Łódź, dnia 13 marca 2024 roku

Dr hab. inż. Agnieszka Brochocka,
Centralny Instytut Ochrony Pracy-
Państwowy Instytut Badawczy,
Zakład Ochron Osobistych,
Pracownia Sprzętu Ochrony Układu Oddechowego
90-133 Łódź, ul. Wierzbowa 48
Tel. +48 42 648 02 25, e-mail:agbro@ciop.lodz.pl

Recenzja w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych , dyscyplina inżynieria chemiczna

Podstawa opracowania

Recenzja rozprawy doktorskiej została opracowana na podstawie pisma z dnia 12.01.2024 r. oraz przekazanej poprawionej wersji rozprawy doktorskiej przez Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Chemiczna, Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Sosnowskiego.
Recenzja uwzględnia wymagania zawarte w aktach prawnych dotyczących rozprawy doktorskiej, zgodnie z art.187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574, z poźn. zm.).

Informacja o doktorancie

Tytuł magistra pan Mateusz Kamiński uzyskał w 2017 r. na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej (PW), kierunek – Inżynieria Chemiczna i Procesowa, specjalność – Inżynieria procesów ochrony środowiska. Od 2017 r. do 2023 r. odbywał studia doktoranckie na tym samym wydziale PW. Kandydat nie ubiegał się wcześniej o nadanie stopnia doktora.

Pan mgr inż. Mateusz Kamiński jest współautorem 4 artykułów naukowych, w wysoko punktowanych czasopismach zamieszczonych w wykazie czasopism MNiSW o sumarycznej wartości 440 punktów ministerialnych, przedstawionych poniżej:

- M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, S. Jakubiak, *Filtration of aerosols containing graphite nanoparticles or their mixture with water droplets on single and multilayer fibrous filters, Separation and Purification Technology,* 2020 - *140 pkt.*
- M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, S. Jakubiak, T. Jankowski, *Filtration of submicron soot particles, oil droplets, and their mixtures on single- and multilayer fibrous filters, Aerosol and Air Quality Research, 2022, 100 pkt.*

- M.Kamiński, J.M.Gac, P.Sobiech, P.Kozikowski, T. Jankowski, *Mixture aerosols Filtration on Filters with Fibre Diameter Distribution – Comparison with theoretical and Empirical Models,* Aerosol and Air Quality Research, 2022, 100 pkt.
- M. Kamiński, J.M. Gac, P. Sobiech, P. Kozikowski, T. Jankowski, *Pressure Drop Nonwoven Filters, Polymers, 2023, 100 pkt.*

Wyniki bezpośrednio związane z badaniami realizowanymi w ramach rozprawy doktorskiej były wygłaszane na 2 konferencjach europejskich w Warszawie w 2018 i 2022 roku oraz przedstawione w postaci prezentacji posterowej na polskiej konferencji w Jachrance w 2019 roku.

Pan Mateusz Kamiński odbył 3 miesięczny staż zagraniczny we Włoszech w ramach programu Erasmus w firmie GVS S.p.A w 2022 r.

Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska pt. "*Wykorzystanie jedno- i wielowarstwowych filtrów włókninowych do oczyszczania gazów z cząstek zawieszonych stałych i ciekłych* " mgr inż. Mateusza Kamińskiego, promotor: Pan dr hab. inż. Jakub M. Gac, prof. uczelni, stanowi zbiór 4 publikacji naukowych opublikowanych w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Report (JCR). Łączna punktacja całego zbioru 4 publikacji według punktacji MNiSW jest równa 440 punktów o wartości współczynnika IF=23,163. Doktorant we wszystkich 4 publikacjach jest pierwszym autorem, a jego wkład w przygotowaniu publikacji dotyczył opracowania koncepcji pomiarów, przeprowadzenia pomiarów skuteczności filtracji, charakterystyki włóknin, przeprowadzenia obliczeń podstawowych parametrów filtracji cząstek, edycji zdjęć mikroskopowych, interpretacji wyników pomiarów, przygotowania i edycji treści artykułów oraz wszystkich wykresów. Jednak określenie udziału procentowego przy każdej publikacji byłoby mile widziane. Wszystkie prace powstały przy znaczącym udziale doktoranta o czym świadczy zadeklarowany jego wkład w poszczególne artykuły oraz oświadczenia pozostałych współautorów. Całość rozprawy doktorskiej związana jest z wykorzystaniem jedno- i wielowarstwowych filtrów włókninowych do oczyszczania gazów z cząstek stałych i ciekłych.

