parametrami procesowymi w metodzie SBS, które wpływają na jakość otrzymywanych materiałów są:

1. Ciśnienie gazu – zbyt wysokie ciśnienie gazu powoduje wzrost burzliwości w miejscu dozowania roztworu polimeru, co może prowadzić do trudności w uformowaniu stożka przędnego, porywania kropli roztworu, które tworzą na materiale defekty. Zbyt niskie ciśnienie z kolei prowadzi do miejscowego spadku temperatury i przez to występują trudności w odparowaniu rozpuszczalnika z roztworu polimeru. Powstające włókna są nie do końca suche, stąd ich tendencja do łączenia się i plątania, w wyniku czego powstają grubsze włókna. Zbyt niskie ciśnienie wpływa też na spowolnienie porywania tworzących się strug, co z kolei wpływa na blokowanie wylotu z dyszy zalegającym tam roztworem.

2. Przepływ roztworu polimeru – przy zbyt szybkim przepływie roztworu rozpuszczalnik może nie mieć wystarczającej ilości czasu by odparować, co uniemożliwia tworzenie włókien. Z kolei przy zbyt małym strumieniu roztworu ma miejsce niestabilny wypływ i porywanie roztworu polimeru z końca dyszy, nie ma poprawnego rozwłókniania i w tworzonej strukturze można dostrzec defekty w postaci zestalonych kropli polimeru.

3. Stężenie polimeru w roztworze – to kluczowy parametr procesowy wpływający na ilość i morfologię otrzymywanych włókien. Przy zbyt niskich stężeniach nie tworzy się stożek przędny, obserwuje się znaczną niestabilność procesu i spadek wydajności tworzenia włókien, sporo defektów w strukturze materiału. Przy zbyt dużym stężeniu polimeru znacząco zwiększa się lepkość roztworu, co skutkuje wytwarzaniem włókien o większej średnicy, a nawet zablokowaniem dyszy rozwłókniającej.

4. Odległość dyszy od kolektora – wpływa ona na porowatość otrzymywanej włókniny (im większa odległość robocza, tym większa porowatość). Im większa odległość tym rozpuszczalnik ma więcej czasu na odparowanie i dzięki temu powstające włókna nie plączą się ze sobą. Należy pamiętać, by oddalając kolektor od dyszy zwiększyć jego powierzchnię, z uwagi na trudności w odbiorze powstających włókien. Włókna otrzymywane przy większych odległościach roboczych mają zwykle szerszy rozkład średnic. Im mniejsza odległość robocza tym mniej czasu na odparowanie rozpuszczalnika i stąd pojawienie się licznych defektów w otrzymywanym materiale.

4.3.4.2. Metodyka i aparatura badawcza

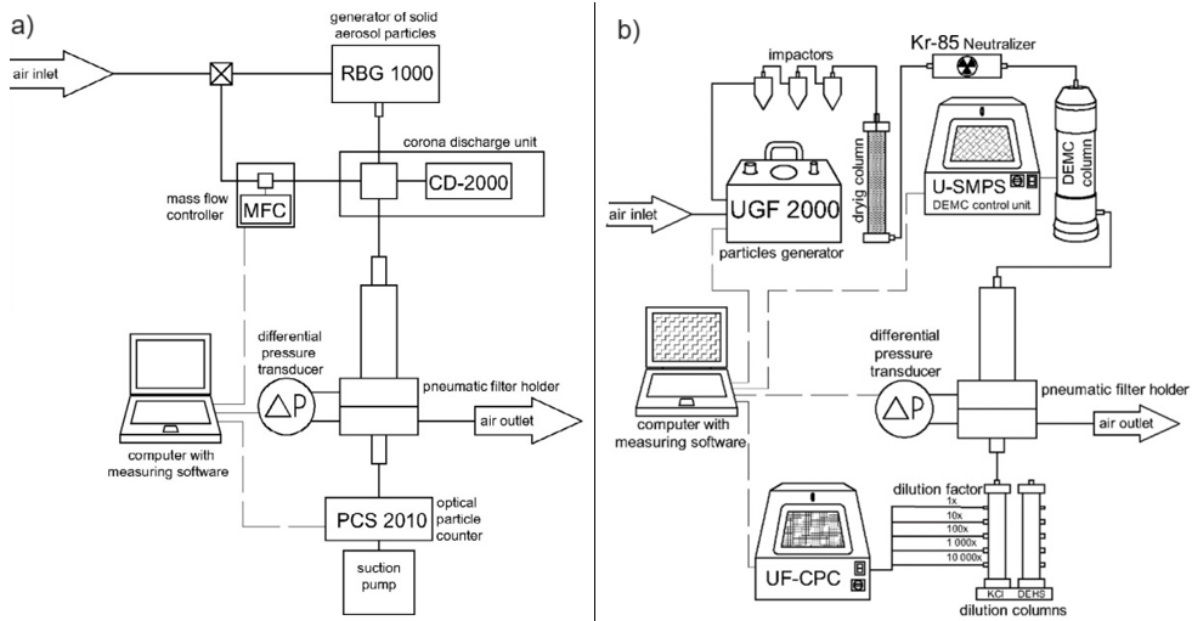
Do analizy zachowania cząstek w różnych strukturach filtracyjnych w czasie ich pracy posłużyły zarówno metody eksperymentalne, jak i modelowanie matematyczne, które pozwoliło na rozszerzenie rozważań na inne przypadki, czy też na szerszy zakres parametrów. Bardzo istotnym elementem moich prac był pomiar, którego zakres był determinowany możliwościami aparatury badawczej. W badaniach wykorzystywałam zaawansowane stanowiska firmy Palas, która jest wiodącym producentem aparatury do generacji,

charakterystyki oraz detekcji cząstek aerozolowych. Chcąc rozszerzyć zakres badań o nanocząstki, których zarówno generowanie, jak i detekcja są bardzo trudne, we współpracy z firmą Palas, powstało zaawansowane stanowisko MFP Nano Plus. Brałam udział w testach jego prototypu i na podstawie uzyskiwanych przeze mnie wyników stanowisko było modyfikowane, aby stać się wysokiej klasy komercyjnym produktem, gwarantującym wysoką jakość badań tych trudnych obiektów. Przeprowadzone w ramach cyklu eksperymenty wykonane były na stanowiskach: Palas MFP 2000, Palas MFP NanoPlus oraz Palas HFP 2000. Po krótko przedstawię ich budowę i działanie.

Stanowisko do badania filtracji cząstek stałych – Palas MFP 2000

System do testowania filtrów Palas MFP 2000 (Palas GmbH, Niemcy) został użyty do analizy filtracji w stanie początkowym oraz niestacjonarnym. Zmiany głównych parametrów uwzględnianych podczas projektowania materiałów filtracyjnych, tj. skuteczność filtracji i spadek ciśnienia, były badane zarówno na początku procesu, kiedy filtr jest czysty, jak i w rzeczywistych warunkach pracy, podczas ciągłego obładowania materiałów cząstkami stałymi. W eksperymentach używano polidispersyjnego pyłu na bazie krzemionki o nazwie Arizona Fine Test Dust ISO 12103-1 (produkowanego przez Power Technology Incorporated, USA). Zawiera on cząstki o średnicach z zakresu od 0,26 do 16,60 μm , natomiast najliczniejszą frakcję stanowią cząstki o średnicach około 0,35-0,45 μm .

Stanowisko składało się z: tłokowo-szczotkowego generatora cząstek stałych (RBG 1000), pneumatycznego uchwytu, gdzie umieszczano badany filtr, optycznego licznika cząstek (PCS 2010), neutralizatora ładunku (CD 2000) oraz pompy próżniowej pobierającej stałe próbki aerozolu do analizy (ASP 2000) (Rys. 4a). Czyste powietrze było zasysane do naczynia ciśnieniowego, gdzie było oczyszczane, a następnie dzielone na dwa strumienie: jeden kierowany do generatora aerozolu, a drugi do kontrolera przepływu masowego. Do jednorodnego rozpraszania cząstek pyłu w strumieniu powietrza używano generatora z obrotową szczotką. Cząstki aerozolu, które naelektryzowały się podczas przechodzenia przez szczotki generatora, tłok i przewody łączące urządzenia, były rozładowywane poprzez mieszanie strumienia aerozolu z bipolarnie zjonizowanym gazem. Zneutralizowany aerosol był następnie wprowadzany do kolumny wyposażonej w pneumatyczny uchwyt z testowanym materiałem. Uchwyt ten miał przekrój o kształcie koła o średnicy 14 cm, więc powierzchnia testowa wynosiła około 150 cm^2 . Spadek ciśnienia na filtrze był stale mierzony cyfrowym manometrem różnicowym. Liczba i rozmiar cząstek były mierzone za pomocą optycznego licznika, do którego równe próbki aerozolu były zasysane przez pompę.



Rys. 4. Stanowiska do testowania płaskich materiałów filtracyjnych:
(a) Palas MFP 2000 oraz (b) Palas MFP Nano Plus

Modułowe stanowisko do badania filtracji cząstek stałych – Palas MFP Nano Plus

To stanowisko pomiarowe powstało przy mojej współpracy z firmą Palas. Zależało mi na modułowym stanowisku, które umożliwiłoby pomiary dla szerokiego spektrum średnic cząstek stałych i ciekłych, od nanometrycznych do submikronowych (o średnicach mniejszych od 1 μm). Trudno jest to osiągnąć w jednym aparacie, dlatego też stanowisko zostało wyposażone w trzy generatory cząstek oraz dwa liczniki, które w miarę potrzeb można było przełączać zgodnie z zadanym celem pomiaru. W trakcie pierwszych testów stanowisko zostało zmodyfikowane z powodu niezadowalających wyników, które uzyskałam. Problemem było generowanie cząstek o zbyt dużych rozmiarach (wymagane były cząstki nanometryczne) oraz zbyt wysokiej wilgotności, co prowadziło do powstawania aglomeratów oraz ich zalegania w przewodach doprowadzających. Aby rozwiązać ten problem za generatorem podłączono zestaw trzech impaktorów oraz kolumnę suszącą wypełnioną żelazem krzemionkowym. Tak zmodyfikowany zestaw aparatów zagwarantował uzyskiwanie wiarygodnych i powtarzalnych wyników pomiarów.

Stanowisko MFP Nano (Rys. 4b) było zasilane sprężonym powietrzem, które było oczyszczane na filtrze absolutnym, a następnie kierowane do generatora cząstek UGF 2000, który może wytwarzać ciekłe lub stałe nanocząstki z roztworów wodnych. Składa się on z dyszy binarnej do regulacji przepływu, zintegrowanej pompy strumieniowej i cyklonowego separatora do oddzielania dużych cząstek. Następnie strumień wygenerowanego aerozolu przepływał przez zestaw trzech kaskadowych impaktorów, gdzie usuwane były cząstki o średnicach większych niż submikronowe, a strumień następnie kierowany był do kolumny suszącej (w przypadku cząstek stałych). Dla nanocząstek ciekłych strumień aerozolu kierowany

był bezpośrednio do neutralizatora aerozolu Kr-85. Aby zmierzyć liczbę i rozmiar nanocząstek, zastosowano dwustopniowy system o nazwie U-SMPS. Do określania rozmiaru cząstek używano klasyfikatora różnicowej mobilności elektrycznej (DEMC). Działa on na zasadzie oddziaływania pomiędzy naładowanymi cząstkami a polem elektrycznym. Cząstki przechodziły przez pole elektryczne, które oddziaływały z ich ładunkiem elektrycznym, powodując ich przemieszczenie. Mobilność elektryczna cząstki jest proporcjonalna do jej ładunku i odwrotnie proporcjonalna do jej średnicy. Cząstki wypływające z kolumny DEMC były liczone za pomocą kondensacyjnego licznika cząstek (UF-CPC). Jednostka sterująca DEMC i licznik CPC były ze sobą połączone. Po etapie klasyfikacji aerozol był kierowany na materiał filtracyjny o powierzchni ok. 150 cm² umieszczony w pneumatycznym uchwycie. Próbką oczyszczonego strumienia powietrza była pobierana za filtrem. Następnie, po przejściu przez kolumny rozcieńczające o różnych współczynnikach rozcieńczenia (10; 100; 1 000; 10 000), próbka była kierowana do kondensacyjnego licznika cząstek UF-CPC. W saturatorze, który jest pierwszym odcinkiem licznika UF-CPC, strumień aerozolu przepływa przez pary butanolu, które kondensują na powierzchni stałych cząstek kierowanych do sekcji o niższej temperaturze. Służy to zwiększeniu rozmiaru cząstek, co zapewnia wyższą precyzję pomiaru ich średnic za pomocą detektora optycznego.

Podczas pomiarów dla cząstek submikronowych w miejsce generatora nanocząstek UGF podłączony był generator AGK (generator cząstek stałych) lub PLG (generator kropli) oraz optyczny licznik cząstek Welas 1200 zamiast jednostki U-SMPS. Cząstkami generowanymi na tym stanowisku były krople oleju DEHS (di-etyloheksylosebacynowego) oraz cząstki stałe chlorku potasu.

Stanowisko do badania filtracji aerozoli mieszanych – Palas HFP 2000

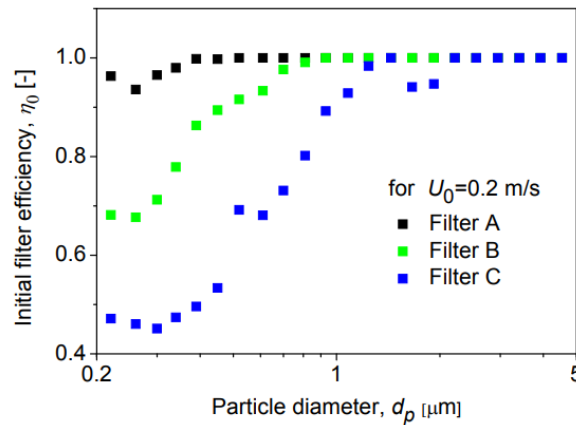
Stanowisko to bazuje na systemie Palas HFP 2000. Głównym jego elementem był poziomy kanał z uchwytem, w którym umieszczony był badany filtr. Początkowo system ten został zaprojektowany do badania filtracji aerozolu ciekłego, dlatego zawiera generator kropli PLG 2000. Na potrzeby badań filtracji aerozoli mieszanych został zmodyfikowany poprzez dołączenie generatora cząstek stałych RBG 1000, aby umożliwić kolejne obładowania filtra kroplami (olej DEHS) i cząstkami stałymi (Arizona Fine Test Dust). Koncentrację cząstek przed i za filtrem mierzono spektrometrem Welas 1200.

4.3.5. Omówienie najważniejszych wyników wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

4.3.5.1. Określenie wpływu struktury warstwy filtracyjnej na zachowanie cząstki

Niejednorodność materiału filtracyjnego

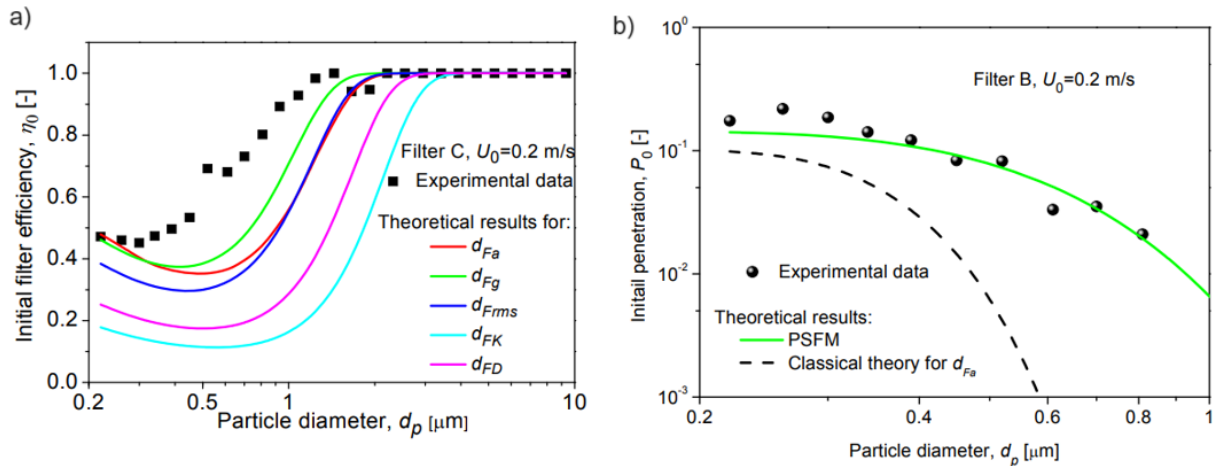
Rozważania dotyczące transportu i depozycji cząstek w różnych strukturach włókninowych rozpoczęłam od zbadania wpływu średnicy włókna na skuteczność filtracji cząstek stałych i opory przepływu na filtrze w początkowym etapie procesu. Uzyskane wyniki przedstawiłam w publikacji **H14**. Przebrałam trzy włókninowe filtry (Filtr A, Filtr B, Filtr C) wykonane z polipropylenu techniką melt-blown. Różniły się one średnią średnicą włókien – Filtr A miał najcieńsze włókna (ok. 4 μm), Filtr C najgrubsze (ok. 28 μm), zaś Filtr B (ok. 8 μm). Uzyskałam następujące wyniki zamieszczone na rys. 5.



Rys. 5. Początkowa skuteczność filtracji zmierzona eksperymentalnie dla trzech testowanych filtrów

Najwyższa sprawność filtracji została osiągnięta dla filtra o najcieńszych włóknach (Filtr A). Na rys. 5 widać też wspomniane wcześniej minimum sprawności depozycji dla cząstek o średnicy ok. 0,3 μm (MPPS). Wyjaśnienie jego występowania jest następujące - cząstki o tej średnicy są zbyt duże by podlegały ruchom Browna (mechanizm dyfuzyjny), jednocześnie zbyt małe, by mogły być efektywnie wychwytywane za pomocą mechanizmu bezwładnościowego, czy też bezpośredniego zaczepienia.

Skuteczność działania filtrów włókninowych silnie zależy od ich niejednorodnej struktury, tj. splątania włókien o różnych rozmiarach, które z kolei tworzą niejednorodne pole lokalnej prędkości gazu i lokalnego stężenia cząstek w danym przekroju filtra. Ta złożona wewnętrzna geometria jest trudna do odwzorowania w symulacjach komputerowych. Dodatkowo, skomplikowany ruch cząstek pod wpływem przepływu gazu, stochastyczne i deterministyczne siły działające na cząstkę oraz nieustalone warunki sprawiają, że proces filtracji w filtrach włókninowych jest trudny do opisu.



Rys. 6. Porównanie danych eksperymentalnych początkowej sprawności filtracji (a) z klasyczną teorią w połączeniu z dowolną średnią średnicą włókna oraz (b) z modelem przepływu częściowo segregowalnego PSFM

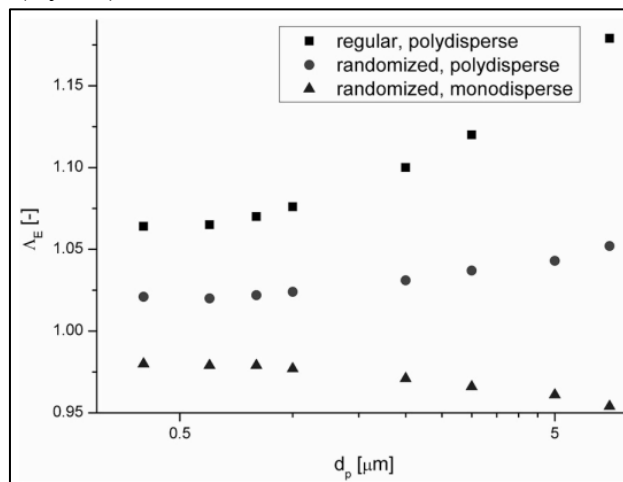
Ażeby to uwidocznic, uzyskane wyniki porównalam z dominującym w literaturze klasycznym podejściem (Rys. 6a) oraz zaproponowanym przeze mnie zaawansowanym modelem przepływu częściowo segregowalnego PSFM (partially segregated flow model) (Rys. 6b). Model ten, w odróżnieniu od klasycznej teorii, uwzględnia rzeczywisty rozkład średnic włókien w filtrze, który, zgodnie z moimi wieloletnimi badaniami, można przybliżyć rozkładem logarytmiczno-normalnym.

Okazało się, że przy użyciu klasycznej metody w połączeniu z dowolną średnią średnicą włókna niemożliwe jest poprawne przewidywanie skuteczności filtracji dla rzeczywistych filtrów włókninowych o wysokim stopniu polidispersyjności średnic włókien. Dlatego klasyczna teoria pojedynczego włókna, opracowana dla jednorodnych struktur filtrujących, nie może być łatwo rozszerzona poprzez wprowadzenie tylko jednej zastępczej średniej średnicy włókna w przypadku niejednorodnych, polidispersyjnych filtrów. Nowy zaproponowany przeze mnie model matematyczny PSFM jest teoretycznie uzasadniony i uwzględnia cały rozkład rozmiarów włókien. Udało się uzyskać bardzo dobre dopasowanie między eksperymentalnymi wartościami penetracji cząstek aerozolu o rozmiarach submikrometrowych i mikrometrowych, a tymi obliczonymi przy użyciu PSFM. Uzyskane wyniki sugerują, że wpływ niejednorodności filtra związanej z polidispersyjnym rozkładem średnic włókien musi być brany pod uwagę w celu poprawnego określenia skuteczności filtracji, która jest związana z ruchem cząstek w strukturze.