Tematyka badawcza, którą zajmuje się mgr inż. Mateusz Kamiński wpisuje się w ogólne trendy światowe związane przede wszystkim z oczyszczaniem powietrza z cząstek stałych i ciekłych przez filtry włókninowe. W literaturze przedmiotu znajduje się wiele prac poświęconych modyfikacji struktury materiałów filtracyjnych celem uzyskania ich dodatkowych właściwości funkcjonalnych pod dedykowane zastosowania. Całościowe podejście doktoranta do tematu od strony rozpoznania zjawisk zachodzących wewnątrz filtra w czasie trwania procesu filtracji wobec aerozoli mieszanych oraz modyfikacja i dostosowanie istniejących modeli obliczeniowych pozwalających opisać działanie filtra podczas procesu filtracji wobec określonego aerozolu, stanowi wartość dodaną do wiedzy związanej ze zjawiskami zachodzącymi w procesie filtracji wobec aerozoli mieszanych.

Rozprawa doktorska obejmuje 103 strony tekstu i 59 stron stanowiących rozdziały dotyczące oświadczeń współautorów i kopii 4 wydanych publikacji naukowych. Rozprawa doktorska rozpoczyna się streszczeniem w języku polskim i angielskim, spisem treści i życiorysem naukowym. Jednak patrząc po spisie treści przedstawionym na stronie 7 powinien on być zamieszczony przed streszczeniem, na stronie 3. Rozprawa doktorska składa się z 7 głównych rozdziałów dotyczących wstępu, celu, zakresu i tezy pracy, podstaw teoretycznych, uzupełnienia metodyki badawczej przedstawionej w artykułach,

omówienia artykułów, podsumowania i osiągnięć naukowych oraz bibliografii. Zawarto w niej 28 rysunków, 3 tabele oraz 24 numerowane wzory. Wykaz literatury zawiera 111 pozycji. Przedstawiona rozprawa doktorska należy do zakresu badań dyscypliny naukowej inżynieria chemiczna, dziedzina nauk: nauki inżynieryjno-techniczne.

W dość dobrze skondensowanym *Wstępie* rozprawy doktorskiej pan Mateusz Kamiński scharakteryzował obszar aplikacyjnych możliwości filtrów włókninowych usuwających zanieczyszczenia ze strumienia powietrza jako środki ochrony zbiorowej. Podkreślił, że modyfikacja budowy morfologicznej filtrów włóknistych spowodowała nadanie im dodatkowych cech funkcjonalnych takich jak: zdolność do zatrzymywania i usuwania drobnoustrojów, pochłaniania lotnych substancji chemicznych, zdolność do pochłaniania wilgoci czy gromadzenia w swojej strukturze dużej ilości zanieczyszczeń pyłowych. Uzyskanie dodatkowych cech funkcjonalnych umożliwia zastosowanie filtrów do dedykowanych zagrożeń. Obecnie ocena skuteczności filtracji takich filtrów prowadzona jest z udziałem jednoskładnikowych aerozoli o stałej i ciekłej fazie rozproszenia. Nie prowadzono badań sprawności filtracji wobec aerozoli mieszanych, składających się z cząstek i kropel. Dlatego ważne jest poznanie wszystkich interakcji i zjawisk zachodzących w procesie filtracji wobec tych aerozoli.

W *rozdziale 2* przedstawiono cel główny rozprawy doktorskiej dotyczący zbadania filtracji aerozoli jedno- i wieloskładnikowych z wykorzystaniem filtrów włókninowych oraz modyfikacji i dostosowania istniejących modeli obliczeniowych stosowanych dla układów jednoskładnikowych do opisu układów wieloskładnikowych z uwzględnieniem zmian zachodzących wewnątrz filtra w czasie trwania procesu filtracji. Głównym zagadnieniem pracy jest opisanie interakcji pomiędzy cząstkami aerozolowymi o różnej budowie morfologicznej z włóknami filtra. Autor pracy postawił 3 hipotezy badawcze:

1. Rodzaj cząstek aerozolowych, a w przypadku aerozoli wieloskładnikowych, również udział poszczególnych składników takiego aerozolu, ma wpływ na morfologię depozytów filtracyjnych;
2. Zmiany w czasie sprawności i spadku ciśnienia na filtrze, zależą od morfologii depozytów filtracyjnych, przy czym dominujący wpływ na te zmiany mają krople (o ile występują one w aerozolu;
3. Efektywne przewidywanie sprawności i spadku ciśnienia na filtrach jedno-i wielowarstwowych oraz ich zmian podczas filtracji aerozoli wieloskładnikowych wymaga modyfikacji istniejących modeli, uwzględniających m.in. dokładniejszy opis rozkładu rozmiarów włókien filtra i objętości depozytów na nich zatrzymanych.

W celu ich udowodnienia autor przedstawił 5 celi szczegółowych związanych z realizowaną tematyką badawczą:

1. zmodyfikowanie i dostosowanie standardowego stanowiska do badania filtracji aerozoli jednoskładnikowych tak, aby możliwe było badanie filtracji aerozoli wieloskładnikowych o różnym składzie i stężeniach zawierających cząstki ciała stałego, krople oleju i krople wody,
2. opis zmian w czasie parametrów eksploatacyjnych filtrów (sprawności, spadku ciśnienia) podczas filtracji aerozoli wieloskładnikowych o różnej zawartości cząstek stałych i kropel,
3. zbadanie wzajemnego wpływu cząstek stałych i kropel cieczy na morfologię powstających na powierzchni włókien depozytów filtracyjnych,
4. dostosowanie istniejącego modelu sprawności filtracji do przypadku filtracji aerozoli wieloskładnikowych oraz usprawnienie tego modelu o możliwość przewidywania zmian w czasie sprawności filtra,

5. opracowanie modelu pozwalającego na przewidywanie zmiany masy filtra w czasie procesu filtracji, bazującego na masie zatrzymanych depozytów oraz opracowanie opartego o tę zmianę modelu oporów przepływu przez filtr.

W *rozdziale 3* opisano proces filtracji aerozoli z wykorzystaniem filtrów włókninowych. Przedstawiono pozycję tego procesu wśród innych technik wytwarzania filtrów włóknistych i na tle alternatywnych metod oczyszczania gazów z zanieczyszczeń. Przybliżono techniki wytwarzania filtrów włókninowych, w tym technikę pneumotermicznego formowania runa, która wykorzystana została do wytworzenia materiału badawczego. Określono podział włóknin ze względu na ich budowę morfologiczną oraz potencjalny wpływ ich struktury na skuteczność procesu filtracji. Bazując na wiedzy literaturowej odnośnie procesu filtracji aerozoli jednoskładnikowych autor przedstawił własne przemyślenia, które mogą zaistnieć i wpływać na prowadzenie procesu filtracji aerozoli wieloskładnikowych z uwzględnieniem zmian zachodzących w czasie trwania tego procesu. Nie mniej jednak uważam, że zastosowany układ warstw w filtrach włókninowych stosowanych do ochrony układu oddechowego wobec aerozoli jednoskładnikowych oraz zjawiska w nich zachodzące są powszechnie znane od wielu lat. Prawdą jest, że inne zjawiska zachodzą w przypadku cząstek stałych, inne w przypadku cząstek cieczy a jeszcze inne w przypadku występowania jednocześnie cząstek stałych i cieczy. Zjawiska te mogą wystąpić z różną intensywnością w różnych układach zależnie od stężenia cząstek, skuteczności filtracji filtra oraz czasu trwania procesu filtracji. Ważny wpływ na proces filtracji mają także parametry fizyczne związane z samym aerozolem takie, jak: stężenie cząstek, skład, właściwości oraz rozkład rozmiaru cząstek czy liniowa prędkość przepływu w filtrze, jak również parametry związane z budową morfologiczną filtra takie, jak: średnica włókien i gęstość upakowania filtra. Dlatego też rozpoznanie zjawisk zachodzących w procesie filtracji aerozoli wieloskładnikowych niewątpliwie przyczyni się do opracowania nowej konstrukcji filtrów o przedłużonym czasie działania.