W następnym kroku, w ramach publikacji **H2**, spróbowano tak zamodelować włókninowy materiał filtracyjny, aby odwzorować jego rzeczywistą strukturę. Położono nacisk na mezoskalową niejednorodność tj. uwzględnienie wpływu sąsiadujących ze sobą włókien na ruch cząstek aerozolowych. Zaproponowano cztery różne struktury różniące się względem siebie ułożeniem włókien (struktura regularna i nieregularna) oraz ich rozkładem średnic (monodispersyjny i polidispersyjny logarytmiczno-normalny). Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano, że:

- dla polidispersyjnego rozkładu średnic włókien uzyskano wyższe sprawności filtracji, w porównaniu do rozkładu monodispersyjnego, co jest efektem udziału cienkich włókien w polidispersyjnej strukturze filtracyjnej, a które nie występują w uśrednionej wartości średnic dla rozkładu monodispersyjnego;
- dla nieregularnej struktury otrzymano niższe wartości sprawności filtracji, w porównaniu ze strukturą regularną, co można tłumaczyć występowaniem efektu przesłaniania włókien przez inne znajdujące się w obszarach o niższej porowatości oraz zjawiska tunelowania przepływu przez obszary o wyższej lokalnej porowatości.

Ponadto, w pracy policzono wartości współczynników niehomogeniczności dla spadków ciśnienia, Λ_p , i dla sprawności, Λ_E , zdefiniowane poprzez stosunki odpowiednich wartości spadków ciśnienia i sprawności wyznaczone dla rzeczywistych struktur i dla struktur jednorodnych. Okazały się one być zależne od średnicy cząstki, co jest bardzo ważnym i użytecznym wynikiem (Rys. 7).



Rys. 7. Współczynnik niehomogeniczności dla sprawności dla filtra o średniej średnicy włókna 5 μm

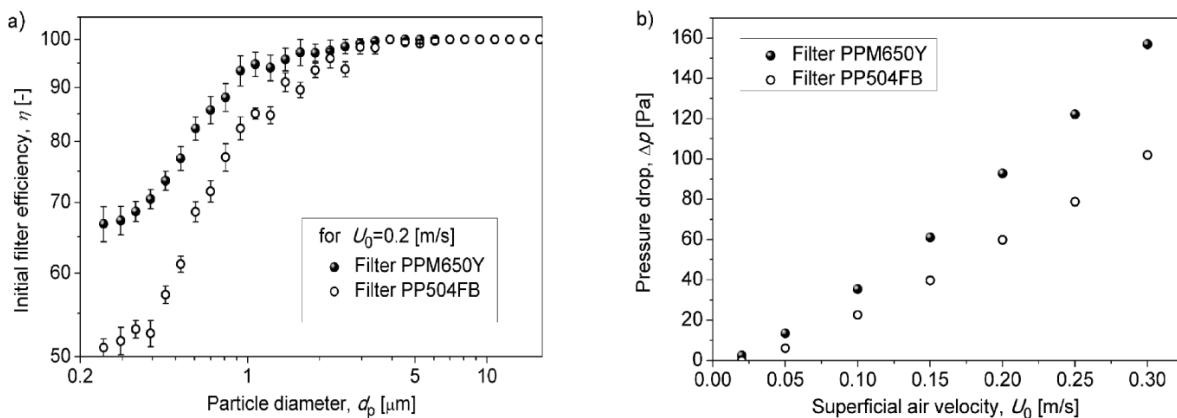
Wartość współczynnika niehomogeniczności dla sprawności rośnie ze wzrostem średnicy cząstki dla struktur posiadających w swej strukturze włókna o różnych średnicach (rozkład polidispersyjny). Jest to najprawdopodobniej spowodowane obecnością cienkich włókien w strukturze, które, jak już wcześniej zostało wykazane, mają wyższą sprawność filtracji niż włókna grube. Natomiast zależność współczynnika niehomogeniczności dla sprawności dla struktur o włóknach jednakowych (rozkład monodispersyjny) ma odwrotny charakter, tzn. odnotowuje się spadek jego wartości ze wzrostem średnicy cząstki. Tutaj zjawisko preferencyjnego przepływu cząstek, zwłaszcza większych, przez obszary o większej porowatości jest znaczące.

Nanowłókna

W kolejnym kroku, mając na uwadze wyniki z artykułu H14, gdzie pokazałam, że im mniejsza średnica włókna tym większa jego sprawność, zdecydowałam się zejść do reżimu nano. W zagadnieniach filtracji średnica włókien, określanych jako nanowłókna, związana jest

z efektem zmiany charakteru przepływu gazu wokół włókna spowodowanej efektem Knudsen (przepływ z poślizgiem lub molekularny). Projektując filtr zależy nam na przesunięciu wspomnianego minimum sprawności (dla cząstek MPPS) w stronę cząstek mniejszych. Można to zrealizować np. poprzez zastosowanie nanowłókien w filtrze. Inkorporowanie ich do struktury filtracyjnej może znacznie podnieść jej sprawność. Wykorzystując opisaną technologię polegającą na topieniu polimeru i jego rozdmuchu w strumieniu gorącego powietrza, wprowadzając modyfikacje do klasycznej techniki melt-blown, spróbowałam otrzymać media o dużym udziale nanowłókien. Ponadto, sprawdziłam jaki wpływ na uzyskiwane średnice włókien ma użyty do ich produkcji polimer. Następnie, zidentyfikowałam rolę, jaką odgrywają nanowłókna podczas procesu separacji aerozolu. Wszystko to opisałam w publikacji **H11**. Przedstawione w niej wyniki były częścią grantu sfinansowanego przez amerykańską firmę Cummins Filtration Ltd (USA), światowego producenta filtrów.

Próba zmniejszenia średnicy włókna przy zastosowaniu do produkcji włókien nowego polimeru, o wyższym indeksie płynięcia MFI, okazała się udana. Ponadto, zmieniono tylko jeden parametr podczas produkcji, tj. ciśnienie polimeru w dyszy rozwłókniającej. Do tej pory stosowano polipropylen o nazwie handlowej Borealis PP504FB (MFI = 1200). Jak się okazało, Metocen PPM650Y o wyższym MFI, równym 1800, daje możliwość uzyskania filtra o wyższym udziale włókien mniejszych niż 1 μm , co znacznie poprawia jego skuteczność (Rys. 8a).



Rys. 8. Początkowe parametry charakteryzujące filtry dla dwóch różnych polimerów:
(a) początkowa sprawność filtracji oraz (b) spadek ciśnienia

Przy powierzchni nanowłókien gradienty prędkości są znacznie wyższe, aniżeli w przypadku włókien grubszych (efekt krzywizny), co powoduje wzrost depozycji cząstek na nanowłóknach. Stają się one silnym atraktorem dla cząstek.

Obserwowany na rys. 8b wzrost spadku ciśnienia dla filtra z cienkimi filamentami w porównaniu do spadku ciśnienia dla filtra utworzonego z grubszych włókien nie jest znaczący. Przyczyny tego zjawiska mogą być dwie: niejednorodność porów w przestrzeni filtra (co zostało już potwierdzone w ramach przedłożonego cyklu) i/lub przepływ z poślizgiem (slip flow). Ten ostatni redukuje siłę oporu oddziaływania między cząstkami gazu, a powierzchnią włókna. Efekt ten wzrasta wraz ze wzrostem liczby Knudsen, zdefiniowanej jako stosunek średniej drogi swobodnej molekuł gazu ($\lambda = 0,065$ μm dla powietrza w temperaturze 25°C) i średnicy włókna, d_F :

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_F} \quad (3)$$

Tak jak wpływ niejednorodności struktury na spadek ciśnienia na filtrze jest stosunkowo łatwy do zbadania, tak eksperymentalne potwierdzenie obecności efektu poślizgu (slip effect) jest już skomplikowane. W pracy Bao et al. (2016) zaproponowano pomiary spadku ciśnienia na filtrze z nanowłókien w warunkach obniżonego ciśnienia otoczenia, które potwierdziły występowanie efektu przepływu z poślizgiem.

Zjawiska przepływu z poślizgiem, związane z inkorporowaniem nanowłókien do struktury filtracyjnej, budzą duże zainteresowanie w filtracji aerozoli, ze względu na możliwość tworzenia materiałów o dużym wskaźniku jakości QF , tj. niskim spadku ciśnienia i wysokiej skuteczności separacji. Jest to nowy kierunek w opracowaniu skutecznych materiałów filtracyjnych, szeroko cytowany w literaturze przedmiotu. Takie wysokowydajne filtry, które pozwoliłyby na oszczędność energii, mogą znaleźć zastosowanie w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Ponadto, mogą zostać użyte do konstrukcji materiałów służących do ochrony układu oddechowego.

Przemieszczenie depozytów

Mając wiedzę na temat zachowania się cząstek w pojedynczych strukturach na początku procesu, postanowiłam sprawdzić, co dzieje się z cząstką w strukturze filtracyjnej wraz z upływem czasu filtracji. Pytania, które zadałam sobie na tym etapie badań były następujące: (i) czy cząstki już zdeponowane na włóknie już na nim pozostają?, (ii) czy może odrywają się od włókna i przemieszczają w inne rejony filtra? (resuspensja, z ang. re-entrainment), (iii) czy po oderwaniu deponują się w innych miejscach, czy może opuszczają filtr? W literaturze przedmiotu przeważają badania analizujące tylko stan początkowy filtracji, tzn. dla czystego filtra, co nie daje możliwości przewidywania jego zachowania się w realnych warunkach, podczas obładowywania go cząstkami. Ponadto, w większości teorii przyjęto założenie, że każdy kontakt cząstki z cząstką, czy też cząstki z kolektorem (tutaj włóknem), jest efektywny tzn. prowadzi do trwałego jej wydzielenia ze strumienia gazu. W warunkach rzeczywistych jest jednak inaczej, dlatego to założenie jest zbyt daleko idącym uproszczeniem. Jeśli chodzi o stan nieustalony można znaleźć prace eksperymentalne i teoretyczne opisujące filtrację, ale tylko na pojedynczym włóknie (Kasper et al., 2009) oraz zjawisko resuspensji z pojedynczego włókna (Przekop et al., 2003). Jednakże takie podejście nie opisuje zachowania filtra jako całości. Złożona wewnętrzna struktura geometryczna takiego materiału jest niezwykle trudna do zrekonstruowania w symulacjach komputerowych. To co dzieje się wewnątrz filtra podczas procesu pozostaje niewyjaśnione. Urządzenia do detekcji cząstek również pozwalają jedynie na określenie liczby i rozmiaru cząstek przed i za materiałem filtracyjnym. Dlatego poszukiwane są różne narzędzia do przeprowadzenia badań zjawisk zachodzących podczas filtracji wgłębnej. Z uwagi na niejednorodną strukturę filtra i splecione, blisko siebie położone włókna umieszczenie kamery byłoby bardzo trudne. Ponadto, obserwując co dzieje się wewnątrz filtra trudno rozróżnić, które cząstki to te świeżo napływające na filtr, a które zmieniły swoje położenie w trakcie trwania procesu.

Biorąc pod uwagę wymienione trudności, w pracy **H8** zaproponowałam zasymulowanie procesu filtracji nieustalanej w czasie, mając na celu sprawdzenie czy cząstki już osadzone w strukturze filtra pozostają na swoim miejscu, czy w trakcie procesu zmieniają swoje położenie. Porowatość filtra zmienia się wraz z czasem trwania procesu filtracji, gdy cząstki wypełniają wolne przestrzenie pomiędzy włóknami. W początkowej fazie procesu, porowatość jest związana jedynie z obecnością włókien, a w miarę upływu czasu zależy również od ilości i rozmieszczenia depozytów. Z czasem lokalna porowatość filtra maleje, a naprężenia ścinające wzrastają, co powoduje większe lokalne prędkości przepływu aerozolu przez materiał. Z uwagi na to, do badań użyłam czystego powietrza (w celu zachowania bilansu masy cząstek w filtrze) o różnych prędkościach przepływu. Otrzymywane na różnych etapach eksperymentu próbki zdecydowałam się przeanalizować wykorzystując do tego celu mikrotomograf komputerowy CT, który pozwolił na uzyskanie modeli trójwymiarowych obciążonych struktur. Mimo, że technika ta była pierwotnie przeznaczona do zastosowań medycznych, dzięki jej znaczącemu potencjałowi naukowemu, znalazła szeroki zakres zastosowań w różnych dziedzinach nauki. Było to pionierskie rozwiązanie, które pozwoliło pójść dalej w zrozumieniu przebiegu procesu filtracji nieustalanej.

Badania przeprowadzone w ramach publikacji **H8** składały się z czterech etapów:

1. Wytworzenie dwóch różnych materiałów włókninowych.

Do produkcji filtrów wykorzystano opisaną wcześniej metodę rozdmuchu stopionego polipropylenu, która pozwala na wyprodukowanie filtrów o założonych parametrach strukturalnych, tj. średnicy włókien, porowatości oraz grubości. Wytworzone filtry różniły się średnicą włókien, by pokazać jaki wpływ ma ona na zachowanie depozytów w strukturze filtracyjnej. Filtr złożony z włókien z zakresu mikrometrycznego został nazwany F10, natomiast drugi, którego średnice włókien były submikronowe i nanometryczne oznaczono jako Fn.

2. Obciążenie filtrów cząstkami stałymi w identycznych warunkach.

Cztery próbki każdego z dwóch typów filtrów zostały obciążone cząstkami krzemionki (Arizona Fine Test Dust) w identycznych warunkach, tj. identyczna prędkość przepływu aerozolu wynosząca 0,2 m/s oraz identyczne stężenie cząstek wynoszące 135 mg/m³. Pomiarzy zostały przeprowadzone do osiągnięcia trzykrotnego początkowego spadku ciśnienia na filtrze. Każda z próbek testowych została zważona przed i po obciążeniu cząstkami krzemionkowymi. Do badań wykorzystano aparaturę Palas MFP 2000.

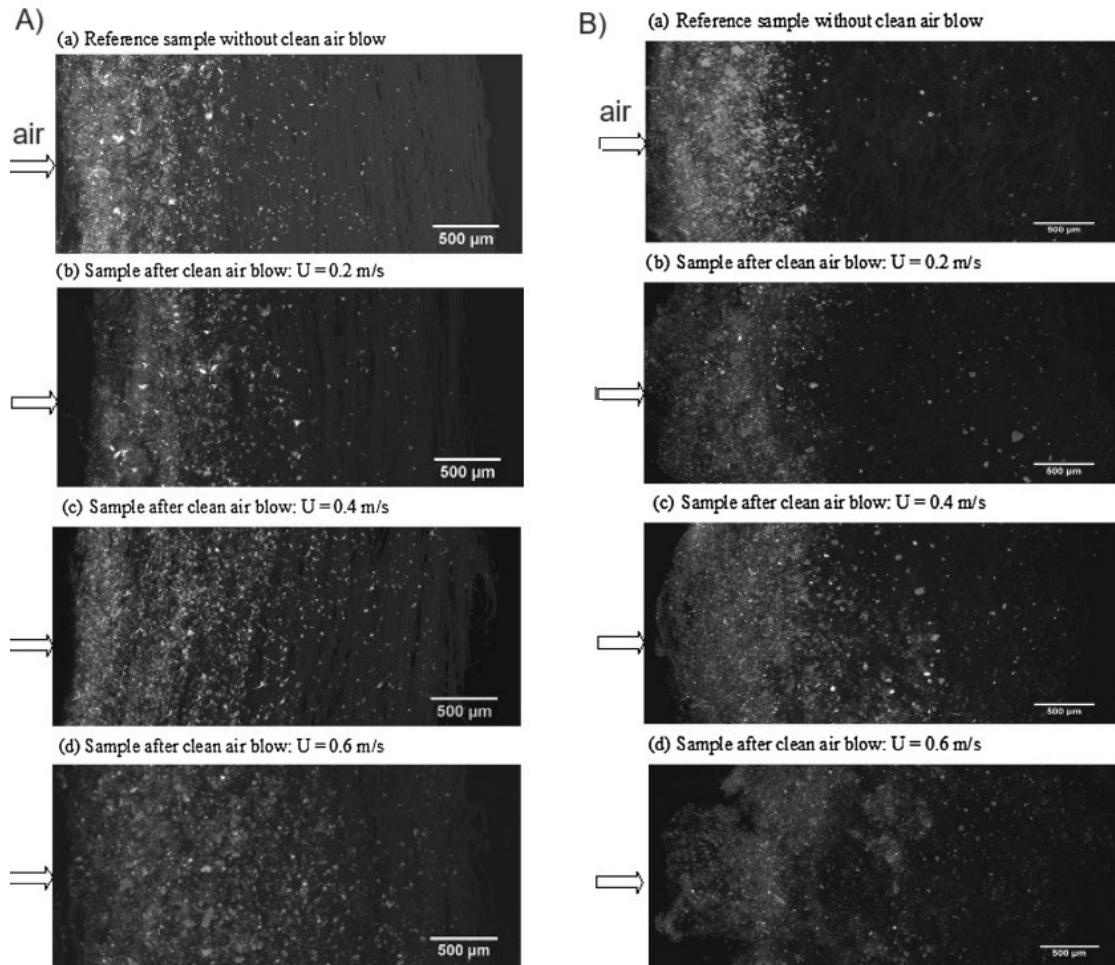
3. Symulacja procesu filtracji.

Zasymulowanie procesu filtracji polegało na przepuszczeniu strumienia czystego powietrza o różnych prędkościach przepływu przez materiał filtracyjny uprzednio obciążony cząstkami. Zastosowałam trzy prędkości przepływu powietrza: 0,2 m/s (taka sama jak prędkość przepływu aerozolu podczas obciążania filtra cząstkami), 0,4 m/s (dwukrotnie wyższa wartość) i 0,6 m/s (trzykrotnie wyższa wartość). Jedna obciążona cząstkami próbka służyła jako próbka referencyjna (oznaczona jako Próbką 1). Przez próbki 2, 3 i 4 został przepuszczony strumień powietrza o prędkościach odpowiednio 0,2 m/s, 0,4 m/s i 0,6 m/s. Gdy filtr obciążuje się

cząstkami, jego przekrój poprzeczny (udział pustej przestrzeni) się zmienia. Dlatego na każdym kolejnym etapie procesu lokalna prędkość przepływu aerozolu jest wyższa. Wyjaśnia to fakt, dlatego w swoich pomiarach zastosowałam trzy coraz wyższe prędkości przepływu powietrza. Należy też podkreślić, że zjawisko kompresji lub dekompresji filtra nie miało miejsca w zastosowanych warunkach procesowych. Jest ono głównie spowodowane różnicą ciśnienia na wlocie i wylocie filtra, która podczas obładowania cząstkami filtra F10 zmieniała się z około 50 Pa do 150 Pa, a w przypadku filtra Fn z około 45 Pa do 210 Pa. W takich warunkach filtr działa jak sztywny materiał, co jest spowodowane siłami adhezyjnymi włókien w punktach ich styku (tzw. mostki) w strukturze filtra.

Przed kolejnym krokiem, tj. analizą próbek za pomocą tomografii komputerowej, należało jeszcze sprawdzić czy bilans masowy cząstek podczas przedmuchu został zachowany, to znaczy czy część cząstek nie wydostała się poza strukturę filtracyjną. W tym celu zważyłam próbki po obładowaniu, a także po przepuszczeniu przez nie strumienia czystego powietrza. Okazało się, że masa próbek pozostała niezmienna. Ponadto, włączyłam optyczny licznik cząstek podczas procesu przedmuchiwanie czystym powietrzem co potwierdziło, że żadne cząstki nie odłączyły się od struktury filtracyjnej. Oznacza to, że cząstki zatrzymane w filtrze nie opuściły go podczas badania. W kolejnym kroku należało sprawdzić czy pozostały one w swoich pierwotnych lokalizacjach czy może pod wpływem przedmuchu przemieściły się wewnątrz struktury filtracyjnej. Aby przeanalizować rozkład cząstek krzemionki w filtrze na różnych etapach procesu separacji, zastosowano tomografię komputerową z użyciem promieniowania rentgenowskiego.

4. Analiza filtrów z osadzonymi cząstkami przy użyciu tomografii komputerowej CT. Wszystkie próbki obładowane cząstkami zostały przeanalizowane przy użyciu systemu ZEISS Xradia MicroXCT-400 w celu zbadania rozkładu depozytów wewnątrz próbek. System składa się z trzech komponentów: źródła promieniowania rentgenowskiego o odpowiedniej płamce ogniskowej i energii, detektora konwertującego fotony rentgenowskie na sygnały elektryczne oraz obrotowego uchwytu na próbki. Kluczową zasadą działania używanego w teście systemu są różne współczynniki absorpcji promieniowania rentgenowskiego przez różne substancje. Podczas skanowania promieniami rentgenowskimi próbka jest obracana o wymagane kąty. Na każdym obrocie tworzone są dwuwymiarowe projekcje obiektów. Następnie na podstawie skanów dokonuje się rekonstrukcji struktury próbek. Ze względu na wyższe tłumienie promieni X przez cząstki krzemionki w porównaniu do włókien polipropylenowych, depozyty krzemionkowe są widoczne jako jaśniejsze piksele w strukturze filtra (Rys. 9).