Doktorant w swojej pracy odniósł się również do skuteczności filtracji i oporów oddychania - dwóch podstawowych parametrów charakteryzujących właściwości ochronne filtra. Opisał klasyczną teorię filtracji opierającą się na sprawności pojedynczego włókna przedstawiając sprawność filtra jako zależność uwzględniającą własności samego filtra, czyli cylindryczny kształt włókien i pojedynczą wartość średnicy włókna. Sumaryczna sprawność pojedynczego włókna jest wypadkową wartością sprawności działających niezależnie od siebie mechanizmów filtracji. Wyznaczył zależności teoretyczne sprawności poszczególnych mechanizmów filtracji (bezpośredniego zaczepienia, mechanizmu dyfuzyjnego, bezwładnościowego oraz współdziałania mechanizmów dyfuzji i bezpośredniego zaczepienia) dla danego rozmiaru cząstki aerozolowej o określonych właściwościach i dla pojedynczej wartości średnicy włókna przy założeniu stałej prędkości liniowej przepływu strumienia aerozolu przez filtr o odpowiedniej gęstości upakowania. Następnie zmodyfikował zależności teoretyczne mające zastosowanie w klasycznej teorii filtracji korzystając z zależności empirycznych bardziej użytecznych do danego systemu i rozwiązania, w tym dla aerozoli mieszanych. Doktorant przedstawił również ideę istniejących modeli obliczeniowych wykorzystywanych do opisu tego procesu oraz zaproponował sposób ich modyfikacji tak, aby możliwe było ich wykorzystanie do opisu procesu filtracji aerozoli wieloskładnikowych oraz zmian zachodzących na skutek depozycji cząstek aerozolowych.

Opory przepływu strumienia aerozolu przez filtr są parametrem ściśle związanym ze skutecznością filtracji. Dobry filtr powinien zachować kompromis pomiędzy wysoką skutecznością filtracji i jak najniższymi oporami przepływu aerozolu. Na skutek depozycji cząstek aerozolowych w strukturze materiału filtracyjnego dochodzi do wzrostu ich rozmiaru wynikającego z tendencji do agregacji cząstek. Skutkiem takich zmian jest wzrost oporów przepływu. Charakter i szybkość tych

zmian zależy nie tylko od rodzaju depozytu ale również od stężenia aerozolu, czasu obłożenia, gęstości upakowania włókien filtra oraz zwilżalności włókna przez daną ciecz. Z badań materiałów włókninowych wynika, że badania skuteczności filtracji wobec aerozoli cieczy są bardziej „ostrzejsze" niż w przypadku aerozoli stałych tzw. najgorszy przypadek. Dlatego tak ważne jest określenie rodzaju aerozolu cieczy i jego charakterystyki, która nie została podana przez doktoranta. Skorzystano z odpowiednich zależności empirycznych i przystosowano je do danego systemu i rozwiązania opisując model do przewidywania oporów przepływu i zmian oporów uwzględniając następujące parametry opisujące filtr: lepkość płynu, średnią liniową wartość przepływu w filtrze, grubość filtra, gęstość upakowania oraz średnicę włókien. Został opisany również schemat prowadzenia obliczeń na podstawie zmodyfikowanej postaci modeli obliczeniowych uwzględniający zmianę średnicy włókna lub wielu włókien, gęstość upakowania filtra oraz prędkości liniowej przepływu aerozolu przez filtr.

Opisane modele zarówno do przewidywania sprawności i zmian sprawności jak i do przewidywania oporów przepływu i zmian oporów powiązane są ze sobą poprzez masę i objętość depozytów zatrzymanych na filtrze w danej chwili czasowej wyznaczonych na podstawie danych eksperymentalnych dla danego badanego filtra.