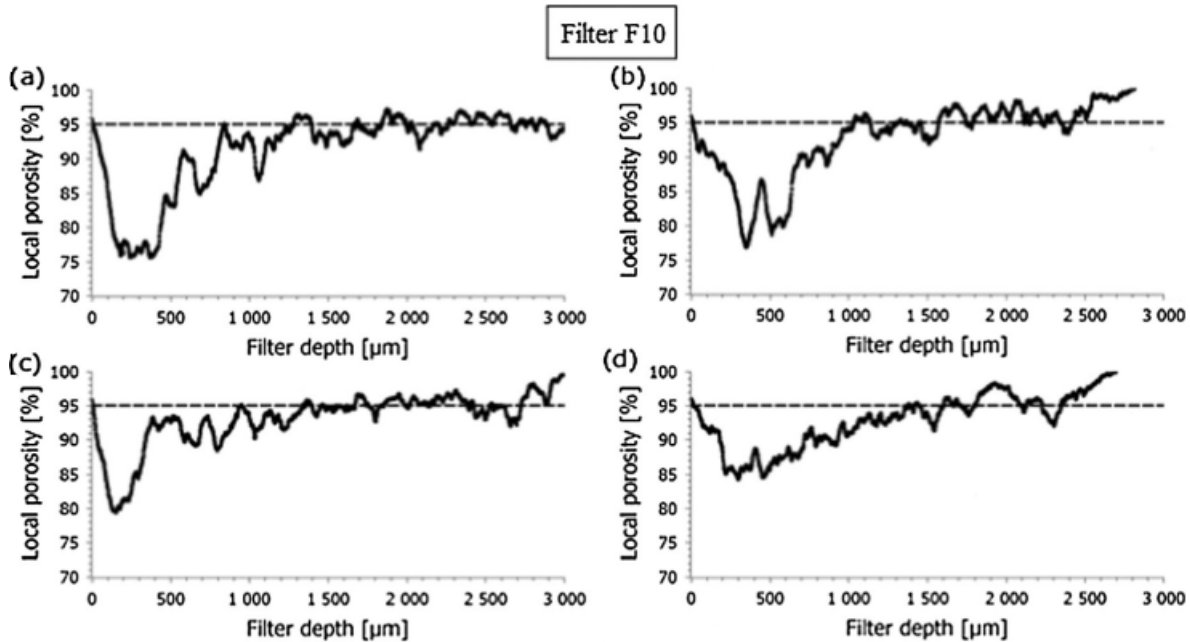
Rys. 9. Obrazy z CT próbki filtra F10 (A) oraz filtra nano (B) po przedmuchianiu czystym powietrzem przepływającym z różnymi prędkościami

Na podstawie wizualnej analizy obrazów CT można stwierdzić, że w próbce referencyjnej filtra F10, która nie była poddawana działaniu strumienia czystego powietrza, duża liczba osadzonych cząstek znajdowała się w przedniej części filtra (Rys. 9a). W pozostałych próbkach można było zaobserwować rozproszenie pyłu w objętości materiału. Widać, że zwiększenie przepływu czystego powietrza spowodowało większą dyspersję cząstek krzemionki w strukturze próbki. Wskazuje to na ruch cząstek w materiale podczas filtracji nieustalonej. Raz osadzone cząstki w strukturze mikrowłókien przemieszczają się, umożliwiając osadzanie nowo napływających cząstek, co zwiększa zdolność zatrzymywania pyłu przez filtr oraz jego żywotność (filtracja wgłębna).

W filtrze Fn depozycja zachodzi głównie w czołowej warstwie materiału (filtracja plackowa) (Rys. 9b), a podczas przedmuchu strumieniem czystego powietrza cząstki nie przemieszczają się tak głęboko, jak to miało miejsce w filtrze wykonanym z grubszych włókien, F10. Wyjaśniałoby to szybki wzrost spadku ciśnienia w trakcie procesu filtracji w filtrze o cieńszych włóknach z uwagi na zatykanie przednich warstw filtra. W przypadku nanofiltru depozyty znajdują się w tworzą zwartą strukturę, więc ich przemieszczanie w strukturze filtracyjnej jest mniejsze. W filtrze F10 natomiast depozyty tworzą bardziej otwartą, porowatą

strukturę, bardziej podatną na wpływ strumienia gazu, a co za tym idzie na przemieszczenie wewnątrz struktury.

Na podstawie modeli 3D, które otrzymano z CT jako zbiór obrazów bitmapowych, wyznaczono rozkłady porowatości wzdłuż kierunku przepływu aerozolu (Rys. 10), które potwierdziły wcześniejsze obserwacje.



Rys. 10. Profile porowatości dla filtra F10 wzdłuż kierunku przepływu aerozolu:
(a) próbka odniesienia i próbki po przedmuchu czystym powietrzem o prędkości przepływu
(b) 0,2 m/s, (c) 0,4 m/s, i (d) 0,6 m/s

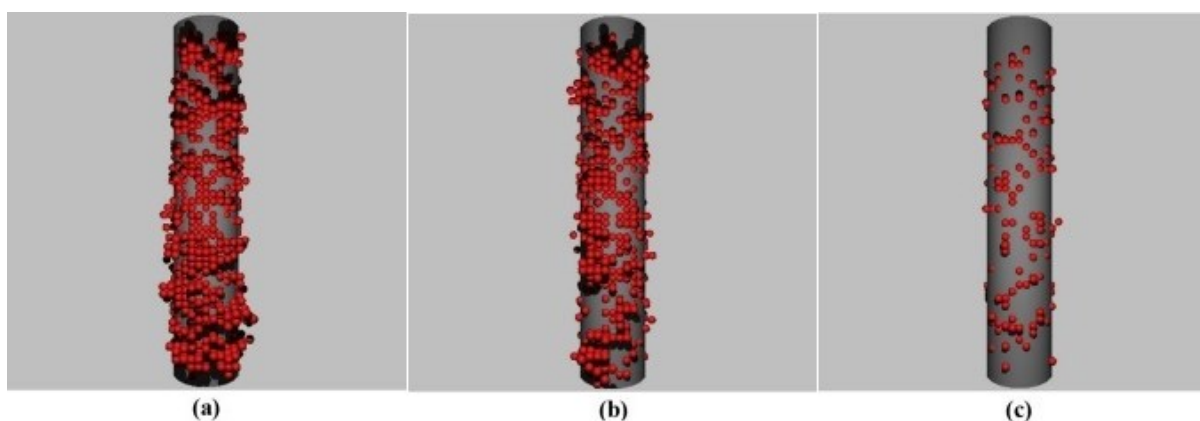
Adhezja cząstek

Zjawisko wtórnego porywania cząstek uprzednio osadzonych, które jak udowodniono w pracy H8 wpływa na efektywność filtrów włókninowych, jest silnie związane z siłą adhezji. Z siłą tą jest związane również zjawisko odbicia cząstki od kolektora, tak często pomijane w większości teorii filtracji aerozoli w filtrach włókninowych. Teorie te zakładają uproszczony wariant, mówiący o tym, że cząstka jest usuwana z gazu przy każdym zderzeniu z powierzchnią kolektora, co nie jest prawdą w przypadku, gdy energia kinetyczna cząstki jest na tyle wysoka, by pokonać energię adhezji. Przegląd literatury wskazuje na to, że zjawisko adhezji cząstek zostało słabo poznane, co wynika głównie z faktu, że za oddziaływania te odpowiedzialnych jest wiele czynników, których udział w całkowitej sile przyczepności jest trudny do oszacowania. Z uwagi na istotność zjawiska adhezji w zrozumieniu i przewidywaniu procesu filtracji cząstek w filtrach włókninowych oraz na brak danych literaturowych dotyczących siły adhezji i kohezji materiałów takich jak: krzemionka (materiał cząstki), chlorek potasu (materiał cząstki) czy polipropylen (materiał włókna), zdecydowałam się na zgłębienie tego zagadnienia.

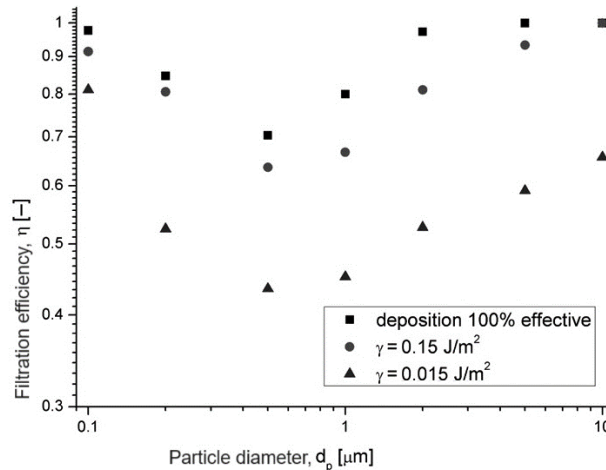
Przeprowadziłam zarówno badania teoretyczne, jak i eksperymentalne. Celem doświadczeń był pomiar sił kohezji pomiędzy cząstką a cząstką, oraz sił adhezji pomiędzy cząstką a kolektorem (włóknem). Badania przeprowadzono na nowoczesnym mikroskopie sił atomowych MFP-3D Bio AFM Asylum Research (Oxford Instruments), zintegrowanym z mikroskopem fluorescencyjnym Olympus IX-73. Koniecznym było również pionierskie opracowanie metodyki nanoszenia kryształów KCl w skali mikrometrycznej na powierzchnię sondy mikroskopu sił atomowych.

W ramach pracy **H5** zaproponowano oscylacyjny model bilansu energii odbicia i resuspensji cząstek opierający się na teorii adhezji. W badaniach do modelowania dynamiki płynów wykorzystano kombinację metody lattice-Boltzmann do symulacji przepływu fazy gazowej oraz dynamiki Brownowskiej do śledzenia trajektorii cząstek aerozolu. Obie metody połączono, aby uwzględnić interakcję między przepływem płynu a cząstkami.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, iż dla analizowanych warstw filtracyjnych wpływ pracy adhezji na sprawność filtracji maleje dla cząstek o średnicy powyżej 1 μm . W przypadku tych cząstek istotną rolę odgrywa geometryczny mechanizm osadzania związany ze stosunkiem wielkości cząstek do odległości pomiędzy sąsiednimi włóknami (wielkość porów). Dla niskich wartości pracy adhezji cząstki tworzą „monowarstwę” na powierzchni kolektora, zaś zderzenia pomiędzy cząstką zawieszoną w gazie i cząstką zdeponowaną są nieefektywne, tzn. nie prowadzą do depozycji. Cząstki o niskich wartościach pracy adhezji są również bardziej podatne na reemisję do strumienia płynu. Dla wyższych wartości pracy adhezji obserwuje się wzrost dendrytów. Wyniki te są jakościowo zgodne z wynikami uzyskanymi przeze mnie w pracy H8. 1 przedstawiono na rys. 11, zaś porównanie sprawności frakcyjnej dla wspomnianych przypadków na rys. 12.



Rys. 11. Wyniki modelowe uzyskane dla różnych wartości pracy adhezji: (a) depozycja ze 100% prawdopodobieństwem, (b) praca adhezji $0,15 \text{ J/m}^2$ oraz (c) praca adhezji $0,015 \text{ J/m}^2$



Rys. 12. Porównanie początkowej sprawności filtracji dla trzech analizowanych przypadków: depozycja ze 100% prawdopodobieństwem, praca adhezji $0,15 \text{ J/m}^2$ oraz praca adhezji $0,015 \text{ J/m}^2$

Podsumowując, praca adhezji ma istotne implikacje w procesie filtracji węgłnej w materiałach włókninowych. Oto najważniejsze z nich:

1. Skuteczność osadzania – praca adhezji określa, jak cząstki przylegają do powierzchni włókien. Wyższe wartości pracy adhezji skutkują lepszą przyczepnością i wyższą efektywnością osadzania cząstek na włóknach. Z drugiej strony, niższe wartości pracy adhezji prowadzą do mniejszej efektywności osadzania.
2. Blokowanie filtra – działanie adhezji wpływa również na szybkość zatykania filtra. Gdy cząstki silnie przylegają do powierzchni włókien, mogą szybciej się gromadzić w zbitą warstwę i tym samym zatykać filtr, co prowadzi do większego spadku ciśnienia na filtrze.
3. Projektowanie filtra - zrozumienie konsekwencji działania sił adhezji może pomóc w projektowaniu filtrów o zoptymalizowanej wydajności. Wybierając materiały o odpowiedniej wartości pracy adhezji, można osiągnąć pożądaną skuteczność filtracji i charakterystykę spadku ciśnienia. Praca adhezji odgrywa zatem kluczową rolę w określaniu skuteczności i czasu użytkowania filtrów węgłnych.

Filtry gradientowe

Kolejnym moim pomysłem, wykorzystującym zdobytą do tej pory wiedzę na temat procesów transportowych cząstek w pojedynczych warstwach złożonych z włókien o różnych średnicach, było zaproponowanie gradientowej struktury filtracyjnej o dużej pyłochłonności, sprawności oraz powolnym wzroście oporów przepływu, co przekładałoby się na długi czas użytkowania filtra. Powstawała ona w jednym cyklu produkcyjnym, podczas którego zmieniano parametry procesowe, by uzyskać strukturę, w której średnica włókien oraz porowatość zmieniają się łagodnie. Tę koncepcję przedstawiłam w pracy **H4**. Warto podkreślić, że powstała ona w ramach projektu *LIDER III* z *NCBiR*, którego byłam kierownikiem. Zaprojektowane materiały tworzyły, wraz z membranami, zintegrowany system

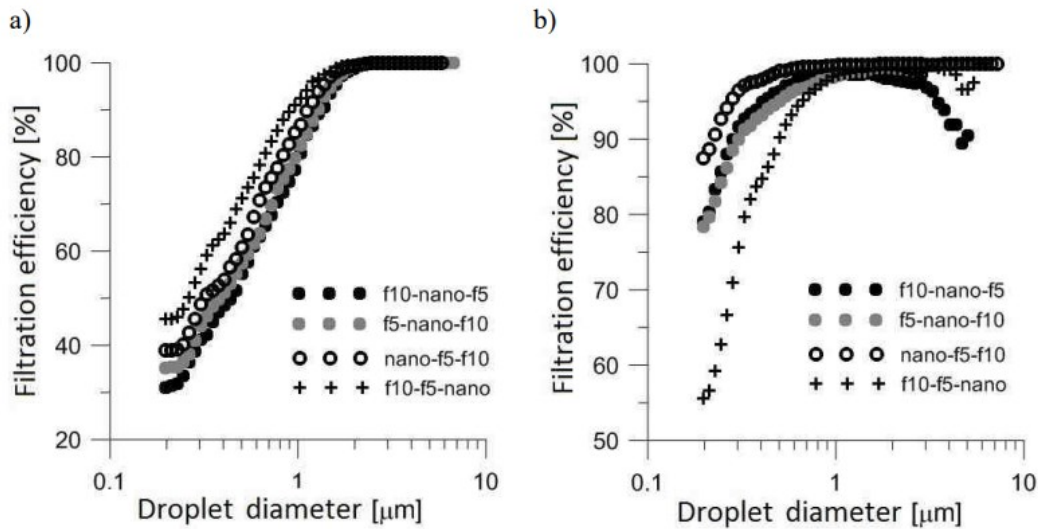
charakteryzujący się wysoce kompaktową konstrukcją, umożliwiającą instalację w stacjach kontenerowych i transport systemu pomiędzy konkretnymi punktami wydobycia gazu złożowego. Celem nowych materiałów było usunięcie cząstek stałych, wilgoci, wyższych węglowodorów i azotu z gazu. Istotą rozwiązania była eliminacja technologii odwadniania gazu z glikolem, co pozwoliło na zmniejszenie instalacji i w konsekwencji obniżyło koszty inwestycyjne, umożliwiło dokładniejsze oczyszczanie gazu. Zastosowanie z powodzeniem filtrów włókninowych do nowej aplikacji, tj. do oczyszczania gazu złożowego, jest niewątpliwie potwierdzeniem potencjału jaki posiadają te materiały.

Kierunek projektowania struktur gradientowych pochodził z badań nad systemami wielowarstwowymi składającymi się z trzech różnych materiałów (f10, f5 i nano), których parametry przedstawiono w tabeli 1, ułożonych w różnych konfiguracjach. Uwzględniono również to, że materiał złożony tylko z nanowłókien ma słabe właściwości mechaniczne, dlatego też nie może wystąpić jako samodzielny filtr, tylko jest elementem układu.

Tabela 1. Parametry strukturalne badanych materiałów filtracyjnych

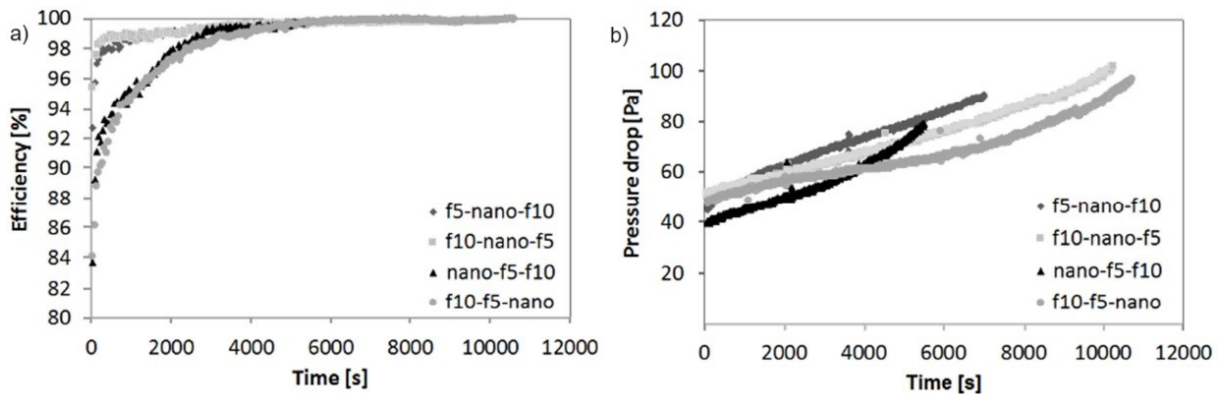
| Filter layer | Mean fiber diameter [μm] | Packing density [-] |
|-------------------|---------------------------------------|---------------------|
| Microfibers (f10) | 10.0 | 0.120 |
| Nanofibers (nano) | < 1.0 (typically 0.6-0.8) | 0.021 |
| Microfibers (f5) | 5.0 | 0.059 |

Rys. 13 pokazuje związek między skutecznością filtracji a średnicą kropli. Skuteczność jest zdefiniowana jako liczba kropli osadzonych na włóknach do liczby kropli w strumieniu przed filtrem (w strumieniu zasilającym). Początkowa skuteczność wszystkich badanych filtrów była prawie taka sama (Rys. 13a), natomiast z czasem trwania procesu filtracji najgorszą długoterminową wydajność miał filtr f10-f5-nano, w którym nanowarstwa znajdowała się na końcu (Rys. 13b). Jest to spowodowane łatwiejszym oderwaniem kropli (resuspensja, re-entrainment) z tej warstwy i ponownym ich wprowadzeniem do strumienia gazu. Zjawisko to jest też odpowiedzialne za wyraźny spadek sprawności filtrów f10-f5-nano i f10-nano-f5 obserwowane dla kropli o średnicach od ok. 3 μm (Rys. 13b). Najmniej podatne na resuspensję i zatem najskuteczniejsze w długoterminowej filtracji kropli były te filtry, których ostatnia warstwa była złożona z mikrowłókien - co potwierdza brak dużych kropli w przepływie powietrza za filtrem. Zatem intensywność zjawiska oderwania kropli od włókna i jej powrót do strumienia gazu jest malejącą funkcją średniej średnicy włókna, co jest bardzo ważną obserwacją w kontekście tworzenia filtrów warstwowych czy też gradientowych. Dlatego też zjawisko to nie występowało w filtrach kończących się warstwą f10.



Rys. 13. Sprawność filtracji kropli z gazu dla czterech różnych struktur gradientowych (składających się z warstw opisanych w Tabeli 1):
 a) na początku procesu filtracji i b) po osiągnięciu spadku ciśnienia na poziomie 4,5 kPa

W przypadku filtracji cząstek stałych wszystkie z proponowanych struktur wykazywały się wysokimi wartościami sprawności filtracji (Rys. 14a). Filtry mające w czołowej warstwie włókna o średnicach w skali nanometrów charakteryzowały się gwałtownie rosnącym spadkiem ciśnienia (filtracja plackowa) (Rys. 14b), natomiast w materiałach, które miały grubsze włókna w warstwie frontowej, spadek ciśnienia wzrastał wolniej (filtracja wgłębna).