W kolejnym podrozdziale dotyczącym *schematu obliczeń* podano sposób obliczeń zmian sprawności filtra oraz zmian spadku ciśnienia na filtrze. Algorytm tego schematu autor przedstawił na rysunku 1. Prawidłowość działania modelu obliczeniowego weryfikowano przez porównanie wyników doświadczalnych z wynikami obliczeń, które zostały przedstawione w artykułach stanowiących podstawę pracy doktorskiej. W pierwszym artykule porównywano zmianę sprawności filtra w czasie trwania procesu filtracji. Wykazano, że model wymaga modyfikacji uwzględniającej obecność większych cząstek, szczególnie w przypadku aerozoli mieszanych. W kolejnym artykule porównano sprawność początkową filtrów jedno- i wielowarstwowych oraz zmianę masy filtra po zakończeniu procesu filtracji. Wykazano, że model można jeszcze ulepszyć poprzez uwzględnienie obecności większych cząstek, szczególnie w przypadku aerozoli mieszanych. W trzecim artykule porównano średni początkowy rozmiar cząstki przed i za filtrem oraz zbadano wpływ liczby średnic przyjętych do obliczeń modelu efektywności pojedynczego włókna. Stwierdzono, że model efektywności pojedynczego włókna do przewidywania skuteczności filtra nie jest wystarczającym sposobem opisu zachowania filtrów stosowanych do filtracji mieszanin aerozolowych, nawet jeśli opis matematyczny uwzględnia wpływ objętości depozytów na prędkość przepływu, gęstość upakowania i wiele średnic włókien. Konieczne są zatem dalsze udoskonalenia modelu. Ostatni artykuł zawierał badania zmian oporów przepływu podczas filtracji oraz wpływu rodzaju aerozolu (binarne ciało stałe – ciecz, potrójne ciało stałe – ciecz – ciecz) na te zmiany. Aby zbudować taki model, należy przeprowadzić bardziej szczegółowe obserwacje eksperymentalne rozkładu masy depozytu wewnątrz filtra i zmian rozkładu tego depozytu w czasie.

Rozdział 4 Uzupełnienie przedstawionej w artykułach metodyki badawczej zawiera 8 podrozdziałów dotyczących stanowiska pomiarowego, izokinetyczności, czasu przebywania oraz łączenia strumieni w przypadku aerozoli mieszanych, gęstości efektywnej grafitowych cząstek stałych, rozkładu rozmiarów włókien filtrów, rozkładu rozmiarów cząstek aerozolowych, krok czasowy, oraz powtarzalność wyników i analizę statystyczną. W podrozdziale *stanowisko pomiarowe* autor przedstawił schemat stanowiska do badania sprawności oraz oporów przepływu filtrów podczas filtracji różnych aerozoli jedno- i wieloskładnikowych. Opisał metodykę badań aerozoli polidyspersyjnych, której pierwotna wersja powstała na bazie normy ISO 21083. W celu dostosowania tej metody do badania aerozoli wieloskładnikowych wprowadził modyfikacje polegające m.in. na umieszczeniu generatorów cząstek aerozolowych i połączeniu ich w taki sposób, aby wypływające

strumienie mogły się ze sobą łączyć, przeniesieniu osuszacza do części układu łączącego komorę pomiarową z układem pomiaru koncentracji cząstek aerozolowych.

Izokinetyczne pobieranie próbek to pobieranie cząstek zawieszonych w strumieniu gazu w taki sposób, że prędkość strumienia częściowego ma taką samą wartość i kierunek jak prędkość głównego strumienia gazu w punkcie pobierania (PN-ISO 4225:1999). Doktorant wyjaśnia dlaczego prędkość we wnętrzu komory pomiarowej oraz na wlocie do sondy pomiarowej powinna być jednakowa i powinna wynikać z konstrukcji układu pomiarowego. Nie zgadzam się z autorem pracy odnośnie stwierdzenia, że prędkość przepływu strumienia aerozolu we wnętrzu komory pomiarowej i prędkość przepływu strumienia aerozolu przez badany filtr zależą od tego dla jakiej wartości prędkości liniowej przepływu przez filtr prowadzić chcemy badania. Nie dobieramy przepływu natężenia do struktury morfologicznej filtru. Określamy zakresy natężeń przepływów powietrza występujące w środowisku wewnętrznym czy zewnętrznym i przy określonych wartościach natężeń przepływu oceniamy sprawność filtru. Informacyjnie podaję normę PN-EN ISO 29463-5:2018-11 określającą referencyjną procedurę badania skuteczności filtrów odniesioną do najbardziej penetrujących wielkości cząstek aerozolu (MPPS – Most Penetrating Particle Size), którą autor będzie mógł w przyszłości wykorzystać do dalszych badań.