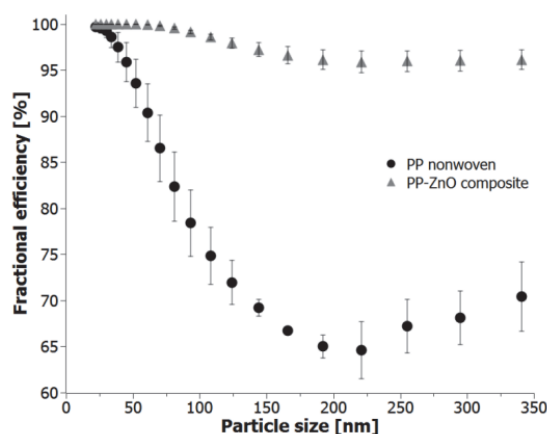
Rys. 14. Zmiana sprawności filtracji (a) i spadku ciśnienia (b) z czasem trwania procesu filtracji cząstek stałych dla czterech różnych struktur gradientowych

Biorąc pod uwagę separację obu typów cząstek, optymalnym okazał się układ f10-nano-f5, który charakteryzował się powoli rosnącym spadkiem ciśnienia, połączonym z wysoką skutecznością filtracji, dużą pojemnością pyłu i brakiem efektu resuspensji.

Włókna zmodyfikowane

Mając dobrze rozpoznane efekty, które wpływają na ruch i depozycję cząstek na czystych pierwotnych włóknach polipropylenowych w kolejnym kroku zaproponowałam zmodyfikowanie ich powierzchni w celu poprawy własności filtracyjnych i nadania im nowych właściwości. W pracach **H7** i **H13** opisano alternatywne podejście do zwiększenia efektywności filtracji, które opiera się na modyfikacji filtra za pomocą nanopreczyków tlenku cynku (ZnO), syntetyzowanych za pomocą metody hydrotermalnej. W literaturze można znaleźć doniesienia, że metody hydrotermalne były szeroko stosowane do osadzania nanocząstek ZnO na płaskich powierzchniach (Choi et al., 2012; Kenanakis et al., 2012). W ramach prac H13 i H7 metoda ta została dostosowana do osadzania nanopreczyków ZnO na wysoce porowatym włókninowym materiale filtracyjnym z polipropylenu. Wybrano tlenek cynku, gdyż wykazuje on szereg obiecujących właściwości, np. działanie przeciwbakteryjne, rozkłada rozpuszczone zanieczyszczenia organiczne pod wpływem promieniowania UV, które można wykorzystać do różnych zastosowań. Ponadto, jest uważany za związek bezpieczny dla ludzi i środowiska.

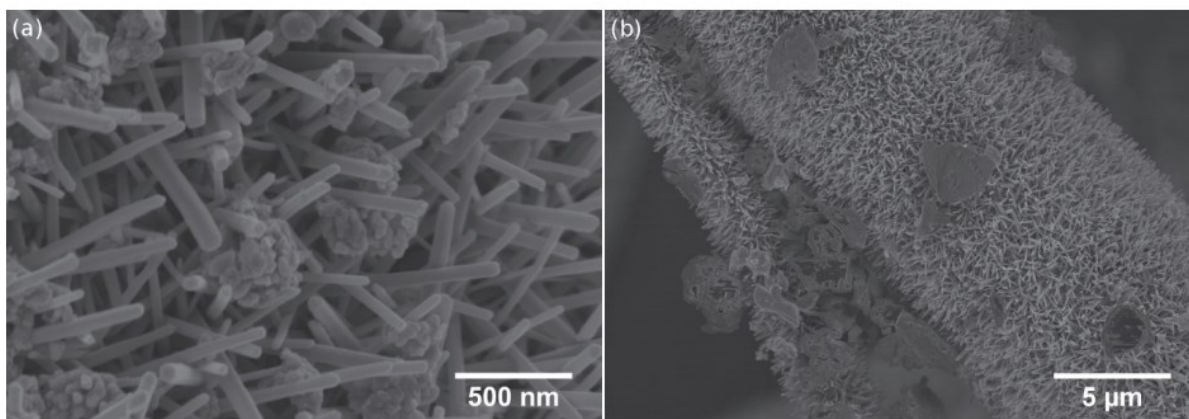
W pracy **H7** kompozytowy materiał był otrzymywany w trzech krokach: a) obróbka plazmowa surowej włókniny, b) pokrywanie włókien PP nanocząstkami ZnO, jako zarodnikami wzrostu oraz c) jednorodny wzrost nanopreczyków ZnO. Włóknina polipropylenowa została poddana obróbce wyładowaniem plazmowym w celu poprawy zwilżalności i adhezji nanocząstek ZnO używanych jako inicjatory wzrostu do powierzchni polimeru. W konsekwencji na powierzchni włókien uzyskano odpowiednią chropowatość w skali nanometrycznej, którą można sterować dobierając odpowiednie warunki prowadzenia syntezy. Dzięki nim uzyskano silne efekty powierzchniowe, które wpływały na pracę włókninowych materiałów filtracyjnych. Miarą uzyskanego efektu modyfikacji były: (i) ocena struktury (HR-SEM); (ii) składu powierzchni (FTIR); (iii) ocena powierzchni właściwej (SSA); (iv) ocena potencjału zeta; (v) ocena skuteczności filtracji cząstek KCl (Rys. 15).



Rys. 15. Wyniki badań sprawności filtracji aerozolu stałego uzyskane dla włókniny PP i włókniny kompozytowej PP-ZnO

Pręciki tlenku cynku zwiększyły powierzchnię filtra, co pozwoliło osiągnąć poprawę efektywności filtracji, zwłaszcza w zakresie cząstek MPPS. Należy również podkreślić tylko niewielką różnicę w spadku ciśnienia pomiędzy włókniną referencyjną i pokrytą ZnO, co wynika z faktu, że modyfikacja nie miała wpływu na makroskopową strukturę filtra.

Na rys. 16 widać efekt modyfikacji polimerowego włókna (matrycy) za pomocą nanoprecyków tlenku cynku. Widać, że miejsce depozycji cząstek na strukturach ZnO zależy od ich średnicy – małe cząstki penetrują pomiędzy pręciki (Rys. 16a), natomiast większe osadzają się na górnej części pręcików (Rys. 16b).



Rys. 16. Depozycja cząstek mniejszych (a) i większych (b) na nanoprecykach tlenku cynku

Nanoprecyki tlenku cynku pokrywają równomiernie całą powierzchnię włókna. Analiza całej objętości próbki pokazała, iż długość uzyskiwanych struktur ZnO jest mniejsza dla włókien znajdujących się w głębszych warstwach materiału i w pewnej odległości od powierzchni włókna zostały pokryte jedynie nanocząstkami ZnO. Tę niejednorodność pokrycia można poprawić poprzez stymulację przepływu odczynników przez całą objętość materiału filtracyjnego w fazie wzrostu i to zostało wykonane w ramach pracy **H13**.

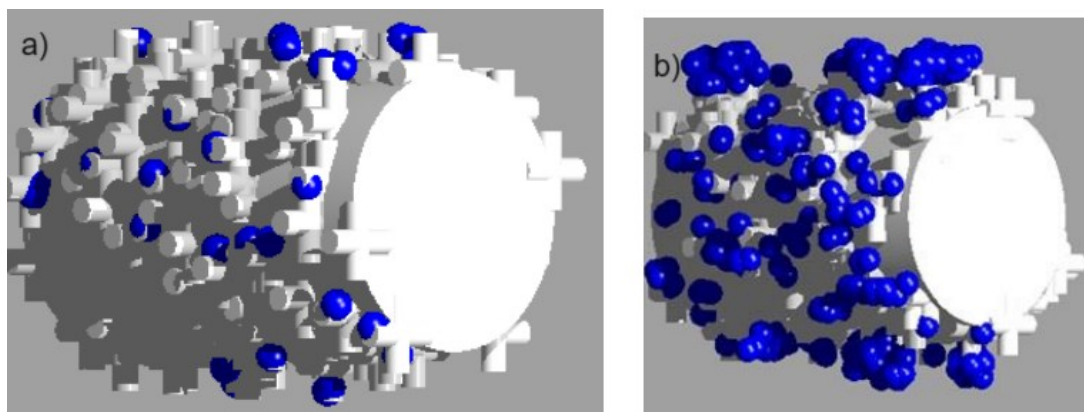
Ulepszona metoda syntezy nanoprecyków tlenku cynku w stosunku do wyżej opisanej, prowadząca do równomiernego pokrycia nanoprecykami powierzchni włókien w całej objętości materiału, oraz, co warto podkreślić, eliminująca etap obróbki plazmowej stała się przedmiotem badań w ramach projektu *POB_TMI* z PW, którego byłam kierownikiem. Wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono w publikacji, która została właśnie przyjęta do druku w czasopiśmie *Journal of Environmental Chemical Engineering*, a wyniki obliczeń teoretycznych opublikowano w pracy **H13**. Opracowano model numeryczny opisujący proces usuwania z powietrza aerozolowych cząstek abiotycznych i biotycznych, który wspomogł projektowanie wysokosprawnego kompozytowego materiału filtracyjnego polipropylen-tlenek cynku (PP-ZnO) oraz pozwoli na przewidywanie jego zachowania się podczas oczyszczania powietrza z różnego rodzaju zanieczyszczeń. Podstawą obliczeń skuteczności działania zaproponowanego filtra była analiza oddziaływań między gazem, cząstkami i włóknami polimerowymi zmodyfikowanymi tlenkiem cynku. Dzięki temu można było wyznaczyć sprawność pojedynczego włókna (SFE, ang. single fiber efficiency), a następnie na tej podstawie całkowitą sprawność filtra. Geometria pojedynczego włókna pokrytego pręcikami tlenku cynku została

odzworowana na podstawie obserwacji wyników modyfikacji przeprowadzonych na drodze ulepszonej syntezy.

Model numeryczny filtracji cząstek na filtrach modyfikowanych tlenkiem cynku składał się z dwóch elementów:

- model przepływu płynu wokół włókien: model gazu sieciowego Boltzmanna (ang. lattice-Boltzmann model, LBM);
- model ruchu pojedynczej cząstki w strukturze włókninowej: równanie ruchu oparte na równaniu Langevina.

Na rys. 17 przedstawiono wyniki symulacji numerycznych obładowania włókna PP-ZnO cząstkami w początkowym etapie filtracji (a) i po pewnym czasie (b). Widać, że napływające w powietrzu cząstki przyczepiają się do tych wcześniej zdeponowanych tworząc aglomeraty (Rys. 17b).



Rys. 17. Wyniki symulacji numerycznych obładowania włókna cząstkami na etapie początkowym procesu (a) oraz po pewnym czasie (b)

Nowy filtr hybrydowy PP-ZnO może znaleźć zastosowanie w systemach wentylacji i klimatyzacji lub w maskach, jako osobista ochrona dróg oddechowych, z wymaganym uwzględnieniem zagrożenia mikrobiologicznego.

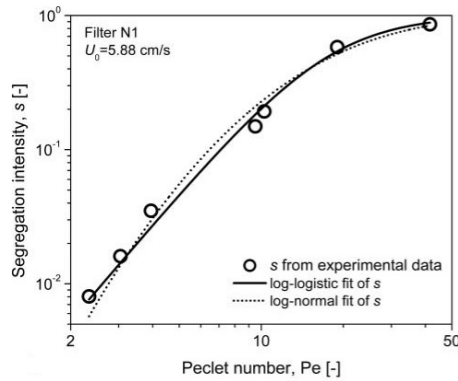
4.3.5.2. Wpływ morfologii cząstek na ich zachowanie w strukturze włókninowej

Morfologia cząstek, obejmująca takie aspekty jak rozmiar, kształt i struktura powierzchni, znacząco wpływa na ich zachowanie się w strukturze filtracyjnej. Dlatego też, wiedza na ten temat jest kluczowa dla projektowania filtrów do różnych zastosowań. Badania dotyczące wpływu morfologii cząstek na ich zachowanie w strukturach filtracyjnych były prowadzone dwutorowo do opisanych wcześniej badań, dotyczących wpływu morfologii warstwy na zachowanie w niej cząstek.

Monodispersyjne nanocząstki stałe

W pracy **H12** zbadano jak monodispersyjne kuliste nanocząstki zachowują się w różnych polidispersyjnych materiałach filtracyjnych wykonanych techniką melt-blown. Badania te wykonywałam będąc na *stażu na Uniwersytecie w Wiedniu*. Wykorzystane do testów cząstki to elektrostatycznie klasyfikowane białka oraz cząstki krzemionki o rozmiarach od 3,2 do 27,2 nm. Zostały one wytworzone z odpowiednich zawiesin za pomocą generatora EAG Mod. 3480, TSI, Inc., USA. Eksperymentalnie wyznaczone wartości penetracji nanocząstek przez cztery filtry polidispersyjne zostały porównane z klasyczną teorią filtracji używaną dla arytmetycznej średniej średnicy włókna i ekwiwalentnej średnicy włókna uzyskanej z pomiarów spadku ciśnienia. Zważywszy na średnicę używanych cząstek można było przewidzieć, że dominującym mechanizmem depozycji jest dyfuzja brownowska, co znalazło potwierdzenie w wynikach obliczeń (96–99% ogólnej skuteczności pojedynczego włókna stanowi sprawność mechanizmu dyfuzyjnego). Również otrzymane eksperymentalne wyniki penetracji, tj. 1-sprawność, rosła wraz ze wzrostem średnicy analizowanych nanocząstek.

Ponadto, uzyskane wyniki zinterpretowano wspomnianym już wcześniej zaawansowanym modelem przepływu całkowicie segregowalnego PSFM dla filtrów polidispersyjnych. Uzyskano bardzo dobrą zgodność danych dla nanocząstek z przewidywaniami modelu. Model ten zawiera współczynnik s , który jest miarą intensywności segregacji przepływu strumienia aerozolu. Do tej pory wyznaczałam go dla cząstek o średnicach powyżej 0,2 μm i dla danego filtra i określonej prędkości gazu, był on wartością stałą. Stwierdzono, że s nie jest wartością stałą w przypadku nanocząstek, a jego wartość zmienia się o dwa rzędy wielkości w rozważanym zakresie rozmiarów cząstek. Ponadto, wartości tego współczynnika zawierały się w zakresie od 0 do 1. Wynik ten zinterpretowano następująco: dla większych cząstek, badanych przez nas wcześniej (od 0,2 μm do 10 μm), efekt mieszania brownowskiego słabł wraz ze wzrostem ich średnicy. Dlatego też segregacja cząstek aerozolu w porowatej przestrzeni niejednorodnych struktur filtracyjnych była głównie związana z segregacją samego przepływu powietrza, czyli było to zjawisko głównie konwekcyjne (przenoszenie cząstek przez nierównomiernie płynący gaz). Biorąc pod uwagę powyższe, współczynnik s może być niezależny od rozmiaru cząstek i powinien zależeć tylko od struktury filtra i prędkości przepływu powietrza. Sytuacja jest inna w przypadku nanocząstek. Tutaj mamy dwa rywalizujące ze sobą zjawiska transportu cząstek. Po pierwsze konwekcję, prowadzącą do wzdłużnej segregacji przepływu, zachodzącej wzdłuż głównego kierunku przepływu gazu przez filtr. Po drugie, dyfuzję brownowską, która powoduje poprzeczne do tego kierunku mieszanie nanocząstek, co ostatecznie powinno zmniejszyć efekt segregacji konwekcyjnej. Tym samym nie powinno dziwić, że s zmienia się wraz z rozmiarem nanocząstek lub, odpowiednio, z wartością liczby Pecleta. Uzyskane dane eksperymentalne potwierdzają ten trend (Rys. 18).



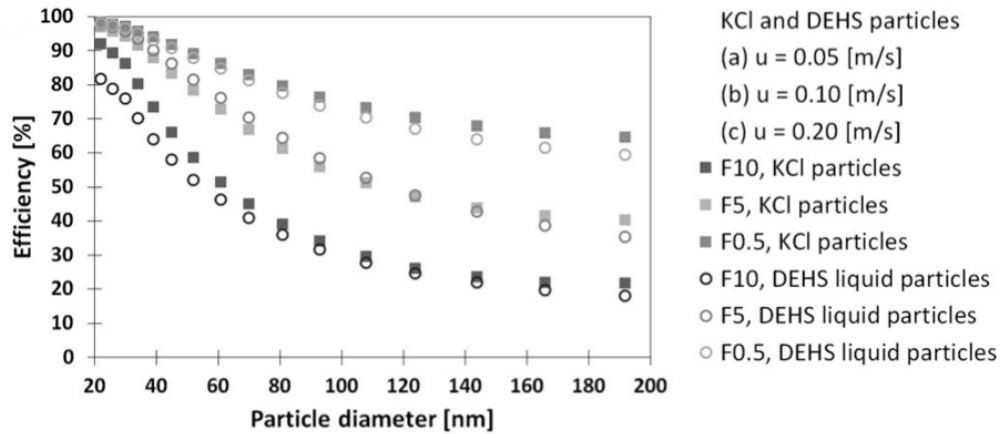
Rys. 18. Aproksymacje log-logistyczne i log-normalne intensywności segregacji, s , w stosunku do liczby Pecleta, Pe , dla modelu PSFM

Stwierdzono, że dla analizowanych filtrów, intensywność segregacji wzrastała wraz ze wzrostem średnicy cząstek i można ją było bardzo dokładnie interpolować względem liczby Pecleta za pomocą funkcji log-logistycznej lub log-normalnej (Rys. 18). Gdy użyto tej pierwszej interpolacji razem z modelem przepływu częściowo segregowanego PSFM, uzyskano doskonałe dopasowanie do eksperymentalnie zmierzonych wartości penetracji dla wszystkich analizowanych nanocząstek i filtrów.

Polidispersyjne nanocząstki stałe i ciekłe

Do tej pory przeanalizowałam zachowanie cząstek stałych i kropli o rozmiarach submikronowych i mikronowych oraz monodispersyjnych nanocząstek w niejednorodnych filtrach włókninowych. W ramach pracy **H9** zajęłam się polidispersyjnymi nanoaerozolami stałymi i ciekłymi. Średnice generowanych cząstek wynosiły od 20 nm do 200 nm, przy czym większość z nich mieściła się w zakresie między 30 nm a 60 nm. Badania dotyczące aerozoli o monodispersyjnym rozkładzie średnic cząstek przeważają w literaturze przedmiotu, jednak strumienie polidispersyjnych nanoaerozoli są zwykle emitowane przez rzeczywiste źródła, w tym np. silniki Diesla, lub powstają w różnych procesach związanych z działalnością człowieka, także tych zachodzących w sposób naturalny, np. erupcje wulkaniczne.

Pokazano, że trzy filtry włókninowe o różnych strukturach, wyprodukowane za pomocą technologii melt-blown, mogą skutecznie usuwać polidispersyjne nanocząstki stałe i ciekłe z powietrza. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że nie ma wyraźnego wpływu morfologii nanocząstek na skuteczność ich separacji z powietrza. Dla badanego zakresu średnic zarówno stałych nanocząstek KCl, jak i nanokropli DEHS, skuteczność ich przechwytywania przez włókna filtracyjne jest podobna (Rys. 19). W zastosowanych warunkach eksperymentalnych skuteczność filtracji maleje wraz ze wzrostem średnicy cząstek, co jest zgodne z przedstawioną na wstępie analizą mechanizmów rządzących depozycją cząstek na włóknach.



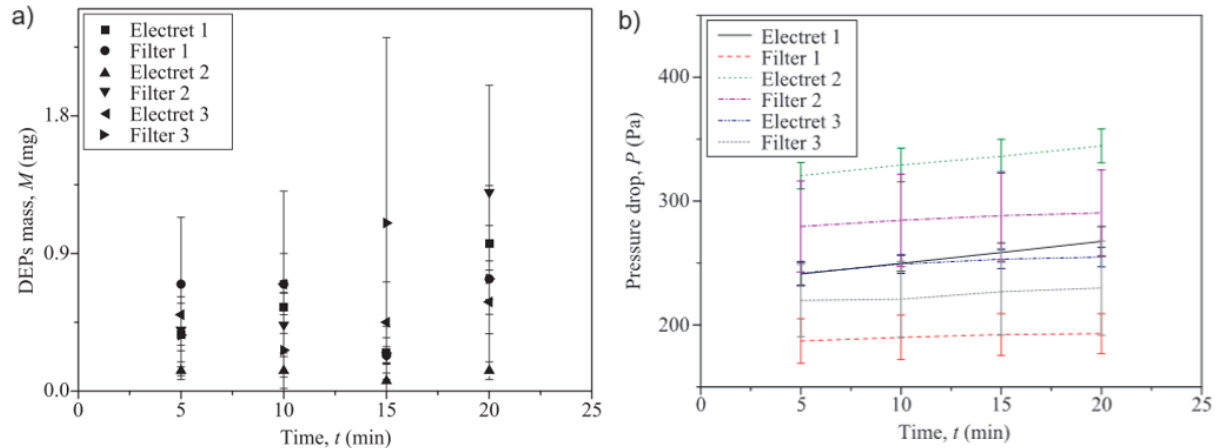
Rys. 19. Wpływ morfologii cząstek na sprawność filtracji dla trzech prędkości przepływu aerozolu i trzech różnych filtrów

Cząstki Diesla (DEP)

Kolejnymi cząstkami, których transport i deponację badano w włókninowych strukturach melt-blown, były cząstki emitowane z realnego źródła, tj. z silnika Diesla (Diesel Exhaust Particles, DEP). Tworzą one agregaty składające się z wielu drobnych cząstek (cząstek pierwotnych) połączonych ze sobą. Liczba cząstek w agregacie waha się od 2 do kilku tysięcy. Rozmiar cząstek pierwotnych zwykle mieści się w zakresie od kilku nm do 50 nm (Bałazy i in., 2006). Całkowity rozmiar takich agregatów waha się od nanometrów do kilku mikrometrów (Fridlander, 2000). Agregaty emitowane przez silniki Diesla zawierają rdzeń sadzy z lotnymi związkami organicznymi i siarkowymi adsorbowanymi na ich powierzchni (Maricq, 2007). Dane silnika emitującego cząstki w prowadzonych badaniach to: Mercedes-Benz wyprodukowany w 1982 roku, 4 cylindry, moc silnika 53 kW przy 4200 obr./min, moment obrotowy 137 Nm przy 2400 obr./min, pojemność skokowa silnika 2399 cm³. Uzyskane wyniki przedstawiono w pracy **H10**. DEP są szkodliwe dla zdrowia ludzkiego, a ich mały rozmiar i struktura przypominająca fraktale sprawiają, że trudno jest przewidzieć ich zachowanie podczas procesu filtracji. Dlatego też, niniejsze badania są bardzo ważne w kontekście projektowania efektywnych materiałów filtracyjnych do zatrzymywania cząstek pochodzących ze spalania.

Badania przeprowadzone w ramach pracy obejmowały zarówno analizę doświadczalną, jak i teoretyczną procesu separacji cząstek Diesla z powietrza w filtrach włókninowych mechanicznych (bez ładunku elektrycznego zgromadzonego na włóknach) i elektretowych (posiadających ładunek elektryczny na włóknach). Założono, że za deponację agregatów DEP odpowiedzialna jest dyfuzja brownowska i bezpośrednie zaczepienie dla nienaładowanych filtrów, i dodatkowo jeszcze ładunek elektryczny w przypadku elektretów. Teoretyczne skuteczności filtracji zostały obliczone z użyciem klasycznego podejścia z uwzględnieniem eksperymentalnego rozkładu liczbowego DEP i funkcji efektywnej gęstości. Analiza teoretyczna potwierdziła, że mechanizm dyfuzyjny jest podstawowym mechanizmem osadzania DEP w filtrach włókninowych.

Na rys. 20 można zaobserwować, że masa cząstek, które penetrowały przez strukturę filtracyjną podczas procesu nie zwiększała się monotonicznie.



Rys. 20. (a) Masa DEP, które przeniknęły przez filtry włókninowe w 5., 10., 15. i 20. minucie testu. (b) Spadek ciśnienia na badanych filtrach (linie reprezentują wartości średnie, a słupki błędów reprezentują odchylenia standardowe)

Wyniki doświadczalne pokazują, że filtry włókninowe produkowane za pomocą technologii melt-blown zapewniają wysoki poziom ochrony przed cząstkami DEP, z efektywnością filtracji w zakresie od 93% do 99%. Teoretyczne wyniki uzyskane przy użyciu klasycznej teorii filtracji wskazują na niższą skuteczność filtracji niż wyniki doświadczalne, z racji polidispersyjnych włókien, co pozostaje w zgodzie z wynikami uzyskanymi wcześniej.

Aerozole mieszane

Aktualnie produkowane włókninowe wkłady filtracyjne są w znakomitej większości zaprojektowane albo do usuwania wyłącznie cząstek ciał stałych albo wyłącznie do usuwania kropli. Większość badań, zarówno eksperymentalnych, jak i teoretycznych dotyczy usuwania z gazów albo wyłącznie cząstek stałych, albo wyłącznie kropli. Tymczasem w wielu przypadkach mamy do czynienia z gazami zawierającymi zarówno cząstki stałe, jak i krople. Najlepszym przykładem takiego układu jest powietrze, które nas otacza, zawierające np. krople wody i różne cząstki biologiczne np. bakterie, wirusy, grzyby. W kontekście medycznym, chemicznym, czy technologicznym, aerozole mieszane mogą być stosowane do różnych celów. Na przykład, w medycynie aerozole mieszane mogą zawierać różne substancje lecznicze do inhalacji. Wydaje się oczywiste, że w przypadku jednoczesnej depozycji kropli i cząstek stałych w filtrze należy spodziewać się efektów będących wynikiem wzajemnego oddziaływania na siebie tych cząstek. Obecność cieczy (kropli) będzie wpływała na struktury depozytów stałych, a obecność cząstek stałych będzie wpływała na kształt kropli. Moje badania eksperymentalno-teoretyczne pozwoliły opisać te zależności w pełny sposób, czym otworzyły drogę do projektowania filtrów pracujących w dynamicznych warunkach jako m.in. środki ochrony osobistej, filtry w samochodach. Wypełniły lukę w badaniach filtracyjnych dotyczącą, jakże ważnej, separacji aerozoli mieszanych. Zaproponowany model numeryczny opisuje zjawiska

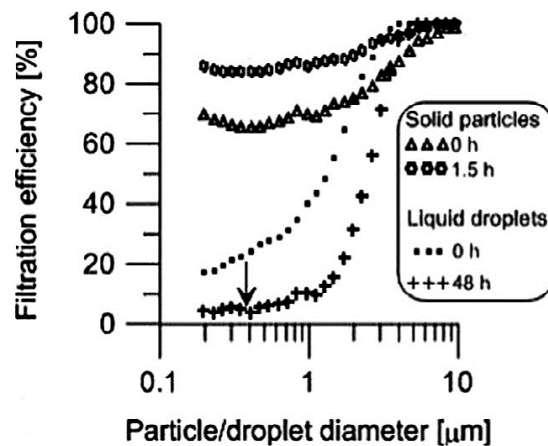
zachodzące podczas ekspozycji filtra na aerozol stały i ciekły, które do tej pory nie doczekały się omówienia w literaturze naukowo-technicznej, czyli wpływ zdeponowanych cząstek stałych na efektywność osadzania kropli, czy też kształt i wielkość depozytów cząstek stałych w przypadku wcześniejszego zwilżenia włókien kroplami cieczy. Przeprowadzone eksperymenty posłużyły do weryfikacji modelu teoretycznego.

To, że procesowi filtracji aerozoli mieszanych poświęcono jak dotąd znikomą uwagę spowodowane jest trudnościami w realizacji badań doświadczalnych. Interakcje jakie zachodzą jeszcze w momencie podawania strumienia aerozolu do komory z materiałem filtracyjnym powodują, że do filtra nie docierają pojedyncze cząstki stałe i ciekłe tylko utworzone z nich aglomeraty, co uniemożliwia analizę wpływu jednych cząstek na drugie w momencie depozycji, czy też w późniejszych etapach procesu. W celu rozwiązania tego problemu zaproponowałam odpowiednie poprowadzenie procesu filtracji polegające na obładowaniu filtra najpierw jednym rodzajem aerozolu, a potem drugim, co pozwoliło na zbadanie ich wzajemnego wpływu na siebie podczas depozycji i transportu, czyli na wyjaśnienie zawilej natury separacji aerozoli mieszanych.

Odpowiednio modyfikując stanowisko badawcze firmy Palas HFP2000 przeprowadzono szeroko zakrojone badania doświadczalne opisane w publikacji **H6**, których wyniki zostały wyjaśnione używając zaproponowanego w pracy **H3** modelu numerycznego.

Filtracja cząstki stałe – ciecz (SC)

Analizy wykonane w ramach publikacji **H6** rozpoczęto od przypadku naprzemiennej filtracji cząstki stałe-ciecz (SC). Na rys. 21 przedstawiono zmiany sprawności frakcyjnej polipropylenowego filtra włókninowego o średniej średnicy włókien 10 μm podczas tego procesu.



Rys. 21. Zmiana sprawności frakcyjnej podczas filtracji aerozolu stałego, a następnie ciekłego na filtrze f10

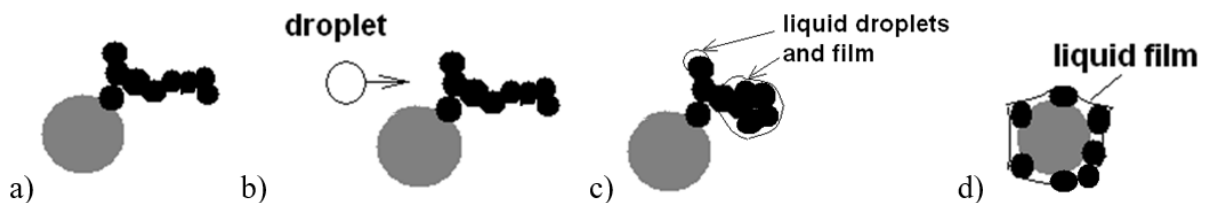
Można zaobserwować ten sam trend zmian sprawności frakcyjnej (tj. dla danej średnicy cząstki) podczas ekspozycji najpierw na aerozol stały, którym były cząstki krzemionki Arizona zawieszona w powietrzu (1,5 h), a następnie na ciekły, który tworzyły krople oleju DEHS w powietrzu (48h). Sprawność filtracji cząstek stałych wzrosła w czasie dla całego zakresu analizowanych średnic. Jest to wynik depozycji cząstek na włóknach i tworzenia się na nich

rozgałęzionych struktur dendrytycznych, które działają jak dodatkowe kolektory cząstek. Widać, że początkowa efektywność filtracji kropli była znacznie niższa niż efektywność końcowa osiągnięta po 1,5h filtracji cząstek stałych. Zidentyfikowano możliwe dwie przyczyny obserwowanego zjawiska:

- Obecność ładunku elektrycznego na cząstkach stałych, co jest typową właściwością filtracji cząstek stałych. Ten ładunek wywołał dodatkowy mechanizm elektrostatycznego osadzania, co skutkowało wzrostem efektywności filtracji. W przypadku cieczy stwierdzono, że ten mechanizm nie występuje.

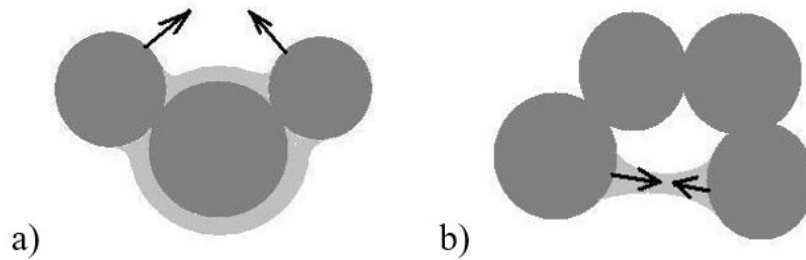
- Różnica w mechanizmach osadzania cząstek stałych i ciekłych. Osadzanie cząstki stałej można traktować jako praktycznie nieodwracalne, gdy odległość między powierzchnią cząstki a włóknem (lub wolnymi i osadzonymi cząstkami) staje się zerowa. Natychmiastowe ponowne wprowadzenie tej cząstki do strumienia gazu jest niemal niemożliwe, ponieważ siła tarcia prowadzi do utraty jej energii kinetycznej. Z drugiej strony, siły adhezyjne działające między cząstką a włóknem lub między dwiema cząstkami przewyższają siły oporu działające od przepływu gazu. W przypadku kropli, jeśli osadzi się na włóknie, zaczyna ślizgać się po jego powierzchni i jeśli energia kinetyczna jest wystarczająco wysoka, a powierzchnia kontaktu jest mała może prowadzić do porywania depozytów. Jest to ostatecznie obserwowane jako spadek sprawności filtracji. Podczas dalszego obładowywania filtrów kroplami, skuteczność filtracji nagle spadła i utrzymywała się na stałym poziomie do końca 48 godzin.

W przypadku filtracji SC jako główny mechanizm zmian sprawności i spadku ciśnienia została przyjęta deformacja dendrytów, a następnie ich kompaktowanie na skutek oddziaływania ze zdeponowanym płynem (Rys. 22).



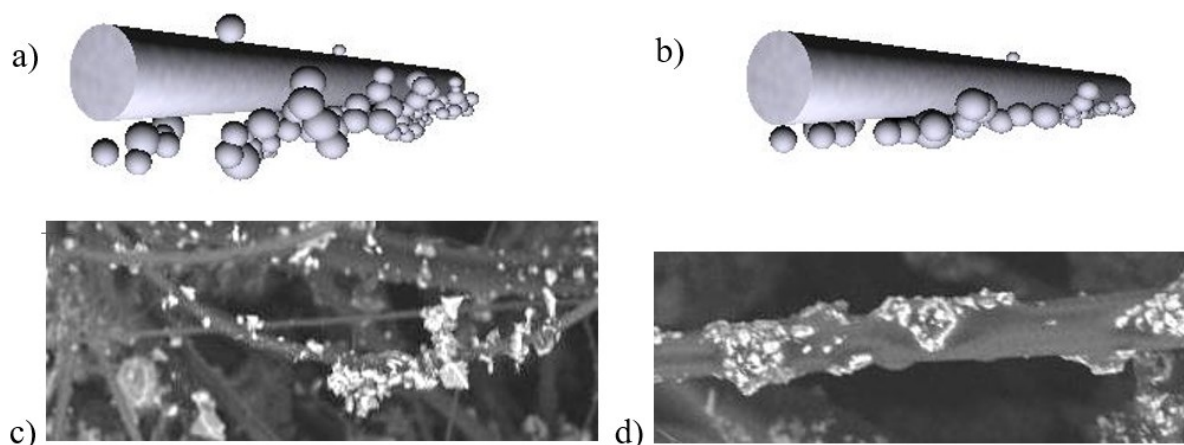
Rys. 22. Kolejne fazy (a-d) reorganizacji dendrytów na skutek kontaktu z kroplami

Jako główne efekty mechanizmów tego oddziaływania odpowiedzialne są siły kapilarne oraz siły wynikające z istnienia mostków cieczowych (Rys. 23). W rezultacie, po początkowym niewielkim wzroście sprawności dochodziło do jej gwałtownego spadku, na skutek wzrostu objętości filtra dostępnej dla przepływu gazu oraz wzrostu efektywnej średnicy włókien.



Rys. 23. Oddziaływanie pomiędzy cząstkami tworzącymi stałe agregaty (kolor ciemnoszary) w obecności cienkich warstw zdeponowanej cieczy (kolor jasnoszary). Kierunek i zwrot sił przedstawiają strzałki. a) siły kapilarne b) siły wynikające z istnienia mostków cieczowych

Aby dokładniej wyjaśnić przebieg reorganizacji depozytów na skutek oddziaływania ze zdeponowaną cieczą, w ramach pracy **H3** sformułowano model numeryczny oddziaływań pomiędzy cząstkami w takim agregacie. Uwzględnia on następujące zagadnienia: (i) pole przepływu gazu i ewentualnie jego zmiany w trakcie wzrostu depozytów; (ii) dynamikę pojedynczej cząstki w przepływie gazu i jej osadzanie się na włóknie (lub na uprzednio zdeponowanych cząstkach); (iii) dynamikę cząstek wewnątrz depozytów wynikającą z obecności cieczy. Pole przepływu gazu wokół czystego włókna (w początkowym etapie procesu) było opisywane modelem Kuwabary. Następnie, kiedy zaczynają się pojawiać pierwsze stałe depozyty pole prędkości przepływu gazu obliczano metodą lattice-Boltzmann. Oddziaływania pomiędzy cząstkami w agregacie w obecności cieczy opisuje równanie ruchu, które uwzględnia dwa rodzaje sił, tj. siły kapilarne oraz siły wynikające z istnienia mostków cieczowych. Oddziaływania wywołane obecnością cieczy zostały zamodelowane przy użyciu modelu harmonicznego, gdyż rzeczywista postać tych sił jest bardzo skomplikowana, a w przypadku oddziaływań większej ilości cząstek – nawet nie znana w postaci analitycznej. Ruchy (przemieszczenia) cząstek były wyznaczone w każdym kroku czasowym przy użyciu algorytmu Verleta zmodyfikowanego w celu uwzględnienia sił tłumienia. W wyniku modelowania numerycznego uzyskano struktury depozytów występujących na powierzchniach włókien w kolejnych etapach procesu. Co więcej, określono dynamikę zmian sprawności pojedynczego włókna w czasie. Aby określić tę dynamikę, obliczono liczbę wpuszczanych do domeny obliczeniowej cząstek w danym okresie czasu i śledzono, ile z nich opuściło domenę. Rys. 24 przedstawia przykładowe wyniki takiej symulacji oraz, dla porównania, zdjęcia dokumentujące reorganizację depozytów, wykonane przy pomocy skaningowego mikroskopu elektronowego.



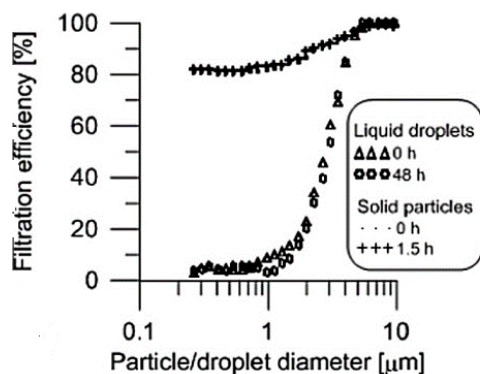
Rys. 24. Wyniki symulacji (a-b) oraz zdjęcia mikroskopowe (c-d) przedstawiające reorganizację depozytów stałych. Wygląd początkowy depozytów (a, c) oraz wygląd po pewnym okresie ekspozycji na mgłę olejową (b, d).

Porównanie wyników symulacji z zaproponowanego modelu oraz obrazów mikroskopowych świadczy o tym, że podczas filtracji mgły olejowej rzeczywiście dochodzi do reorganizacji depozytów stałych, który przyczynia się do spadku sprawności filtracji oraz, że odpowiadają za to siły kapilarne oraz siły wynikające z istnienia mostków cieczowych. Na zdjęciu po prawej stronie (Rys. 24c) wyraźnie widać rozgałęzione struktury dendrytyczne uformowane z cząstek krzemionki, natomiast po lewej stronie, już po krótkim czasie filtracji kropli, depozyty stały się bardziej skompaktowane i utworzyły pojedynczą warstwę naokoło włókna (struktura bardzo podobna do tej otrzymanej w wyniku symulacji, patrz rys. 24d).

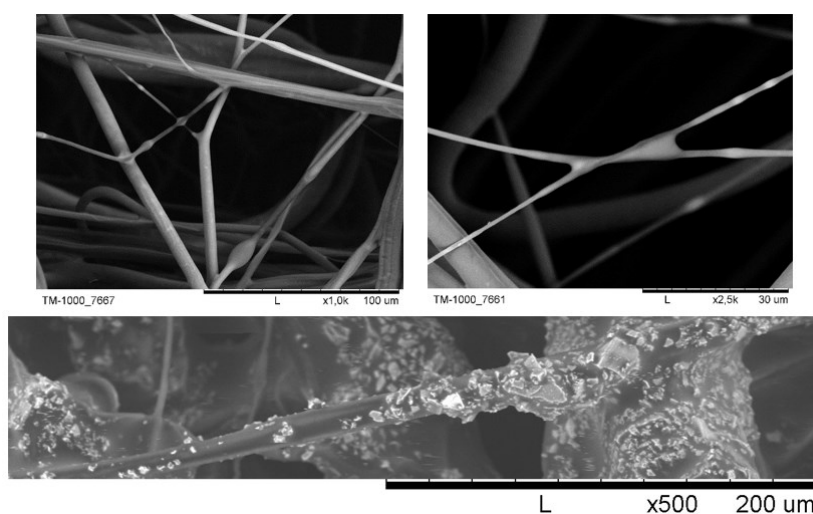
Filtracja ciecz - cząstki stałe (CS)

W kolejnym etapie w ramach publikacji **H6** zbadano sytuację odwrotną, tzn. jak zachowują się w filtrze cząstki podczas filtracji naprzemiennej ciecz – cząstki stałe (CS). Analogicznie jak poprzednio na rys. 25 przedstawiono zmiany sprawności frakcyjnej polipropylenowego filtra włókninowego o średniej średnicy włókien 10 μm podczas tego procesu.

Można zauważyć, że podczas filtracji aerozoli ciekłych efektywność nie zmieniała się znacząco, gdyż ilość cieczy osadzonej na włóknach po 48 h była zbyt mała, aby spowodować jakiegokolwiek wyraźne zmiany efektywności. Efektywność filtracji podczas obładowania cząstkami stałymi była wyższa niż dla aerozoli ciekłych - podobnie jak w przypadku filtracji SC. Ten wzrost efektywności i jednocześnie spadek ciśnienia był efektem obecności cienkiej warstwy cieczy na powierzchni włókien, która zapobiegała tworzeniu dendrytów (Rys. 26).