W podrozdziale dotyczącym *Czasu przebywania oraz łączenia strumieni aerozoli mieszanych* autor opisuje sposób uzyskania aerozoli mieszanych poprzez połączenie biegnących równolegle strumieni aerozoli jednoskładnikowych, zawierających: cząstki stałe, krople oleju i krople wody, wychodzących z generatorów. Autor podał czas przebywania w układzie pomiarowym wszystkich cząstek aerozoli, który wynosił 6 sekund przy zachowaniu w komorze przepływu tłokowego oraz czas na pokonanie drogi od wlotu sondy do klasyfikatora wynoszący 4,5 sekundy. Autor nie określił jaką wodę zastosował do otrzymania aerozolu jednoskładnikowego zawierającego krople wody. Każda woda składa się z obojętnych cząstek i jonów. Ponieważ jony są cząstkami naładowanymi, woda jest również naładowana. W 99 % ładunek ten jest dodatni, woda z kranu posiada od +120 do +280 mV . Ma to bardzo duży wpływ na skuteczność filtracji filtrów włókninowych.

W podrozdziale 4.4 *Gęstość efektywna grafitowych cząstek stałych* autor nie mógł wyznaczyć rzeczywistego rozmiaru cząstek, które miały tendencję do tworzenia aglomeratów ze względu na ograniczenia sprzętowe. Nie podjął wyzwania polegającego na poszukiwaniu innego mikroskopu SEM za pomocą którego można było uzyskać powiększenie obrazu z zachowaniem jego ostrości bez konieczności pokrywania powierzchni próbek warstwą złota. Dlatego przyjęto za rozmiar cząstki pierwotnej wartości podane przez producenta 5 nm oraz literaturową wartość wymiaru fraktalnego wynosząca 2,3. Pozwoliło to uzyskać zadawalającą zgodność z wynikami eksperymentalnymi.

W podrozdziale 4.5 *Rozkład rozmiarów włókien filtrów* recenzent nie może odnaleźć spójności pomiędzy oznaczeniem filtrów z rysunku 7 i 8 a oznaczeniem warstwy podanej w tabeli 1. Jeśli wytworzono filtr z poli(tereftalanu butylenu) (PBT) o odmiennych właściwościach powierzchniowych w stosunku do filtru z polipropylenu (PP) to dlaczego do sprawdzenia wpływu zwilżalności włókien na wystąpienie maksimum sprawności filtra podczas procesu filtracji aerozolu mieszanego zastosowano tylko aerozol składający się z cząstek stałych i kropel oleju, a nie zastosowano np. aerozolu składającego się z kropel wody i cząstek stałych? W żadnym z załączonych artykułów nie znalazłam wyników badań odnoszących się do wpływu zwilżalności włókien na sprawność filtru wykonanego z włókien PP i PBT. W związku z powyższym nie rozumiem celowości zastosowania filtru wykonanego z włókien PBT.

W podrozdziale 4.6 *Rozkład rozmiarów cząstek aerozolowych* zostały opisane aerozole wraz z ich charakterystyką. Ze względu na skomplikowany charakter rozkładu aerozolu mieszanego autor w modelu obliczeniowym wziął pod uwagę poszczególne frakcje cząstek niezależnie i oddzielnie od siebie. Stwierdził, że cząstki stałe na skutek kontaktu z kroplami oleju ulegały deformacji. Interakcje

pomiędzy tymi cząstkami powodowały wzrost koncentracji cząstek o rozmiarach powyżej 250 nm. Autor wykazał również, że na zmianę koncentracji cząstek może mieć wpływ efekt łączenia strumieni aerozoli jednoskładnikowych. W przypadku rozpatrywania zmian zachodzących we wewnętrzu filtra największe znaczenie ma objętość zatrzymanych depozytów i wpływa na zmiany gęstości upakowania, prędkości przepływu i średnicę włókien. Prawidłowość modelu obliczeniowego zweryfikowano na podstawie porównania zmian masy filtru uwzględniając w modelu efektywną gęstość cząstek stałych. Gęstość efektywną w układach mieszanych wyznaczono na podstawie przewidywanego udziału cząstek grafitowych i kropel oleju w zmianie masy filtra. W kolejnych badaniach gęstość efektywna każdej frakcji cząstek stałych rozpatrywano oddzielnie na podstawie udziału danej frakcji cząstek w aerozolu mieszanym. Cząstki stałe i ciekłe rozpatrywano oddzielnie od siebie a ich gęstość efektywna powiązana była jedynie z ich rozmiarem. Widać na podstawie przeprowadzonych badań, że w przypadku aerozoli mieszanych zaczyna pojawiać się problem przy opisaniu gęstości cząstek aerozolowych i udziału poszczególnych frakcji w rozkładzie ich rozmiarów.