Rys. 25. Zmiana sprawności frakcyjnej podczas filtracji aerozolu ciekłego, a następnie stałego na filtrze f10



Rys. 26. Polipropylenowe włókna w pierwszym etapie obciążone cieczą (zdjęcia na górze), a następnie cząstkami stałymi (zdjęcie na dole)

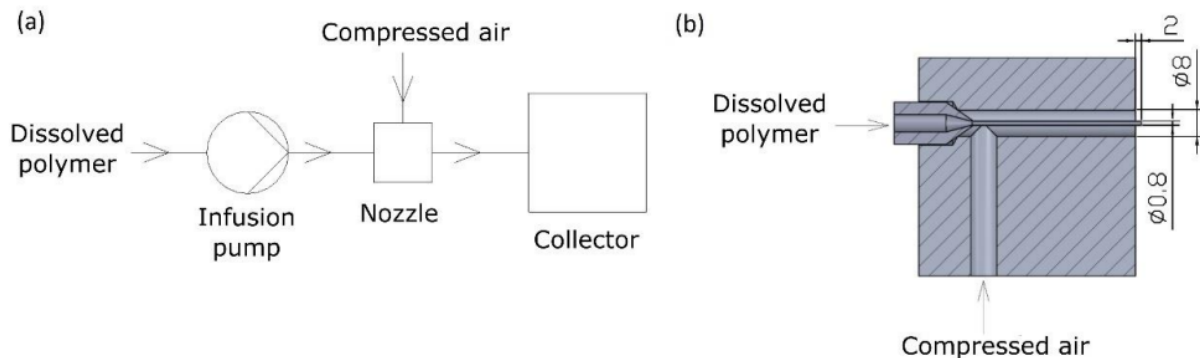
Osadzone cząstki pokrywały włókno warstwą bardziej lub mniej jednolitą. Powstanie jednolitej warstwy osadzonych cząstek wyjaśnia również brak zmian w efektywności filtracji w czasie. W porównaniu z tworzeniem dendrytów, warstwa ta nie prowadziła do znaczących zmian w strukturze filtra. Spowodowała jedynie niewielki wzrost średnicy włókna. W przypadku filtracji CS efekt zależy od ilości płynu zdeponowanego na włóknach filtracyjnych w momencie rozpoczęcia filtracji aerozoli stałych. Jeśli jest to stosunkowo cienka warstwa, działa ona jak „klej”, powodując powstanie bardziej zwartych depozytów w pierwszej fazie filtracji cząstek stałych. W tym przypadku zarówno spadek ciśnienia, jak i sprawność filtra rosną wolniej, niż w przypadku filtracji na filtrze suchym. Jeśli warstwa zdeponowanej cieczy jest grubsza, utrudnia ona zatrzymywanie cząstek stałych. Jest to związane z faktem, że przepływający gaz powoduje łatwiejsze odrywanie większych kropli bądź depozytów kropla-cząstka stała. W tym przypadku sprawność filtracji ulega zmniejszeniu w stosunku do sprawności filtracji na suchym filtrze.

4.3.5.3. Rozdmuch z roztworu

Jak już wspomniano, przemysłowa produkcja filtrów opiera się na technologii rozdmuchu stopionego polimeru. Najpowszechniej używanym polimerem jest polipropylen, który na końcu cyklu życia filtra staje się odpadem wymagającym odpowiedniego przechowywania i utylizacji. Powstające odpady są trudne do recyklingu, mogą tworzyć nano plastik, który ostatnio stał się poważnym problemem środowiskowym. Jeśli do produkcji struktury filtracyjnej użyje się materiału biodegradowalnego, zmniejszy to zanieczyszczenie środowiska. Z uwagi na powyższe, zdecydowano się wykorzystać metodę rozdmuchu z roztworu używając przyjaznych dla środowiska rozpuszczalników i dobierając odpowiedni polimer o potencjale biodegradowalnym.

W ramach pracy **H1**:

- (i) zbudowano stanowisko do produkcji filtrów metodą rozdmuchu z roztworu (Rys. 27);
- (ii) wybrano parametry operacyjne, aby zapewnić uzyskanie materiałów o pożądanych właściwościach, bez defektów;
- (iii) wyprodukowano materiały filtracyjne z roztworów PLA o wybranych stężeniach;
- (iv) zbadano spadki ciśnienia i skuteczność filtracji stałych cząstek nanometrycznych dla nowych materiałów;
- (v) przeanalizowano wpływ mechanizmu elektrostatycznego na filtrację w filtrach z PLA.



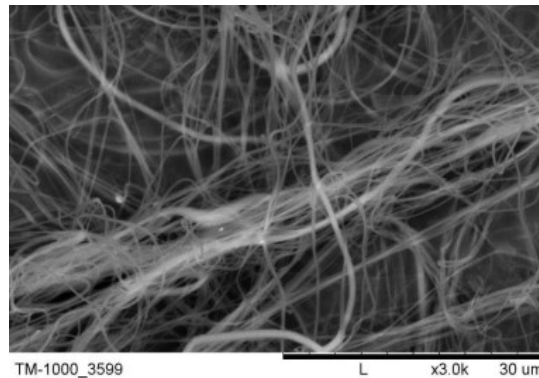
Rys. 27. (a) Schemat stanowiska badawczego do rozdmuchu polimeru z roztworu oraz (b) przekrój przez dyszę rozwłókniającą polimer

Układ składał się z czterech głównych części: dyszy, pompy infuzyjnej, kolektora oraz źródła sprężonego powietrza. Na kolektorze przymocowano podkład z włókien kokosowych, ażeby cały filtr był materiałem biodegradowalnym. Podkład ten posiadał strukturę maty, co było dodatkowym atutem. Co więcej, włókna kokosowe zostały wybrane ze względu na liczne zalety: (i) są twarde i sztywne, co pozwala na usztywnienie i stabilizację całej struktury filtracyjnej; (ii) sole mineralne obecne we włóknach kokosowych zapobiegają wzrostowi mikroorganizmów, takich jak bakterie i roztocza, które występują w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, gdzie wyprodukowane materiały mogą być używane; (iii) dobrze absorbują i uwalniają wilgoć; (iv) mają bardzo porowatą strukturę, dlatego spadek ciśnienia dla aerozolu przepływającego przez takie media jest niski. Kokosowa mata była obracana na statywie, który

wykonywał dodatkowo ruchy posuwisto-zwrotne, aby zapewnić jednorodny rozkład nanowłókien.

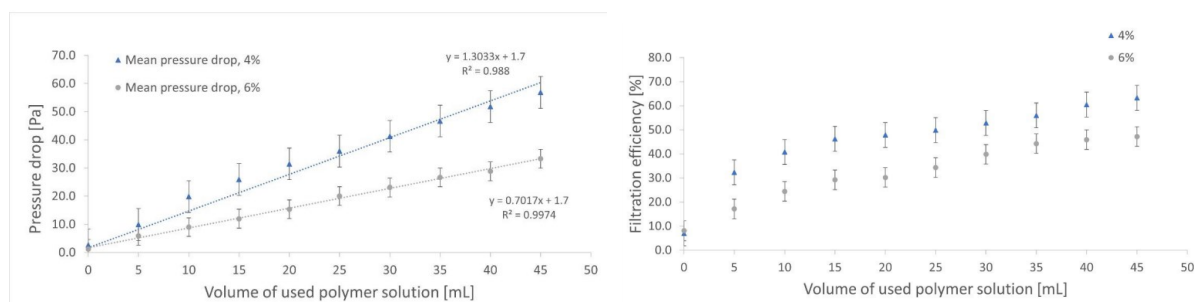
Do produkcji włókien metodą SBS użyto kwasu polilaktydowego (PLA), który jest biodegradowalny i nadaje się do kompostowania. Technika ta nie wymaga wysokiej temperatury roztworu, co daje możliwość użycia niektórych polimerów, które nie były dotąd stosowane do produkcji filtrów. Metoda SBS wymaga użycia lotnego rozpuszczalnika, dlatego też PLA został rozpuszczony w mieszaninie chloroformu i acetonu w stosunku objętościowym 3:1. Roztwór PLA w mieszaninie chloroformu i acetonu ma reologię płynu nienewtonowskiego o lepkości malejącej wraz ze wzrostem naprężenia ścinającego.

W wyniku pierwszego etapu testów uzyskano zestaw parametrów procesowych i stężeń roztworu, dla których uzyskiwano wysokiej jakości, stabilny materiał (Rys. 28). Wybrano: dwa stężenia roztworu 4 i 6% mas., ciśnienie powietrza 1×10^5 Pa, przepływ roztworu 0,4 mL/min, odległość robocza 0,8 m. Zaobserwowano, że dla wyższych stężeń roztworu polimeru uzyskiwano grubsze średnice włókien.



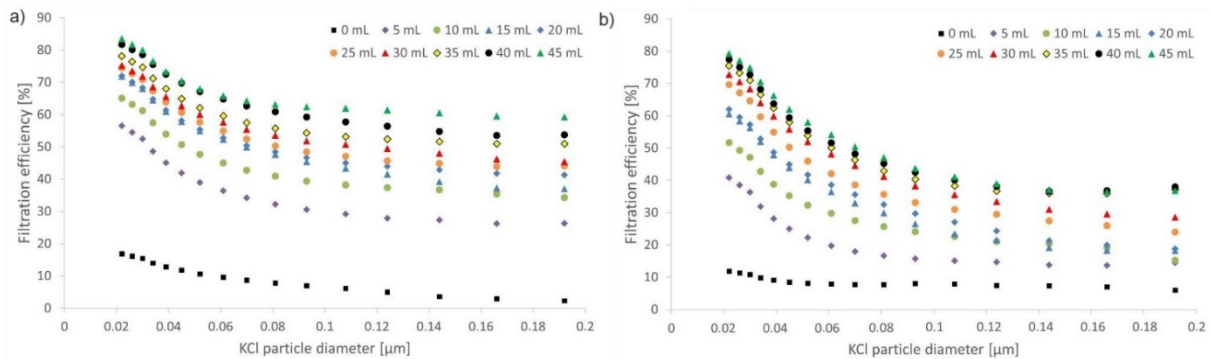
Rys. 28. Filtr włókninowy wykonany techniką SBS

Zbadano zależność skuteczności frakcyjnej filtracji nowego materiału od ilości rozwłóknionego polimeru (Rys. 29). Na początek przetestowano spadek ciśnienia i skuteczność filtracji maty kokosowej. Następnie, nakładano na powierzchnię maty roztwór w ilości 45 mL w porcjach po 5 mL. Po każdej porcji mierzono spadek ciśnienia i skuteczność frakcyjną dla trzech próbek, a wyniki przedstawiono jako wartości średnie (Rys. 29).



Rys. 29. Spadek ciśnienia na filtrze (po lewej stronie) oraz sprawności filtracji (po prawej stronie) w funkcji ilości roztworu polimeru

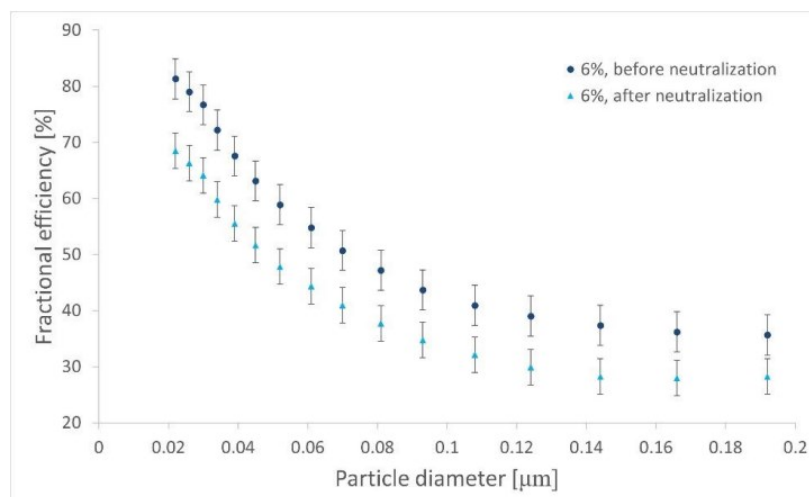
Wynikająca korelacja liniowa między objętością roztworu PLA, a skutecznością filtracji, przedstawiona na rys. 29b, pozwala łatwo przewidzieć wydajność nowo zaprojektowanego filtra.



Rys. 30. Zależność sprawności frakcyjnej od objętości (a) 4% roztworu PLA oraz (b) 6% roztworu PLA użytego do produkcji włókien

Wraz ze wzrostem ilości rozdmuchiwanego roztworu polimeru, skuteczność filtracji wzrastała w całym zakresie badanych średnic cząstek dla obu używanych stężeń roztworu. Co więcej, dzięki uzyskanej zależności sprawności filtracji od ilości użytego PLA, można przewidzieć, jaka ilość polimeru jest potrzebna, aby uzyskać filtr do konkretnego zastosowania o pożądanej wydajności.

Aby sprawdzić wpływ mechanizmu elektrostatycznego na skuteczność filtracji wyprodukowanych materiałów włókninowych, niektóre próbki umieszczono w ekscyktorze z izopropanolem na dwanaście godzin w celu neutralizacji ładunku. Po tym czasie przetestowano skuteczność filtracji próbek z neutralizacją ładunku i bez niej (Rys. 31).



Rys. 31. Wpływ neutralizacji ładunku zgromadzonego na włóknach na sprawność frakcyjną

Po neutralizacji zaobserwowano spadek skuteczności frakcyjnej dla każdej próbki, co sugeruje znaczący wpływ mechanizmu elektrostatycznego na wydajność filtracji w filtrach z PLA. Najprawdopodobniej doszło do naładowania włókien podczas ich produkcji, zbierania na warstwie podkładowej, przechowywania i przygotowania do testów. Cząstki KCl użyte do

badania procesu filtracji zostały zneutralizowane; dlatego hipoteza, że mogły indukować ładunki na włóknach, została odrzucona. Dlatego też, interakcje elektrostatyczne, a dokładniej siły coulombowskie i polaryzacyjne, są odpowiedzialne za wyższą skuteczność materiałów włókninowych przed neutralizacją.

4.3.6. Podsumowanie

Potrzeba opracowania skutecznych i wydajnych materiałów filtracyjnych jest istotna dla bardzo szerokiego zakresu zastosowań, od ogólnych systemów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych o dużym natężeniu przepływu, po urządzenia ochrony osobistej lub małe chłodzenie elektroniczne. Postęp technik symulacji numerycznej i aparatury badawczej pozwala na ciągłe doskonalenie zrozumienia zjawisk fizycznych i ich modelowanie. W ramach jednotematycznego cyklu publikacji stanowiącego podstawę osiągnięcia, którego głównym celem było głębsze poznanie procesów transportowych różnych cząstek w różnych strukturach filtracyjnych, opisałam zidentyfikowane na podstawie wyników eksperymentalnych zjawiska, przedstawiłam ich fenomenologiczne wyjaśnienie oraz opis matematyczny.

Najistotniejsze osiągnięcia w ramach przedłożonego cyklu publikacji są następujące:

- *Określenie wpływu nanowłókien obecnych w strukturze filtracyjnej na zachowanie cząstek*

Inkorporowanie nanowłókien do struktury filtracyjnej i związane z nimi zjawisko przepływu z poślizgiem, wpisuje się w obecne trendy badań nad filtracją aerozoli. W ostatnich latach jest to intensywnie rozwijana koncepcja badawcza. Daje ona możliwość tworzenia materiałów filtracyjnych o dużym wskaźniku jakości, tj. niskim spadku ciśnienia i wysokiej sprawności separacji, która jest tym większa im mniejsza jest średnica włókien. Przy powierzchni nanowłókien gradienty prędkości są znacznie wyższe, aniżeli w przypadku włókien grubszych (efekt krzywizny), co powoduje wzrost depozycji cząstek na nanowłóknach, które stają się dla nich silnym atraktorem. Wzrost spadku ciśnienia dla filtra z cienkimi włóknami w porównaniu do spadku ciśnienia dla filtra z grubszych włókien nie jest znaczący, a nawet, jeśli zastosujemy nanowłókna, może ulec zmniejszeniu. Rozpoznano dwie przyczyny tego zjawiska, tj. niejednorodność porów w przestrzeni filtra i przepływ z poślizgiem.

Intensywność zjawiska oderwania zdeponowanej cząstki stałej lub kropli od włókna i jej powrót do strumienia gazu jest malejącą funkcją średnicy włókna, co jest bardzo ważną obserwacją w kontekście tworzenia filtrów warstwowych czy też gradientowych.

- *Wykazanie wpływu niejednorodności struktury filtracyjnej na transport cząstek*

Struktura filtra związana z losowym rozkładem przestrzennym porów i włókien o różnych średnicach prowadzi do uzyskiwania niższej sprawności filtracji oraz niższego spadku ciśnienia spowodowanego efektem „tunelowania”, czyli przepływem strumienia aerozolu przez

preferencyjne ścieżki wynikające z lokalnie wyższej porowatości filtra oraz "zasłaniania" włókien przez inne znajdujące się w obszarach o niższej porowatości.

Polidispersyjność rozkładu średnic włókien pozwala na uzyskiwanie wyższych sprawności filtracji, w porównaniu do rozkładu monodispersyjnego, co jest efektem udziału cienkich włókien w polidispersyjnej strukturze filtracyjnej, a które nie występują w uśrednionej wartości średnic dla rozkładu monodispersyjnego.

Wykazano, że współczynnik niejednorodności dla sprawności filtracji zależy od średnicy cząstki i rośnie ze wzrostem jej średnicy cząstki dla struktur posiadających w swej strukturze włókna o różnych średnicach (rozkład polidispersyjny). Jest to najprawdopodobniej spowodowane obecnością cienkich włókien w strukturze, które są sprawniejsze dla depozycji cząstek niż włókna grube. Natomiast zależność współczynnika niehomogeniczności dla sprawności dla struktur o włóknach jednakowych (rozkład monodispersyjny) ma odwrotny charakter, tzn. odnotowuje się spadek jego wartości ze wzrostem średnicy cząstki. Tutaj znaczące jest zjawisko preferencyjnego przepływu cząstek, zwłaszcza większych, przez obszary o większej porowatości.

Wykazano, że przy użyciu klasycznej teorii filtracji i zastosowaniu koncepcji średniej średnicy włókna niemożliwe jest poprawne przewidywanie skuteczności filtracji dla wszystkich badanych rzeczywistych filtrów włókninowych o wysokim stopniu polidispersyjności średnic włókien. Udowodniono, że do tego celu bardzo dobrze nadaje się model przepływu częściowo segregowalnego PSFM, uwzględniający rzeczywisty rozkład średnic włókien w filtrze.

- *Wykazanie wpływu struktury powierzchniowej włókna na ruch cząstek w jego pobliżu*

Udowodniono, że pokrycie włókien filtracyjnych nanopreciekami tlenku cynku powoduje poprawę sprawności filtracji, zwłaszcza dla cząstek najbardziej penetrujących przez strukturę filtracyjną (MPPS). Określono wpływ struktury precieków na podstawowe parametry charakteryzujące filtry: skuteczność filtracji i spadek ciśnienia na filtrze rosną wraz z długością precieków ZnO, są natomiast słabo zależne od gęstości liniowej precieków (liczba precieków na długość włókna). Należy również podkreślić tylko niewielką różnicę w spadku ciśnienia pomiędzy włókniną referencyjną i tą z włóknami pokrytymi ZnO, co wynika z faktu, że modyfikacja nie miała wpływu na makroskopową strukturę filtra. Jest to niezwykle istotne przy modyfikowaniu materiałów.

Metoda pokrywania polipropylenowych włókien tlenkiem cynku ewoluowała i finalnie zaproponowano jej rozwinięcie w celu uzyskania jednorodnego pokrycia nanopreciekami w całej objętości filtra, dzięki stymulacji przepływu odczynników przez całą objętość materiału filtracyjnego w fazie wzrostu. Ponadto, zmodyfikowana metoda, poprzez wyeliminowanie etapu plazmowania, jest znacznie tańsza i prostsza, co jest istotne z punktu widzenia jej użyteczności i produkcji na dużą skalę.

- *Zastosowanie nowatorskiej techniki (mikrotomografia) do wyjaśnienia zjawisk zachodzących w strukturze filtracyjnej podczas nieustalanej filtracji cząstek stałych w filtrze włókninowym*

Wyniki badań pokazują, że tomografia komputerowa doskonale nadaje się do obserwacji i odwzorowania wewnętrznej struktury filtra i zawartych w nim depozytów. Poszerzyły one istniejący stan wiedzy na temat bardzo złożonej natury filtracji wgłębnej w stanie niestacjonarnym w filtrach włókninowych i umożliwiły zrozumienie zjawisk zachodzących w ich wnętrzu. Do tej pory były one rodzajem "czarnych skrzynek", dlatego uważam to osiągnięcie za szczególnie istotne w dziedzinie filtracji aerozoli, a użytą metodę badawczą za nowatorską.

Najważniejsze wnioski płynące z tej części cyklu:

1. Rozkład przestrzenny cząstek zatrzymanych w filtrze zależy od ich początkowej depozycji na czystych włóknach oraz od zjawiska porywania i redepozycji w głębszych warstwach materiału. Wykazano, że struktura filtra wpływa na ten proces.
2. Analizy tomografem komputerowym potwierdziły, że cząstki podczas procesu filtracji przemieszczają się w strukturze filtracyjnej, ale jej nie opuszczają w żadnych warunkach procesowych, co zostało zweryfikowane przez detekcję cząstek za pomocą licznika cząstek oraz poprzez pomiar masy filtrów.
3. Zaobserwowano, że im większa prędkość strumienia powietrza (odpowiadająca niższej porowatości filtra), tym większą część objętości materiału filtra zajmują depozyty, co jest bardziej widoczne w mikrofiltrach. W przypadku nanofiltrów depozyty znajdują się w zewnętrznej warstwie i tworzą zwarte struktury, wynikające z wysokiej gęstości upakowania i silnych połączeń adhezyjnych między cząstkami, co skutkuje redukcją efektu wtórnego porywania.
4. Ruch depozytów wpływa na zwiększenie pojemności pyłowej materiału filtra, a tym samym na wydłużenie jego cyklu życia.
5. Wyższe wartości pracy adhezji skutkują lepszą przyczepnością i wyższą efektywnością osadzania cząstek na włóknach. Dla niskich wartości pracy adhezji cząstki tworzą „monowarstwę” na powierzchni kolektora, a zderzenia pomiędzy cząstką zawieszoną w gazie i cząstką zdeponowaną są nieefektywne, tzn. nie prowadzą do depozycji. Cząstki o niskich wartościach pracy adhezji są również bardziej podatne na reemisję do strumienia płynu, natomiast dla wyższych wartości pracy adhezji obserwuje się wzrost dendrytów.
6. Poznanie zjawiska reemisji cząstek w strukturze filtra oraz zjawiska adhezji cząstek i kolektora pomoże w opracowaniu procedur przydatnych w projektowaniu włókninowych filtrów wgłębnych do różnych zastosowań, o wysokiej skuteczności i dużej pojemności pyłowej, charakteryzujących się długim czasem użytkowania.

- *Opracowanie nowatorskiej koncepcji filtrów gradientowych wykonanych techniką melt-blown*

Nowy filtr gradientowy powstał w jednym cyklu produkcyjnym, podczas którego zmieniano parametry procesowe, by uzyskać strukturę, w której średnica włókien oraz porowatość zmieniają się łagodnie wzdłuż grubości warstwy filtracyjnej. Zapewnił on wysoką sprawność filtracji, brak efektu resuspensji cząstek z filtra, dużą pyłochłonność oraz powolny

wzrost oporów przepływu w trakcie filtracji, co przekładało się na długi czas użytkowania filtra. Kierunek projektowania struktur gradientowych był efektem wcześniejszych badań nad systemami wielowarstwowymi składającymi się z trzech różnych materiałów filtracyjnych o różnych średnicach włókien i różnych porowatościach. Biorąc pod uwagę separację cząstek stałych i kropli, optymalnym okazał się układ, który jako pierwszą warstwę miał tę o najgrubszych włóknach, rzędu kilku mikrometrów (prefiltr), potem warstwę nanowłókien (filtr zasadniczy) i na koniec też warstwę z włókien mikrometrycznych, ale mniejszych od tych z warstwy pierwszej (jako podkład dla nanowarstwy).

- *Wyjaśnienie zjawisk transportu nanocząstek w strukturach włókninowych*

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że morfologia nanocząstek nie ma wyraźnego wpływu na skuteczność ich separacji z powietrza. Dominującym mechanizmem depozycji jest dyfuzja brownowska, co znalazło potwierdzenie w wynikach obliczeń (96–99% ogólnej skuteczności pojedynczego włókna wynika ze sprawności mechanizmu dyfuzyjnego).

W modelu przepływu całkowicie segregowalnego wprowadzono parametr s jako miara intensywności segregacji przepływu strumienia aerozolu, który okazał się być zależny od średnicy nanocząstek (dla cząstek submikronowych i mikronowych, był on niezależny od średnicy, a tylko od struktury filtra i prędkości przepływu powietrza). W przypadku nanocząstek mamy dwa rywalizujące ze sobą zjawiska transportu cząstek. Po pierwsze konwekcję, prowadzącą do wzdłużnej segregacji przepływu, zachodzącej wzdłuż głównego kierunku przepływu gazu przez filtr. Po drugie, dyfuzję brownowską, która powoduje poprzeczne do tego kierunku mieszanie nanocząstek, co ostatecznie powinno zmniejszyć efekt segregacji konwekcyjnej. Zaproponowana zaawansowana fenomenologicznie interpretacja zachowania nanocząstek w strukturach włókninowych ma charakter nowatorski.

- *Wyjaśnienie zjawisk zachodzących podczas filtracji aerozoli mieszanych (ciało stałe i ciecz) w filtrach włókninowych*

Przeprowadzone badania wypełniły lukę w filtracji cząstek dotyczącą separacji aerozoli mieszanych. Zaproponowany model numeryczny opisuje zjawiska zachodzące podczas ekspozycji filtra na aerozol stały i ciekły, które do tej pory nie doczekały się omówienia w literaturze naukowo-technicznej, czyli wpływ zdeponowanych cząstek stałych na efektywność osadzania kropli, czy też kształt i wielkość depozytów cząstek stałych w przypadku wcześniejszego zwilżenia włókien kroplami cieczy.

W przypadku eksponowania filtra najpierw na cząstki stałe, a następnie krople, jako główny mechanizm zmian sprawności i spadku ciśnienia, założono możliwość deformacji dendrytów, a następnie ich kompaktowania na skutek oddziaływania ze zdeponowaną cieczą. Główne siły odgrywające tutaj rolę to siły kapilarne oraz siły wynikające z istnienia mostków cieczowych. W przypadku odwrotnym, czyli gdy najpierw są podawane na filtr krople, a następnie cząstki stałe, efekt jest uzależniony od ilości cieczy zdeponowanej na włóknach. Jeśli

warstwa ta jest cienka wówczas, powoduje powstawanie bardziej zwartych depozytów, a jeśli jest grubsza utrudnia ona zatrzymywanie cząstek stałych.

Dodatkowym wkładem w rozwój dyscypliny naukowej jest opracowanie modelu, który można wykorzystać do śledzenia ruchu cząstek stałych i kropli w strukturze włókninowej oraz ich depozycji na włóknach. Uwzględnia on dodatkowo reorganizację depozytów poprzez uwzględnienie sił działających pomiędzy cząstkami stałymi a ciekłym filmem wewnątrz depozytów.

- *Określenie wpływu parametrów procesowych stosowanych w metodzie rozdmuchu z roztworu na strukturę otrzymywanych biodegradowalnych mat filtracyjnych, a tym samym na ich sprawność i spadek ciśnienia*

Potwierdzono, że za pomocą techniki rozdmuchu polimeru z roztworu (SBS) można wyprodukować biodegradowalny filtr z polilaktydu, odpowiedni do separacji nanocząstek z powietrza. Wykazano, że przy zmniejszaniu stężenia stosowanego roztworu polimeru maleje średnica wytwarzanych włókien. Ponadto, dzięki uzyskanej zależności sprawności filtracji od ilości użytego polimeru, można przewidzieć, jaka jego ilość będzie potrzebna, aby uzyskać filtr do konkretnego zastosowania o wymaganej sprawności filtracji. Uzyskane wyniki są bardzo obiecujące i stanowią krok w kierunku produkcji skutecznych biodegradowalnych filtrów do oczyszczania powietrza.

Zastosowanie różnych technik badawczych umożliwiło przeprowadzenie unikatowych pomiarów i uzyskanie wyników mających zarówno znaczenie poznawcze, jak i aplikacyjne, które stanowią oryginalny i nowatorski wkład w rozwój dyscypliny inżynieria chemiczna. Służą one lepszemu interpretowaniu podstawowych zjawisk składających się na proces filtracji i umożliwiają opracowanie wytycznych do procedur projektowania i optymalizacji filtrów włókninowych do różnych zastosowań. W ramach prac, z powodzeniem zastosowano badane filtry do nowej aplikacji, tj. do oczyszczania gazu złożowego, co jest praktycznym potwierdzeniem potencjału jaki posiadają te materiały.

4.4. Przyszłe cele badawcze

- Budowa stanowiska do badania aerozoli mieszanych (jednoczesne podawanie cząstek o różnej morfologii) i analiza procesu.
- Ocena biodegradowalności filtrów wykonanych techniką rozdmuchu z roztworu polilaktydu.
- Analiza procesu filtracji w siatkach z włókien metalowych do specjalnych zastosowań, ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska odbicia cząstek od powierzchni włókien.
- Projektowanie gradientowych filtrów wykonanych z polimerów biodegradowalnych techniką SBS.

- Ocena wpływu ładunku zgromadzonego na włóknach z PLA na sprawność filtracji (m.in. stabilność ładunku, różne sposoby ładowania, różne sposoby pomiaru ładunku na włóknach).
- Modyfikacja włókien melt-blown w celu uzyskania filtrów multifunkcyjnych.

4.5. Bibliografia

1. Bałazy A., Toivola M., Reponen T., Podgórski A., Zimmer A., Grinshpun A.S., Manikin-based performance evaluation of N95 filtering-facepiece respirators challenged with nanoparticles, *The Annals of Occupational Hygiene*, 50, 59–269, 2006.
2. Li Bao, Kazuya Seki, Hitoshi Niinuma, Yoshio Otani, Ratna Balgis, Takashi, Ogi, Leon Gradon, Kikuo Okuyama, Verification of Slip Flow in Nanofiber Filter Media through Pressure Drop Measurement at Low-Pressure Conditions, Vol. 159, p.100-107, 2016.
3. Choi H.-S., Vaseem M., Kim S.G., Im Y.-H., Hahn Y.-B., Growth of high aspect ratio ZnO nanorods by solution process: Effect of polyethyleneimine. *J. Solid State Chem.*, 189, 25–31, 2012.
4. Fridlander S.K., *Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics*, Oxford, University Press, New York, 2000.
5. G. Kasper, S. Schollmeier, J. Meyer, J. Hoferer, The collection efficiency of a particle-loaded single filter fiber, *J. Aerosol Sci.* 40, 993–1009, 2009.
6. Kenanakis, G., Vernardou, D., Katsarakis, N., Light-induced self-cleaning properties of ZnO nanowires grown at low temperatures. *Appl. Catal. A: General*, 411–412(0), 7–14, 2012.
7. Maricq M.M., Xu N., The effective density and fractal dimension of soot particles from premixed flames and motor vehicle exhaust, *J. Aerosol Sci.*, 35, 1251–1274, 2004.
8. R. Przekop, A. Moskal, L. Gradon', Lattice-Boltzmann approach for description of the structure of deposited particulate matter in fibrous filters, *J. Aerosol Sci.* 34, 133–147, 2003.

4. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Kopie potwierdzeń odbycia staży zagranicznych stanowią treść **załącznika nr 7**, natomiast kopie dokumentów potwierdzających międzynarodową i międzywydziałową współpracę naukową stanowią treść **załącznika nr 8** do niniejszego wniosku.

4.1. Współpraca z ośrodkami naukowymi

- W ramach współpracy bilateralnej w grudniu 2008r. odbyłam staż w **Institute for Experimental Physics, University of Vienna**, gdzie w zespole prof. W. Szymanskiiego

prowadziłam badania doświadczalne w Aerosol Physics and Environmental Physics Laboratories dotyczące elektrohydrodynamicznej generacji nanoaerozoli, ich charakteryzacji oraz separacji z powietrza za pomocą filtrów włókninowych mechanicznych oraz w filtrach elektretowych, zawierających naładowane elektrostatycznie włókna.

Uzyskane wyniki zostały opublikowane: jeden artykuł w czasopiśmie z listy filadelfijskiej tj. Aerosol Science and Technology (**H12**) oraz dwa artykuły w czasopiśmie Inżynieria i Aparatura Chemiczna. Ponadto, zaprezentowano je na trzech konferencjach międzynarodowych: i) European Aerosol Conference, Karlsruhe, Germany, September 6-11, 2009, dwie prezentacje; ii) International Aerosol Conference IAC, Helsinki, Finland, August 29 - September 3, 2010, jedna prezentacja; iii) European Aerosol Conference EAC, Manchester, England, 4-9 September 2011, jedna prezentacja i jednej konferencji krajowej: Jubileuszowa Ogólnopolska Konferencja Naukowa Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Gdańsk, 6-9.09.2010, dwie prezentacje.

- **Współpraca z Norweskim Instytutem Badania Wody NIVA.** W roku 2015 zainicjowałam współpracę z Urban Environments and Infrastructure section tamtejszego instytutu. W ramach prac przeprowadzono wstępne badania w celu opracowania funkcjonalizowanych różnego rodzaju nanocząstkami włókninowych filtrów do uzdatniania wody, które mogą być stosowane w mobilnych systemach oczyszczania, w sytuacjach awaryjnych, klęsk żywiołowych oraz w aplikacjach przemysłowych, m.in. w przemyśle naftowym, gazowym. Efektem współpracy był wniosek projektowy „Functionalized filter media for process intensification in water treatment” złożony w ramach konkursu M-ERA.NET. Obejmował on kompleksowe podejście do projektowania filtrów kompozytowych, optymalizację wspomaganą modelowaniem matematycznym, ocenę efektywności nowych struktur, powiększanie skali i produkcję.

- **Współpraca z Pracownią Zagrożeń Biologicznych Centralnego Instytutu Ochrony Pracy - Państwowego Instytutu Badawczego (CIOP-PIB) w Warszawie** kierowaną przez prof. dr hab. n. med. R. Górnego w ramach projektu POB_TM1 Technologie Materiałowe Inicjatywa Doskonałości Uczelnia Badawcza na Politechnice Warszawskiej. Celem badań było przetestowanie zaproponowanego przeze mnie rozwiązania materiałowego, tj. kompozytowego polipropylenowego filtra włókninowego pokrytego tlenkiem cynku, pod kątem skuteczności oczyszczania powietrza z aerozoli biotycznych (bakterie, wirusy), w warunkach symulujących

ich przykładowe zastosowanie, tj. np. w systemie wentylacyjno-klimatyzacyjnym. Oceniono przeżywalność drobnoustrojów: bakterii (*Staphylococcus aureus*) i wirusa (bakteriofag Phi X174) na filtrach polipropylenowych natywnych oraz zmodyfikowanych tlenkiem cynku w różnych warunkach procesowych (różna wilgotność względna powietrza, dostęp światła lub jego brak). Efektem tej współpracy jest przyjęty 21.09.2023 do druku w czasopiśmie *Journal of Environmental Chemical Engineer* artykuł pt. „*Functionalized Zinc Oxide Nanorods – Polypropylene Nonwoven Composite with High Biological and Photocatalytic Activity*” oraz wystąpienia konferencyjne na: międzynarodowej konferencji *European Aerosol Conference (EAC)* 30.08-03.09.2021 oraz Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej „Rozwiązania i technologie XXI wieku”, 8-10.06.2022.

- Współpraca z **Pracownią Aerozoli, Filtracji i Wentylacji Centralnego Instytutu Ochrony Pracy w Warszawie**. Celem prac było zbadanie skuteczności filtracji nanokropki w materiałach stosowanych do produkcji tkaninowych maseczek ochronnych oraz porównanie ich z mechanicznymi włókninami filtracyjnymi, tj. pozbawionymi ładunku elektrycznego. Analizowano również wpływ dodatku różnych włókien syntetycznych w bawełnianych materiałach na sprawność procesu. Ponadto, badano ładunki elektryczne zgromadzone na różnego rodzaju materiałach filtracyjnych oraz sprawdzano jak wpływają na ich stabilność takie czynniki jak m.in. czas użytkowania, wilgotność powietrza. Efektem współpracy były dwie prace dyplomowe obronione na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej.

4.2. Współpraca z przemysłem (ośrodki badawczo-rozwojowe)

- Wieloletnia współpraca (od 2006 r. do dzisiaj) z firmą **Amazon Filters sp. z o.o.** (wcześniej *Microspun Products, Secura Nova*) w ramach umowy joint venture z Wydziałem Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej. Firma ta dostarcza przemysłowe rozwiązania w zakresie filtracji cieczy i gazów, projektuje i wykonuje systemy filtracyjne, prowadzi prace naukowo-badawcze w zakresie nowych technologii filtracyjnych. Moja współpraca z firmą dotyczyła m.in. podwyższania efektywności filtrów włókninowych z zachowaniem niskich oporów przepływu, wydłużania czasu ich użytkowania, poprzez opracowanie ich struktur, projektowanie materiałów filtracyjnych zawierających nanowłókna, opracowanie technologii wytwarzania włókien z ładunkiem elektrycznym oraz z różnymi dodatkami, które dodatkowo nadawałyby materiałom nowe właściwości np. bakteriobójcze czy

fotokatalityczne. Współpraca ta zaowocowała licznymi, unikalnymi rozwiązaniami technologicznymi, które zostały wdrożone do produkcji, zapewniła implementacje nowych procesów filtracyjnych oraz nowych wyrobów. Pod kierownictwem prof. Leona Gradonia powstała technologia produkcji materiałów włókninowych w oparciu o metodę melt-blown (rozdmuch stopionego polimeru), która pozwala na wytwarzanie odpowiedniej struktury filtracyjnej o określonym rozkładzie średnic włókien, porowatości i grubości, dopasowanej do danego zastosowania i wielkości oczyszczanego strumienia.

W 2014 roku wygrałam konkurs na **półroczny staż w konkursie „Staż sukcesem naukowca”** (realizowany na Mazowszu przez Poznański Akademicki Inkubator Przedsiębiorczości w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego), którego celem było wsparcie transferu wiedzy w środowisku nauki i biznesu. Dzięki temu mogłam zapoznać się ze specyfiką pracy w biznesie, dowiedzieć się czego od nauki potrzebuje rynek, sprawdzić w praktyce swoją wiedzę oraz umiejętności, jakie zdobyłam na uczelni. Staż realizowałam w firmie Secura Nova. Jego celem było wytworzenie włókninowych materiałów filtracyjnych z wykorzystaniem nanokompozytowych granulatów. Moim zadaniem było przeprowadzenie rozruchu maszyny dwuślimakowej (dwa ślimaki w cylindrze, umieszczone współbieżnie) do wytwarzania różnego typu granulatów z domieszkami. Zalety wyłaczarki dwuślimakowej w porównaniu z jednoślimakową to głównie lepsze wymieszanie materiałów, istotne dla wytwarzania kompozytów (polimer z różnego rodzaju dodatkami) oraz brak efektu cofania polimeru, który występuje w wyłaczarce jednoślimakowej. Zastosowałam dwa rodzaje dodatków, t.j. nanocząstki srebra oraz nanorurki węglowe, które miały na celu zwiększenie powierzchni kontaktu, zwiększenie szorstkości powierzchni (zapobiegające zarastaniu powierzchni), polepszenie właściwości adhezyjnych oraz chemiczną destrukcję niepożądanych w płynie związków.

- Współpraca z firmą **Cummins Filtration Ltd (USA)**, światowym producentem filtrów, w ramach umowy badawczej „Optimisation technique for filter production and mathematical description of filtration process utilizing lattice-Boltzmann models”. Byłam kierownikiem części eksperymentalnej obejmującej analizę elementarnych zjawisk zachodzących w procesie nieustalanej filtracji cząstek aerozolowych o różnej morfologii w projektowanych strukturach włókninowych, zarówno jedno-, jak i wielowarstwowych. Na podstawie otrzymanych wyników technologia produkcji była odpowiednio modyfikowana tak, by otrzymać produkty konkurencyjne na rynku.

Jednym z efektów współpracy jest zaliczany do cyklu artykuł: **(H11) Jackiewicz, A., Podgórski, A., Gradoń, L., Michalski, J. (2013). Nanostructured media to improve the performance of fibrous filters. KONA Powder and Particle Journal, 244–255.**

- Współpraca z firmą **Palas GmbH (Niemcy)**, która jest wiodącym producentem zaawansowanej aparatury do generacji, charakterystyki oraz detekcji cząstek aerozolowych. Firma współpracuje z różnymi ośrodkami badawczymi i stale rozwija precyzyjne urządzenia do różnych zastosowań. Wspólnie pracowaliśmy nad udoskonaleniem stanowiska do badania procesu filtracji nanocząstek stałych i ciekłych z powietrza Palas MFP Nano Plus. Moją rolą było testowanie nowej aparatury w swoim laboratorium i dawanie informacji zwrotnej do firmy, w celu wykonania odpowiednich modyfikacji sprzętu. Prace te przyczyniły się do powstania nowej linii produktów w firmie.

Ekspertyzy na zlecenie różnych przedsiębiorców, m.in.:

- Badanie skuteczności dostarczonych włóknin filtracyjnych i analiza warunków spełnienia przez nie normy PN-EN 779. Pomiary wykonałam na zlecenie **Fabryki Włóknin FILTRY-HAFT Sp. z o.o.**, Gorzów Wielkopolski, 2009-2010.
- Analizy techniczne materiałów eksploatacyjnych do pociągów metra wykonane na zlecenie spółki **Metro Warszawskie Sp. z o.o.**, 2018;
- Badanie parametrów pracy dostarczonych włóknin filtracyjnych do masek ochronnych. Pomiary wykonałam na zlecenie firmy **BROYX**, 2020-2021;
- Badania procesu rozwłókniania politlenku etylenu. Badania wykonane na zlecenie firmy **ATANOX** produkującą antysmogowe urządzenia filtracyjne, 2021.

4.3. Współpraca wewnątrz Politechniki Warszawskiej

- Współpraca z **Wydziałem Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej**, której wynikiem są liczne wystąpienia konferencyjne, prace dyplomowe obronione na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej PW oraz publikacje (m.in. **H4, H5, H7 i H8**). Wspólnie realizowaliśmy projekt **LIDER III z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju** pt. „Nowe metody przygotowania gazu złożowego do celów technologicznych i dystrybucji w oparciu o nowoczesne materiały filtracyjne” (LIDER/13/97/L-3/NCBR/2012, budżet projektu: 1.199.795 PLN, 01.01.2013 - 31.12.2015), którego byłam kierownikiem. W ramach współpracy opracowywaliśmy nowe materiały filtracyjne do oczyszczania gazu złożowego.

Modyfikowaliśmy polipropylenowe filtry wykonane techniką rozdmuchu stopionego polimeru nanocząstkami krzemionki.

Ponadto, pracowaliśmy wspólnie nad analizą zachowania się cząstek w filtrze podczas nieustalanej filtracji, wykorzystując nowoczesne techniki m.in. tomografię komputerową. Wyznaczaliśmy siły adhezji cząstek z włóknami polipropylenowymi wykorzystując mikroskopię sił atomowych (AFM).

5. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

5.1. Osiągnięcia dydaktyczne

Moja działalność dydaktyczna rozpoczęła się w 2005 podczas studiów doktoranckich i jest do dnia dzisiejszego związana z Wydziałem Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej oraz z Wydziałem Chemicznym Politechniki Warszawskiej. Skupia się ona na trzech głównych obszarach: prowadzeniu zajęć dydaktycznych ze studentami, promotorstwem prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich oraz pełnienie funkcji promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim.

Prowadziłam następujące zajęcia dydaktyczne ze studentami:

- Procesy Podstawowe - projekt, prowadzący, dla kierunku inżynieria chemiczna, lata 2006-2008,
- Laboratorium Procesów Oczyszczania Cieczy - zajęcia laboratoryjne, prowadzący, dla kierunku inżynieria chemiczna, lata 2006-2008,
- Laboratorium z Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych - zajęcia laboratoryjne, prowadzący, dla kierunku inżynieria chemiczna, lata 2010-2011,
- Laboratorium Polimerów - zajęcia laboratoryjne (**ćwiczenia autorskie**), prowadzący, dla kierunku inżynieria chemiczna, lata 2015-2017,
- Aparatura Procesowa - zajęcia laboratoryjne, prowadzący, dla kierunku inżynieria chemiczna oraz technologia chemiczna, lata 2010 - 2016 , 2022,
- Inżynieria Chemiczna - ćwiczenia, prowadzący, dla kierunku technologia chemiczna (profil ogólnoakademicki), lata 2011 - 2023,
- Inżynieria Chemiczna i Procesowa - ćwiczenia, prowadzący, dla kierunku technologia chemiczna (profil praktyczny), lata 2020 - 2023,

- Procesy Oczyszczania Gazów - wykład, kierownik przedmiotu, dla kierunku inżynieria chemiczna, w latach 2011 - 2023,
- Laboratorium Oczyszczania Gazów - zajęcia laboratoryjne (**ćwiczenia autorskie**), kierownik przedmiotu, dla kierunku inżynieria chemiczna, w latach 2021 - 2023,

Promotorstwo prac dyplomowych

Jestem osobą kierującą i opiekunem merytorycznym prac inżynierskich i magisterskich realizowanych przez studentów kierunku Inżynieria Chemiczna na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej oraz we współpracy w jednostkami zewnętrznymi, zarówno z otoczenia naukowego, jak i przemysłowego.

W latach 2011-2023 byłam opiekunem **23 obronionych dyplomów magisterskich** (w tym jeden dyplom realizowany na Uniwersytecie w Alcoy w Hiszpanii) oraz **21 obronionych dyplomów inżynierskich**. Wykonałam także **14 recenzji prac dyplomowych**.

Wykaz prac dyplomowych magisterskich studentów Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej, w których pełniłam lub pełnię rolę promotora:

1. Agata Piros: Badanie pyłochłonności wkładów filtracyjnych produkowanych metodą rozdmuchu z roztworu, w toku
2. Dominika Malarczyk: Badanie bakterio- i grzybobójczych właściwości kompozytowych materiałów filtracyjnych, w toku (**współpraca z CIOP-PIB w Warszawie**)
3. Julia Osełkowska: Badania ładunku elektrycznego zgromadzonego na włóknach polimerowych materiałów filtracyjnych, 2023
4. Monika Przygocka: Badanie zjawiska odbicia cząstek aerozolowych od powierzchni włókien filtrów metalowych, 2023
5. Michałak Aleksandra: PRACA UTAJNIONA, 2022 (**badania dla firmy ATANOX**)
6. Owczarek Rafał: Modyfikacja powierzchni włókien polimerowych materiałami węglowymi, 2022
7. Chrzanowski Adrian: Opracowanie metody pokrywania polimerowych włókien nanopreczykami tlenku cynku i sprawdzenie ich zdolności filtracyjnych, 2022
8. Mika Karol Stanisław: Badanie właściwości filtracyjnych mieszkankowych materiałów polimerowych wytworzonych metodą rozdmuchu z roztworu, 2020

9. Dmowska Magda: Wpływ ładowania włókien polimerowych filtrów włókninowych na separację aerozoli, 2019
10. Chojnacka Karolina Irena: Badanie właściwości separacyjnych filtrów kompozytowych, 2019
11. Niedziółka Marta Katarzyna: Separacja cząstek aerozolowych w filtrach polimerowych pokrytych aerożelami, 2018
12. Mirek Adam: Badanie właściwości antybakteryjnych filtrów polimerowych o zmodyfikowanych włóknach, 2017
13. Zuzga Maria Magdalena: Badanie wpływu modyfikacji włókien polimerowych na skuteczność oczyszczania gazów, 2017
14. Wiercińska Magdalena: Materiały modyfikowane powierzchniowo oraz materiały kompozytowe do zastosowań filtracyjnych, 2017
15. Jeromkin Michał: Naprzemienna filtracja aerozoli ciekłych i stałych na filtrach włókninowych, 2017
16. Królikowska Beata: Wpływ modyfikacji powierzchni włókien polipropylenowych na ich własności separacyjne, 2016
17. Piel Angelika Natalia: Badanie oddziaływań cząstka - włókno podczas separacji z płynu cząstek aerozolowych, 2016 (**współpraca z WIM PW**)
18. Sołtys Karolina Magdalena: Badanie filtracji nanocząstek w filtrach włókninowych, 2015
19. Strzelczak Grzegorz Kamil: Analiza zachowania depozytów w filtrze włókninowym podczas filtracji nieustalonej, 2014 (**współpraca z WIM PW**)
20. Gąsowska Paulina: Badania filtracji aerozoli w gradientowych filtrach włókninowych, 2014
21. Werner Łukasz Andrzej: Badanie właściwości modyfikowanych polimerów do zastosowań filtracyjnych, 2014 (**realizowany na Uniwersytecie w Alcoy w Hiszpanii**)
22. Bach Magdalena, Górka Aleksandra Teresa: Badanie efektywności usuwania z gazu cząstek stałych i ciekłych przy użyciu filtrów włókninowych, 2014
23. Niesłuchowska Wioletta: Filtracja aerozoli na filtrach z siatki metalowej, 2012
24. Stępień Anna: Badanie nieustalonej filtracji aerozoli w filtrach włókninowych, 2012
25. Kindracka-Rumak Wioletta: Badanie penetracji aerozoli przez polidispersyjne filtry włókninowe, 2011
26. Gałązka Marcin: Badanie dyspersji aerozoli w niehomogenicznych filtrach włókninowych, 2011

Wykaz prac dyplomowych inżynierskich studentów Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej, w których pełniłam lub pełnię rolę promotora:

1. Ivanna Sierova: Wizualizacja depozycji cząstek aerozolowych we wgłębnych filtrach włókninowych, w toku
2. Bołtryk Michał Kajetan: Badanie skuteczności filtracji nanokropli w materiałach używanych jako maseczki ochronne, 2022 (**współpraca z CIOP-PIB w Warszawie**)
3. Przygocka Monika Zuzanna: Badanie zdolności filtracyjnych biodegradowalnych materiałów włókninowych dla szerokiego spektrum średnic cząstek aerozolowych, 2022
4. Dudek Paweł: Badanie ładunków elektrycznych zgromadzonych na polimerowych włóknach filtracyjnych, 2021 (**współpraca z CIOP-PIB w Warszawie**)
5. Piros Agata: Stanowisko do badania filtracji cząstek submikronowych i mikronowych w płaskich włókninowych materiałach filtracyjnych, 2021
6. Rendaszek Natalia: Stanowisko do badania filtracji nanocząstek w płaskich włókninowych materiałach filtracyjnych, 2021
7. Michalak Aleksandra: Stanowisko do produkcji polimerowych filtrów włókninowych techniką melt-blown, 2020
8. Korszla Kinga Patrycja: Charakterystyka procesu filtracji wody, 2018
9. Matyskiewicz Małgorzata: Filtracja aerozoli w filtrach polimerowych o zmodyfikowanych włóknach, 2018
10. Olkiewicz Aleksandra: Badanie filtracji aerozoli we włókninowych filtrach mieszkankowych, 2018
11. Niedziółka Marta Katarzyna: Filtracja cząstek aerozolowych w płaskich filtrach wykonanych z różnych materiałów, 2017
12. Madejska Agnieszka: Modyfikacje powierzchni włókien filtracyjnych w celu nadania im specjalnych właściwości, 2017
13. Cyraska Małgorzata: Badanie procesu filtracji nanocząstek stałych i ciekłych w filtrach włókninowych, 2016
14. Mirek Adam: Zastosowanie modeli matematycznych do opisu danych doświadczalnych filtracji nanocząstek w filtrach włókninowych, 2016
15. Fuz Maja: Wpływ zaimplementowania ładunku na włóknach filtrów polipropylenowych na depozycję cząstek aerozolowych, 2016
16. Morga Marta: Filtracja nanoaerozoli w filtrach elektretowych, 2015
17. Nguyen Minh Phuc: Charakterystyka procesu nanofiltracji, 2015

18. Gajownik Monika: Analiza pracy filtrów włókninowych o różnej morfologii, 2014
19. Bugalska Aleksandra Jolanta: Stanowisko do filtracji nanoaerozoli w filtrach włókninowych - opracowanie metodyki badawczej, badania wstępne, 2014
20. Gełczewski Adam Rafał: Zmiana parametrów charakteryzujących filtry włókninowe podczas ich obładowywania cząstkami aerozolowymi, 2013
21. Witkowski Damian: Analiza porównawcza sprawności separacji cząstek aerozolowych na filtrach włókninowych o różnych strukturach, 2012
22. Pawlak Aneta: Sposoby zwiększania początkowej sprawności odpylania filtrów włókninowych, 2012

Pełnienie funkcji promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim

Opieka naukowa nad doktorantem w charakterze **promotora pomocniczego** - Łukasz Werner, praca pt. „Filtracja nanocząstek w polimerowych strukturach włókninowych”, promotor prof. dr hab. inż. Leon Gradoń, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej PW, data obrony 20.10.2020 r.

Najważniejsze osiągnięcia dydaktyczne

- Współautorstwo skryptu - Moskal Arkadiusz, Jackiewicz-Zagórska Anna Izabella, Penconek Agata Bożena „Podstawy inżynierii chemicznej i procesowej. Zadania z elementami teorii” 2016, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN 9788378145967, 213 s., nagrodzonego nagrodą zespołową II stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia dydaktyczne w roku 2016/2017.
- Opiekun Koła Naukowego Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej w latach 2013-2020. W tych latach Koło kilkakrotnie zdobywało prestiżowe nagrody za swoją działalność oraz prowadzone projekty, m.in. te przyznawane przez Studencki Ruch Naukowy – StRuNa pod patronatem Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. W tym czasie też powstała nagradzana i doceniana przez międzynarodowe środowisko naukowe konferencja *European Young Engineers Conference (EYEC)*, która jest organizowana do dnia dzisiejszego. Rozkwitała też działalność popularyzująca naukę - członkowie Koła organizowali zajęcia dla dzieci, młodzieży i dorosłych w ramach pikników naukowych, festiwali.
- Nagroda zespołowa I stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia dydaktyczne w latach 2020/2021.

Doskonalenie zawodowe

W ramach podnoszenia kwalifikacji zawodowych w latach 2013 - 2023 uczestniczyłam w wielu kursach, szkoleniach oraz dostałam się na prestiżowe studia podyplomowe *Akademia Menedżera* realizowane na Akademii Leona Koźmińskiego organizowane przez Dział ds. Szkoleń w ramach zadania 48 - Kompetentny Lider z projektu „NERW PW. Nauka-Edukacja-Rozwój-Współpraca” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. Niektóre z nich były to szkolenia akredytowane i kończyły się egzaminami pozwalającymi na uzyskanie uznawanych na całym świecie certyfikatów w zakresie zarządzania m.in. projektami, ryzykiem, co może znacząco ułatwić aplikowanie o środki krajowe i międzynarodowe na projekty badawcze, naukowe czy dydaktyczne, prowadzenie takich projektów, czy też zarządzanie zespołem badawczym. Część z odbytych szkoleń była dedykowana nabywaniu nowych umiejętności w procesie dydaktycznym, wykorzystywaniu w nim nowoczesnych narzędzi oraz innowacyjnych technik.

Studia podyplomowe:

- „Akademia Menedżera” na Akademii Leona Koźmińskiego, organizowane przez Dział ds. Szkoleń w ramach zadania 48 - Kompetentny Lider, projektu NERW PW, 2021-2022.

Szkolenia:

- warsztaty “Innovation Seminar annex Matchmaking Event on Functional Materials”, Ghent, Belgium, 23.10.2013 r.;
- szkolenie wyjazdowe organizowane przez firmę PALAS – Aerosol Technology z obsługi nowoczesnej aparatury do badań procesu filtracji cząstek stałych i ciekłych, Karlsruhe, Niemcy, 2012 i 2014 r.;
- warsztaty „Warsztat Aktywnej Dydaktyki” organizowane przez Uniwersytet Otwarty Uniwersytetu Warszawskiego, 5.11.2014 r.;
- szkolenie „Prowadzenie efektywnych zebrań i wystąpień publicznych. Moduł II. Wystąpienia publiczne”, organizowane w ramach zadania 48 - Kompetentny Lider, projektu NERW PW, 20.01.2021 r.;
- szkolenie „Efektywne prowadzenie spotkań w formule online”, organizowane w ramach zadania 48 - Kompetentny Lider, projektu NERW PW, 9-10.03.2021 r.;
- szkoleniu z ochrony praw własności intelektualnej, realizowane w ramach zadania 48 projektu „NERW PW. Nauka – Edukacja – Rozwój –

Współpraca” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, 4.11.2021 r.;

- akredytowane szkolenie „Metodyka zarządzania projektami Prince2 Foundation”, szkolenie w ramach projektu NERW PW, 06-08.04.2022 r., **posiadam międzynarodowy certyfikat potwierdzający zdany egzamin;**
- akredytowane szkolenie „Zarządzanie zmianą Change Management Foundation”, szkolenie w ramach projektu NERW PW, 25-27.04.2022 r; **posiadam międzynarodowy certyfikat potwierdzający zdany egzamin;**
- akredytowane szkolenie „Metodyka zarządzania ryzykiem M_o_R Foundation”, szkolenie w ramach projektu NERW PW, 18-20.05.2022 r., **posiadam międzynarodowy certyfikat potwierdzający zdany egzamin;**
- szkolenie „Myślenie wizualne - jak przekazywać treści za pomocą obrazów”, organizowane w ramach zadania 48 - Kompetentny Lider, projektu NERW PW, 20.06.2022 r.;
- szkolenie „Uczelnia wyższa wobec zaburzeń psychicznych i zaburzeń zachowania” organizowane w ramach projektu pt. „Politechnika Warszawska Ambasadorem Innowacji na Rzecz Dostępności” (POWER-EFS), 22 i 29.11.2022 r.;
- III Międzynarodowe Forum Innowacyjnej Edukacji EDU360, 9.12.2022 r.;
- szkolenie „Zasady wsparcia edukacyjnego studentów z różnymi niepełnosprawnościami. Prowadzenie zajęć online dla osób ze specjalnymi potrzebami” organizowane w ramach projektu pt. „Politechnika Warszawska Ambasadorem Innowacji na Rzecz Dostępności” (POWER-EFS), 16.12.2022 r.

5.2. Osiągnięcia organizacyjne

- Sekretarz Komisji Oceny Śródkresowej Doktorantów na Politechnice Warszawskiej, 2022-2023;
- Opiekun Laboratorium Techniki Separacyjnych działającego na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej, 2011-2023;
- Opiekun Koła Naukowego Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej, 2013-2020;
- Członek komitetu naukowego międzynarodowej konferencji EYEC European Young Engineers Conference w latach 2013-2017.

5.3. Popularyzacja nauki

- artykuł w biuletynie Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej Profundere Scientiam nr 9, październik 2013 pt. „Badanie procesu nieustalanej filtracji aerozoli w nowoczesnych materiałach włókninowych”;
- udział w 5. Biennale Fotograficznym Uniwersytetu Śląskiego "Nauka - idea w praktyce" 12.12.2014;
- wykład pt. „Skuteczne filtrowanie” na zaproszenie Gminnego Ośrodka Kultury w Dębem Wielkim, 2018;
- wykłady pt. „Jak i czym filtrować niewidzialne? – o tym jak działają filtry włókninowe” w ramach 26. Festiwalu Nauki w Warszawie, 27-30.09.2022;
- oprowadzanie grup studentów, gości krajowych i zagranicznych odwiedzających Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej PW po laboratoriach, prezentacja sprzętu laboratoryjnego oraz możliwości badawczych;
- prezentacja wyników badań na konferencjach krajowych i międzynarodowych (2007 - 2023) - jestem współautorką ponad **40 wystąpień konferencyjnych, z czego w 29 z nich byłam osobą prezentującą, wygłosiłam jeden wykład na zaproszenie organizatorów 7th European Young Engineers Conference**, (wykaz wystąpień na konferencjach krajowych i międzynarodowych, na których wyniki przedstawiałam osobiście zamieściłam w załączniku nr 4)

6. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

6.1. Nagrody i wyróżnienia

- uzyskanie dyplomu ukończenia studiów wyższych z wynikiem celującym, 30.11.2004;
- nagroda Funduszu Stypendialnego PGNiG S.A. im. Ignacego Łukasiewicza dla autora najlepszej pracy magisterskiej w roku akademickim 2004/2005;
- stypendium Deutscher Akademischer Austauschdienst DAAD (Niemiecka Centrala Wymiany Akademickiej), dzięki któremu mogłam uczestniczyć w trzytygodniowym Summer Academy „Advanced Separation Technologies in Chemical Engineering” organizowanej przez Technische Universität Berlin, 2006;

- wyróżnienie dla najlepszej prezentacji ustnej („Wpływ niehomogeniczności struktury na skuteczność działania filtrów włókninowych”) w Sesji Europejskiej na konferencji Młodzi Naukowcy Wobec Wyzwań Współczesnej Techniki, 26.09.2007;
- „Mazowieckie Stypendium Doktoranckie” przyznawane przez Marszałka Województwa Mazowieckiego dla doktorantów wyróżniających się na polu naukowym, 2009;
- stypendium naukowe dla doktorantów wyróżniających się na polu naukowo-badawczym przyznawane przez Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej, 2009;
- stypendium naukowe „Programu Rozwojowego Politechniki Warszawskiej”, 01.10.2008 - 01.10.2010;
- wyróżnienie Rady Wydziału Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej za rozprawę doktorską pt. "Investigation into filtration of aerosol particles in inhomogeneous fibrous filters", 2010;
- I nagroda w IV Edycji Konkursu FIATA na najlepszą pracę doktorską, 17.02.2011 (konkurs z zakresu tematów będących w kręgu zainteresowań koncernu FIAT; daje możliwość wykorzystania uzyskanych wyników badań w praktyce);
- wyróżnienie w formie wyboru mojej sylwetki do zaprezentowania na wystawie pt. „Maria Skłodowska-Curie w służbie nauki wczoraj i dziś” organizowanej w Parlamencie Europejskim w Brukseli, na której przedstawiono dokonania współczesnych polskich naukowców odnoszących sukcesy naukowe w dziedzinie chemii, medycyny i fizyki, 2011;
- nagroda indywidualna JM Rektora Politechniki Warszawskiej za osiągnięcia naukowe, 2011;
- stypendium dla Młodego Doktora Politechniki Warszawskiej wyróżniającego się w wykonywaniu działalności naukowo-badawczej przyznane przez Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej w drodze konkursu, 01.01.2013 - 01.01.2015;
- wyróżnienie na 5. Biennale Fotograficznym Uniwersytetu Śląskiego "Nauka - idea w praktyce" za najlepsze zdjęcie w kategorii „Człowiek – świat wokół nas” - zdjęcie pt. „Wplątanie polimerowych włókien” powstało podczas realizacji projektu „Staż Sukcesem Naukowca”, wernisaż odbył się 12.12.2014r. w gmachu Biblioteki Śląskiej w Katowicach;
- I nagroda w konkursie na najlepszą prezentację w sesji posterowej (Best poster award) na European Conference on Fluid-Particle Separation, FPS 2014, Lyon, Francja, 15-17 październik, 2014;

dr inż. Anna Jackiewicz-Zagórska - Autoreferat, Załącznik nr 3

- nagroda zespołowa II stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia dydaktyczne w roku 2016/2017;
- nagroda zespołowa I stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia dydaktyczne w latach 2020/2021.

Potwierdzenia wymienionych istotnych osiągnięć stanowią **załącznik nr 9** do niniejszego wniosku.