W podrozdziale 4.7 *Krok czasowy* doktorant opisał całkowity rozpatrywany czas procesu filtracji oraz zmiany masy filtra, który wynosił dla wszystkich przypadków 3840 sekund. Określił wpływ wartości kroku czasowego na względna różnicę obliczonej zmiany masy filtra podczas filtracji aerozolu zawierającego jedynie krople oleju oraz wpływ wartości kroku czasowego na względną różnicę obliczonej końcowej zmiany oporów przepływu przez filtr podczas filtracji aerozolu zawierającego jedynie krople wody. W efekcie uzyskał wartość kroku czasowego wynosząca 1 sekundę, która zapewnia kompromis pomiędzy dokładnością wyników a czasem potrzebnym na ich otrzymanie.

W podrozdziale 4.8 *Powtarzalność wyników i analiza statystyczna* autor opisał różnice w sprawności filtracji pomiędzy kolejnymi powtórzeniami pomiaru filtracji aerozolu zawierającego cząstki stałe i krople oleju. Autor nie przeprowadził analizy statystycznej modelu obliczeniowego ze względu na niedostateczną postać narzuconych w nim założeń, a jednym z celów szczegółowych rozprawy doktorskiej było opracowanie modelu pozwalającego na przewidywanie zmiany masy filtra w czasie procesu filtracji, bazującego na masie zatrzymanych depozytów oraz opracowanie opartego o tę zmianę modelu oporów przepływu przez filtr. Można na tej podstawie przypuszczać, że opracowany model obliczeniowy jest niedoskonały i cel pracy nie został osiągnięty. Zdaniem recenzenta powtarzalność wyników nie została przeprowadzona poprawnie a ilościowej analizy statystycznej brak, co autor sam określił w niniejszej pracy. W powtarzalności wyników chodzi o przeprowadzenie badań dla dwóch serii pomiarowych w różnych odstępach czasowych, a każda seria pomiarowa powinna składać się z co najmniej 10 pomiarów. Analiza statystyczna powinna być przeprowadzona dla każdej serii pomiarowej w zakresie podstawowych statystyk opisowych. Następnie powinien być przeprowadzony test Fishera-Snedecora na zgodność wariancji obu serii pomiarowych oraz test T zgodności średnich czy są istotne różnice pomiędzy średnimi badanych zbiorów.

Kolejnym punktem jest omówienie artykułów, które zostały zrecenzowane i opublikowane w międzynarodowych czasopismach naukowych. Przy omawianiu artykułów podano informacje, które osiągnięcie naukowe z podanych 9 w podsumowaniu zostało zrealizowane.

W rozdziale 6 *Podsumowanie i osiągnięcia naukowe* doktorant wymienił główne osiągnięcia naukowe pracy, które zostały opisane w wymienionych akapitach. Przedstawione zostały również wskazówki pomocne przy projektowaniu filtrów oraz perspektywy dalszych badań w kierunku rozszerzenia modelu obliczeniowego o podział warstwy filtra na mniejsze niezależne warstwy. Pozwoli to na dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistego rozmieszczenia depozytów wewnątrz struktury filtra oraz poprawi dokładność modelu w zakresie przewidywanych zmian.

Przedstawione do oceny w ramach rozprawy doktorskiej badania są aktualne i w pełni uzasadnione z punktu widzenia poznawczo naukowego.

Na podstawie przedstawionej recenzji opartej na analizie załączonej rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Mateusza Kamińskiego stwierdzam, że praca pt. „Wykorzystanie jedno- i wielowarstwowych filtrów włókninowych do oczyszczania gazów z cząstek zawieszonych stałych i ciekłych" wnosi znaczący dorobek do stanu wiedzy z zakresu inżynierii chemicznej i może być podstawą do prowadzenia dalszych badań w tym obszarze.

Pomimo wskazanych mankamentów merytorycznych w recenzji osiągnięcie naukowe przedstawione, jako cykl 4 publikacji oceniam pozytywnie. Tak więc moim zdaniem praca doktorska spełnia wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574, z poźn. zm.). Wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Mateusza Kamińskiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego.