

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Inżynierii Środowiska



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Anna Charkowska

**Probabilistyczna ocena numerycznej skuteczności
filtracji aerozolu w materiałach mikrowłóknistych
o słabo zdeterminowanej strukturze**

WARSZAWA

1997

66, 067, 1; 66, 067, 3; 541, 182. 2/ 3; 579, 23

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

PD

Wydział Inżynierii Środowiska



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Anna Charkowska

**Probabilistyczna ocena numerycznej skuteczności
filtracji aerozolu w materiałach mikrowłóknistych
o słabo zdeterminowanej strukturze**

Promotor:
Prof. dr hab. inż.
Teresa Jędrzejewska-Ścibak

EP

WARSZAWA

1997



397-1-97D

**Pani Profesor Teresie Jędrzejewskiej-Ścibak
Promotorowi mojej pracy
składam serdeczne podziękowania
za nieocenioną pomoc i wyrozumiałość**

Anna Charkowska

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE.....	9
2. ZAKRES PRACY.....	15
3. TEORETYCZNE PODSTAWY PROCESU FILTRACJI POWIETRZA	16
3.1. PODSTAWOWE POJĘCIA I DEFINICJE.....	16
3.1.1. Aerozol, cząstka, pył	16
3.1.2. Pomieszczenia czyste	16
3.1.3. Materiały filtracyjne.....	17
3.1.4. Proces filtracji powietrza i jego opis	19
3.2. OPLYW ELEMENTÓW FILTRACYJNYCH PRZEZ STRUMIEŃ GAZU.....	24
3.3. MECHANIZMY FILTRACJI.....	26
3.3.1. Dyfuzja molekularna.....	26
3.3.2. Zderzenia bezwładnościowe	27
3.3.3. Zjawisko zaczepienia.....	28
3.3.4. Osadzanie grawitacyjne.....	29
3.3.5. Oddziaływanie elektrostatyczne.....	30
3.3.6. Łączne oddziaływanie mechanizmów filtracji.....	32
3.4. PRZEGLĄD MODELI MATEMATYCZNYCH PROCESU FILTRACJI AEROZOLI.....	33
3.4.1. Klasyfikacja modeli matematycznych.....	33
3.4.2. Modele deterministyczne.....	35
3.4.2.1. Założenia modeli deterministycznych	35
3.4.2.2. Model Daviesa	36
3.4.2.3. Model Friedlandera-Whitbyego	39
3.4.2.4. Model Torgensona	40
3.4.2.5. Model Fuksa-Stieczkiny-Kirsza (równoległy)	44
3.4.2.6. Model Kirsza-Stieczkiny (wachlarzowy)	48
3.4.2.7. Modele matematyczne a rzeczywiste warunki procesu filtracji.....	54
3.4.2.8. Ocena wiarygodności opisu analitycznego przy złożonych strukturalnie materiałach filtracyjnych.....	58
3.4.3. Modele hybrydowe.....	59
3.4.3.1. Założenia dla modeli hybrydowych.....	59
3.4.3.2. Probabilistyczny model procesu pomiarowego.....	60
4. BADANIA EKSPERYMENTALNE.....	62
4.1. ZAKRES BADAŃ	62
4.2. WYBÓR WŁÓKNIN FILTRACYJNYCH.....	63
4.2.1. Charakterystyka włókien szklanych.....	64

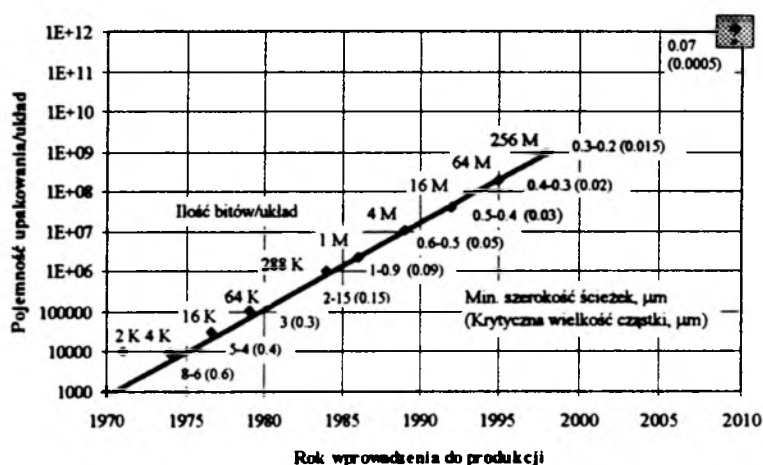
4.2.2. Charakterystyka włókien celulozowych.....	66
4.2.3. Metodyka wykonania włóknin filtracyjnych.....	68
4.3. OKREŚLENIE PARAMETRÓW STRUKTURALNYCH WŁÓKNIN FILTRACYJNYCH.....	72
4.3.1. Metodyka pomiarów parametrów strukturalnych.....	72
4.3.2. Ocena parametrów strukturalnych włókien.....	75
4.3.3. Zestawienie parametrów strukturalnych włóknin filtracyjnych.....	80
4.4. OKREŚLENIE PRZEDZIAŁOWEJ SKUTECZNOŚCI FILTRACJI.....	83
4.4.1. Stanowisko badawcze i metodyka pomiarowa.....	83
4.4.1.1. Wybór metodyki pomiarowej.....	83
4.4.1.2. Przeprowadzanie testu chlorku sodu według norm.....	83
4.4.1.3. Zastosowana metodyka pomiarów.....	84
4.4.1.4. Porównanie metodyki pomiarów: zastosowanej i zalecanej przez normy.....	87
4.4.2. Analiza wyników pomiarów przedziałowej skuteczności filtracji.....	89
4.5. OKREŚLENIE CAŁKOWITEJ SKUTECZNOŚCI FILTRACJI TESTEM MGŁY OLEJOWEJ.....	96
4.5.1. Metodyka i stanowisko pomiarowe.....	96
4.5.2. Porównanie metodyki pomiarów: zastosowanej i zalecanej przez normy.....	97
4.5.3. Klasyfikacja włóknin w oparciu o wartości skuteczności całkowitej.....	100
4.6. OKREŚLENIE STRATY CIŚNIENIA.....	103
4.6.1. Stanowisko badawcze i metodyka pomiarowa straty ciśnienia przy przepływie czystego powietrza.....	103
4.6.1.1. Porównanie charakterystyk straty ciśnienia.....	103
4.6.2. Stanowisko badawcze i metodyka pomiaru straty ciśnienia przy przepływie mgły olejowej.....	110
4.7. OCENA WPLYWU ODDZIAŁYWANIA ŁADUNKU ELEKTROSTATYCZNEGO.....	110
5. ANALIZA PORÓWNAWCZA TEORETYCZNYCH I RZECZYWISTYCH WARTOŚCI NUMERYCZNEJ PRZEDZIAŁOWEJ SKUTECZNOŚCI FILTRACJI.....	113
5.1. OCENA WPLYWU ODDZIAŁYWANIA POSZCZEGÓLNYCH MECHANIZMÓW FILTRACYJNYCH W WYBRANYM ZAKRESIE POMIAROWYM.....	113
5.2. OCENA ZGODNOŚCI WYNIKÓW BADAŃ Z WARTOŚCIAMI OBLICZONYMI ANALITYCZNIE DLA WYBRANYCH MODELI.....	116
5.3. OCENA WIARYGODNOŚCI MODELII NA TLE WYNIKÓW BADAŃ.....	120
6. OPIS PROCESU FILTRACJI W UJĘCIU PROBABILISTYCZNYM.....	122
6.1. ZASTOSOWANIE LINIOWEJ REGRESJI WIELOPARAMETROWEJ DO OPISU PROCESU FILTRACJI.....	122
6.2. ANALIZA DANYCH ZA POMOCĄ PAKIETU STATYSTYCZNEGO SPSS/PC+.....	124
6.2.1. Możliwości wykorzystanie pakietu SPSS/PC+.....	124
6.2.2. Modelowanie procesu filtracji metodą regresji liniowej wieloparametrowej.....	125
6.2.3. Ocena analizy statystycznej.....	128
6.2.4. Charakterystyka proponowanego modelu filtracji powietrza.....	131
6.3. ZAKRES ZASTOSOWAŃ ZAPROPONOWANEGO MODELU PROCESU FILTRACJI.....	133

7. KIERUNKI DOSKONALENIA STRUKTURY I WŁAŚCIWOŚCI WYSOKOSKUTECZNYCH MATERIAŁÓW FILTRACYJNYCH.....	134
7.1. ZADANIA WYSOKOSKUTECZNYCH FILTRÓW W REALIZACJI WYMAGANEJ KLASY CZYSTOŚCI POMIESZCZENIA	134
7.2. WIARYGODNOŚĆ OCENY WIELKOŚCI NUMERYCZNEGO STĘŻENIA PYŁU W STRUMIENIU POWIETRZA OPUSZCZAJĄCYM WARSTWĘ FILTRACYJNĄ.....	135
7.3. OKREŚLENIE PRZEDZIAŁOWEJ SKUTECZNOŚCI FILTRACJI W OPARCIU O ZAPROPONOWANY MODEL	136
7.4. MOŻLIWOŚCI DOBORU PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW STRUKTUR FILTRACYJNYCH	137
7.4.1. Algorytmy doboru parametrów.....	137
7.4.1.1. Sprawdzenie prawidłowości doboru parametrów.....	137
7.4.1.2. Dobór parametrów strukturalnych włóknin.....	137
7.4.2. Kryterium dobroci filtru.....	140
7.4.3. Kryterium maksymalnej skuteczności filtracji	141
7.5. KIERUNKI POSZUKIWAŃ NOWYCH STRUKTUR FILTRACYJNYCH.....	142
8. WNIOSKI.....	143
OZNACZENIA.....	147
LITERATURA.....	153
ZALĄCZNIKI.....	157
ZALĄCZNIK 1	157
Wyniki pomiarów i analiz teoretycznych	
ZALĄCZNIK 2	209
Podstawy teoretyczne modelu regresji wielowymiarowej oraz wyniki analizy statystycznej	
ZALĄCZNIK 3	239
Zdjęcia mikroskopowe oraz próbki włóknin filtracyjnych	



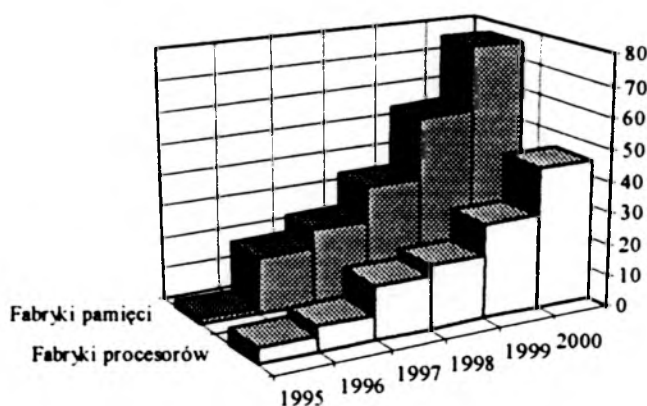
1. WPROWADZENIE

Sukcesywnie unowocześniana technologia produkcji, w takich dziedzinach jak przemysł elektroniczny, optyczny, farmaceutyczny, spożywczy, medycyna, itp., wymaga prowadzenia procesów produkcyjnych w warunkach wysokiej czystości otaczającego powietrza (lub innego gazu). Jest to czynnik niezbędny dla zapewnienia wysokiej jakości precyzyjnie wytwarzanych wyrobów. Przy obserwowanej obecnie dynamice wzrostu produkcji mikroprocesorów i układów scalonych, już w roku 1998 spodziewana jest taka miniaturyzacja ścieżek, która wymagać będzie w strefie ich produkcji eliminowania ziaren pyłu o średnicy niższej nawet od $0,015 \mu\text{m}$ (Rysunek 1.1).



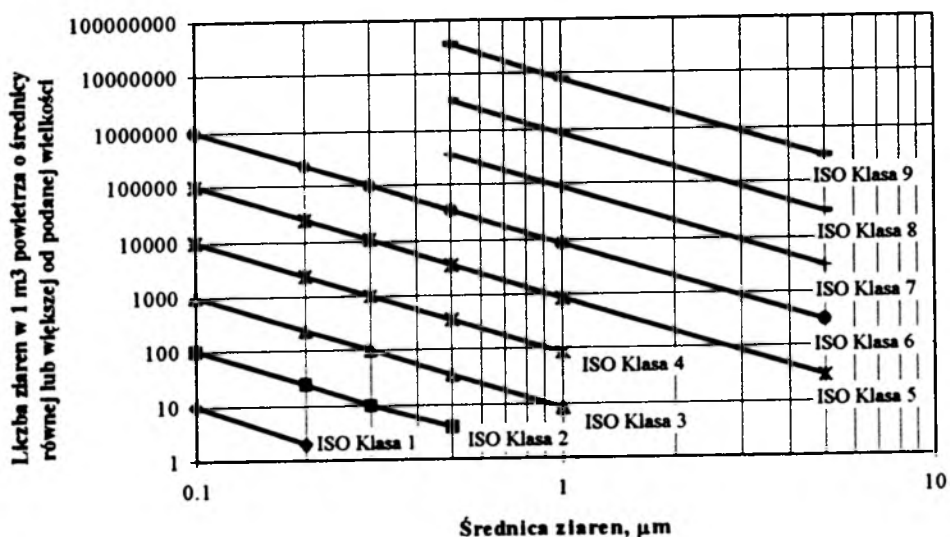
Rysunek 1.1. Rozwój produkcji układów scalonych i krytyczna wielkość średnicy cząstek związana z minimalną szerokością ścieżek [5], [45]

O tempie rozwoju elektroniki i przemysłu półprzewodnikowego świadczą prognozy dotyczące budowy nowych fabryk w celu zaspokojenia potrzeb rynku w roku 2000 [4] (Rysunek 1.2).



Rysunek 1.2. Prognoza dotycząca budowy fabryk półprzewodników do 2000 r. [4]

Wymagany stopień czystości powietrza przyjęto definiować w postaci klas, wyznaczających nieprzekraczalne granice liczby ziaren, o określonych średnicach, które mogą się pojawiać w kontrolowanej pod względem czystości strefie pomieszczenia. Brak wymagań krajowych w tym zakresie powoduje wprowadzanie obecnie dokumentu o zasięgu międzynarodowym (ISO/DIS 14644-1 [28] - Rysunek 1.3), opartego w znacznej mierze na zaleceniach amerykańskich (US-Federal Standard 209E) [21].



Rysunek 1.3. Klasyfikacja pomieszczeń czystych według [28]

Dzięki stale doskonalonym rozwiązaniom technicznym, te źródła zanieczyszczeń, które nie wiążą się bezpośrednio z procesem produkcyjnym (infiltracja, materiały wykończeniowe, obecność personelu oraz wyposażenia), mogą być w dużym stopniu eliminowane. Natomiast, usuwanie zanieczyszczeń pyłowych powstających w procesie produkcji wymaga ciągłego omywania realizowanego procesu przez strumień odpowiednio uzdatnionego i oczyszczonego powietrza. Im niższa jest pożądana klasa czystości, tym większe wymagania stawia się realizacji uwarstwowanego przepływu powietrza w pomieszczeniu. Dla klas czystości poniżej 4 (ISO Klasa 4), gdzie dopuszczalny zakres średnic występujących ziaren nie przekracza 1 µm, konieczne staje się zapewnienie przepływu w pełni laminarnego. Oznacza to wymóg dostarczania powietrza w ilości $0,4 \div 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, w odniesieniu do każdego 1 m^2 przekroju poprzecznego obsługiwanej przestrzeni. Konieczność doprowadzania do pomieszczenia tak dużej ilości powietrza, mającej ochronić strefę produkcji przed niedopuszczalnym zapyleniem, może stanowić jednocześnie zagrożenie dla realizacji tego celu. Niedostatecznie oczyszczone powietrze nawiewane może stać się bowiem źródłem dopływu do strefy produkcji nie dającej się zaakceptować ilości zanieczyszczeń.

Problem wysokoskutecznego oczyszczania doprowadzanego powietrza rozwiązywany jest powszechnie w oparciu o wykorzystanie procesu filtracji, w odpowiednio kształtowanych strukturach filtracyjnych. Nowe zadania, w postaci wymogu skutecznego zatrzymywania ziaren submikronowych, sprzyjają stałemu poszukiwaniu nowych, niekonwencjonalnych struktur filtracyjnych. Wielokierunkowość poszukiwań oraz skuteczna ochrona tajników technologicznych oferowanych na rynku nowych mediów filtracyjnych, nie stwarzają dogodnej płaszczyzny dla porównań oraz wyboru. Inicjatywa EUROVENTU¹⁾, w zakresie ujednoczenia metod testowania oraz klasyfikacji filtrów, stała się powszechnie wykorzystywaną podstawą do oceny skuteczności ich działania. Podana w Tabeli 1.1 klasyfikacja ulega sukcesywnemu rozszerzaniu. Obecnie przewidywane jest już wprowadzenie klas EU 17 [29], [38], [53], [84]. W Tabeli przedstawiono również nazewnictwo filtrów wprowadzane przez normy prPN (zamiast BN-88/8962-05) [73], pr PN EN 779 [71] i pr EN 1822-1 [29].

Tabela 1.1. Klasyfikacja filtrów powietrza

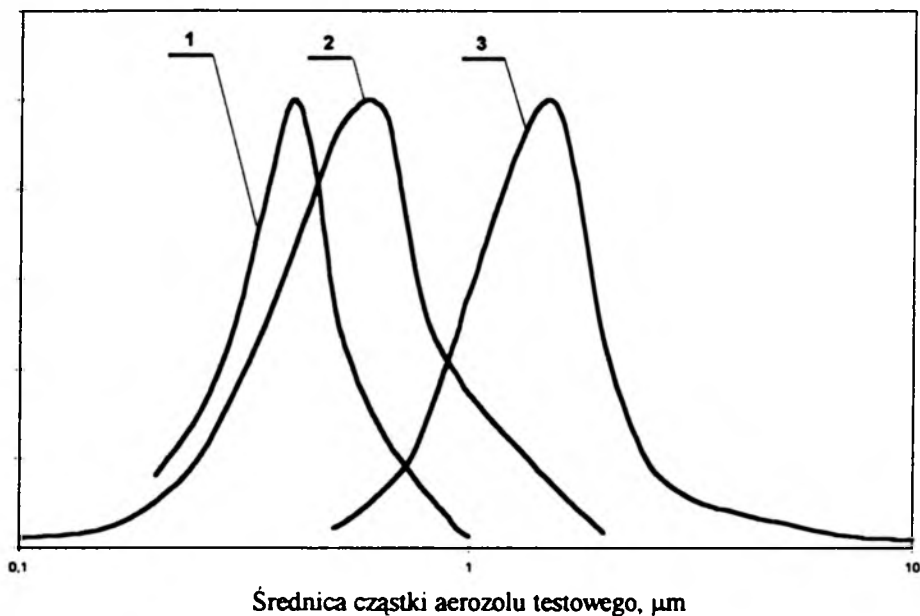
Klasa filtru	Całkowita skuteczność filtracji, %		Przedziałowa skuteczność filtracji, %	Klasa filtru
	Test pyłu syntetycznego	Test pyłu atmosferycznego	Test aerozolu DEHS ²⁾ , DOP ³⁾ lub mgły oleju parafinowego	
DIN 24 185, pr DIN 24 183	DIN 24 185, EUROVENT 4/5	DIN 24 185, EUROVENT 4/5	pr EN 1822-5	pr PN EN 779, pr EN 1822-1
EU1	$\eta < 65$			G1
EU2	$65 \leq \eta < 80$			G2
EU3	$80 \leq \eta < 90$			G3
EU4	$\eta \leq 90$			G4
EU5		$40 \leq \eta < 60$		F5
EU6		$60 \leq \eta < 80$		F6
EU7		$80 \leq \eta < 90$		F7
EU8		$90 \leq \eta < 95$		F8
EU9		$95 \leq \eta$		F9
EU10			85	H10
EU11			95	H11
EU12			99.5	H12
EU13			99.95	H13
EU14			99.995	H14
EU15			99.9995	U15
EU16			99.99995	U16
EU17			99.999995	U17

¹⁾ EUROVENT - The European Committee of the Constructors of Air Handling Equipment.

²⁾ DEHS - aerozol polidispersyjny sebacynianu dwuetyloheksylu,

³⁾ DOP - aerozol monodispersyjny ftalanu oktylu.

Oprócz zaleceń zawartych w propozycji normy europejskiej prEN 1822, w pozostałych normach jako podstawę wyznaczania skuteczności filtracji przyjęto ocenę stopnia zatrzymywania wybranych aerozoli testowych, odnoszącą się do masy dostarczanego aerozolu przed filtrem (skuteczność całkowita). Orientacyjną charakterystykę składu frakcyjnego wybranych przez EUROVENT aerozoli testowych przedstawiono na Rysunku 1.4.



Rysunek 1.4. Orientacyjny rozkład aerozoli testowych :
 1 - mgła oleju parafinowego (DIN 24 184)
 2 - aerozol chlorku sodu,
 3 - pył kwarcowy (DIN 24 184).

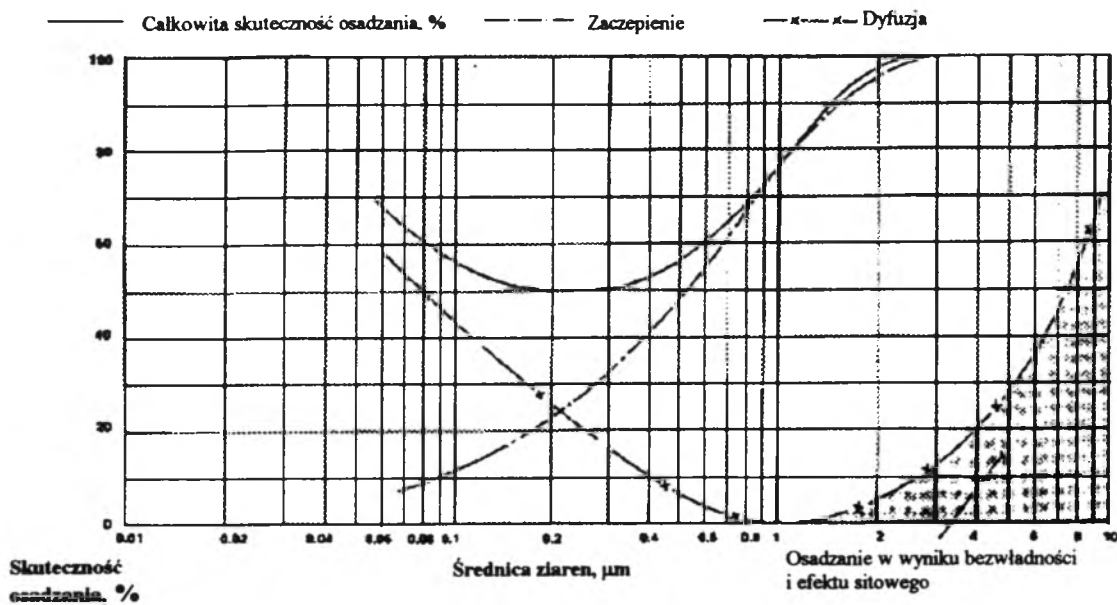
Kryterium skuteczności całkowitej może być uznane za jednoznaczny wskaźnik porównawczy dla różnych oferowanych materiałów filtracyjnych. Nie jest w stanie dostarczyć jednak żadnych podstaw do wnioskowania w zakresie oceny ich właściwości eksploatacyjnych, czyli zdolności filtru do zatrzymywania ziaren konkretnego pyłu, w konkretnych przedziałach wymiarowych. Ocena eksploatacyjnej skuteczności filtracji wymaga skorelowanego zdefiniowania trzech obszarów danych: wejście → filtr → wyjście. Ponieważ kontroli podlega obszar ostatni, gdzie wymagane jest potwierdzenie realizacji określonej klasy czystości, niezbędne staje się dysponowanie możliwością definiowania numerycznej skuteczności przedziałowej materiałów filtracyjnych, pozwalającej oceniać rozkład frakcyjny zanieczyszczeń (różnych od pyłów testowych) w powietrzu opuszczającym warstwę filtracyjną. Sytuację w tym zakresie komplikuje fakt, że numeryczna skuteczność filtracji jest specyficzną właściwością dla konkretnego układu i każdorazowo jej wstępna analityczna ocena powinna stanowić podstawę do doboru odpowiednich filtrów. Stworzenie wiarygodnych podstaw dla podejmowania decyzji w tym zakresie może ograniczyć prawdopodobieństwo pojawiania się rozwiązań nietrafnych, prowadzących w efekcie do strat w produkcji lub konieczności zbyt częstej wymiany filtrów.

Wobec braku uzasadnienia dla doświadczalnego określania charakterystyk eksploatacyjnych dla każdego z planowanych procesów, uwaga wielu badaczy skierowana została w kierunku poszukiwania metod analitycznego opisu procesu zatrzymywania ziaren o określonej średnicy. Nie jest to zadanie proste w przypadku występowania wielu współzależnych mechanizmów fizycznych, decydujących o skuteczności procesu filtracji. W sytuacji, gdy przenikające ziarna w sposób trudny do przewidzenia wchodzą w kontakt z mikroelementami tworzącymi złożone struktury filtracyjne, trudno o jednoznaczność opisu. W literaturze spotkać można szereg matematycznych modeli, w różny sposób opisujących właściwości różnorodnych struktur materiałów filtracyjnych. Materiały te, wytwarzane jako tkaniny, dzianiny, włókniny, papiery i bibuły, charakteryzują się bardzo zróżnicowaną budową: od prostej w postaci równoległe do siebie usytuowanych włókien wтку i osnowy do wysoce skomplikowanej, w wyniku nieuporządkowanego losowego ich ułożenia. Obserwowana w ostatnich czasach tendencja do wykorzystywania do oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń submikronowych materiałów wykonywanych metodą papierniczą, wymaga rozwiązania pojawiających się nowych problemów, związanych już nie tylko z wpływem wielkości średnic, lecz także z układem włókien i kanałów (porów) w warstwie papierowej.

Większość deterministycznych modeli procesu filtracji wykorzystuje w opisie matematycznym zjawisko opływu strumieniem powietrza wokół równoległe ułożonych elementów. Model przybliżający w swoich założeniach filtr "teoretyczny", do nowoczesnych złożonych materiałów (model wachlarzowy) stanowi bardzo interesujące przybliżenie, nie dając jednak pewności, że równie dobrze będzie służył wnioskowaniu w odniesieniu do papierów (czy raczej włókien wytwarzanych metodą papierniczą), oferowanych dla potrzeb filtracji wysokoskutecznej. Fakt przypadkowości (losowości) w układzie włókien i związanej z tym niepewności struktury oraz niewątpliwie występującej jej miejscowej (lokalnej) niejednorodności, wprowadzać może istotny element niepewności wyników.

Doświadczenia ze stosowania metod analitycznych oraz ich pomiarowej weryfikacji pozwoliły zaobserwować istnienie pewnej istotnej prawidłowości. Jest to występowanie wyraźnego obniżania się (w zależności od zastosowanego materiału) wielkości skuteczności przedziałowej, w zakresie średnic ziaren pomiędzy wartościami 0,1 a 1 μm (wynikającym z warunków współdziałania poszczególnych mechanizmów filtracji) (Rysunek 1.5).

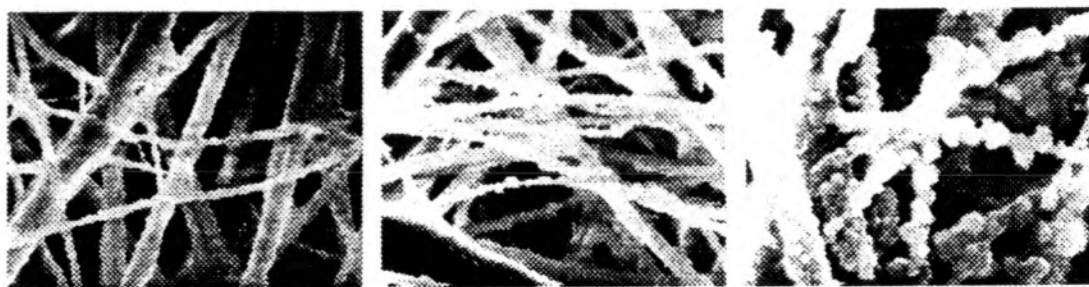
Stwierdzenie powyższe, sygnalizujące istnienie obszaru pogorszonej skuteczności filtracji, i to właśnie w zakresie stającym się przedmiotem zainteresowań nowoczesnych technologii, nie stawia projektantów realizujących precyzyjne procesy produkcyjne w zbyt komfortowej sytuacji.



Rysunek 1.5. Wpływ zjawisk filtracyjnych i wielkości cząstek na skuteczność osadzania pyłu [22]

Rosnąca odpowiedzialność realizatorów, coraz większy margines niepewności w ocenie numerycznych wielkości przedziałowej skuteczności filtracji oraz wyraźne przesuwanie się obszaru rozważań w kierunku frakcji submikronowych wskazują na konieczność formułowania nowych, uogólnionych podstaw opisu złożonych struktur filtracyjnych oraz weryfikacji stosowanych dotychczas metod ich doboru.

Niniejszej rozprawa doktorska podejmuje próbę oceny wpływu zróżnicowania parametrów strukturalnych wybranych materiałów filtracyjnych na zmienność charakterystyk ich numerycznej skuteczności przedziałowej. Porównano wyniki badań eksperymentalnych z predykcją dokonaną w oparciu o istniejące modele analityczne. Uwzględniając fakt coraz większego udziału losowo zmiennych czynników decydujących o rzeczywistej skuteczności filtracji, podjęto próbę sformułowania modelu probabilistycznego, pozwalającego na uogólnienie wzajemnego związku parametrów strukturalnych medium filtracyjnego i uziarnienia filtrowanego aerozolu.



a) czysty materiał

b) materiał po dłuższym okresie eksploatacji

Rysunek 1.6. Materiał filtracyjny w warunkach filtracji ustalonej (a) i nieustalonej (b) [83]

Wszystkie rozważania przeprowadzono dla warunków ustalonych, odnoszących procesy do początkowego stadium filtracji przez warstwy jeszcze nie obłożone zatrzymanym pyłem, gdyż jest to obszar warunków najbardziej niekorzystnych z punktu widzenia skuteczności osadzania ziaren w materiałach filtracyjnych (Rysunek 1.6).

2. ZAKRES PRACY

Rozważania zmierzające do rozwiązania sprecyzowanych powyżej problemów naukowych zawarto w kolejnych 6 rozdziałach pracy. W Rozdziale 3 - *Teoretyczne podstawy procesu filtracji powietrza*, po omówieniu podstawowych pojęć i definicji, przedstawiono przegląd teoretycznych podstaw opisu procesu filtracji powietrza oraz podstawowych mechanizmów, decydujących o skuteczności zatrzymywania ziaren w złożonych strukturach filtracyjnych. Opisano i sklasyfikowano istniejące modele matematyczne, oceniając ich wiarygodność oraz przydatność, w zakresie analitycznego przewidywania numerycznej skuteczności filtracji. W Rozdziale 4 - *Badania eksperymentalne*, opisano wybór włókien oraz ocenę charakteryzujących je parametrów oraz zakres i sposób przeprowadzania badań, które obejmowały: określanie całkowitej i przedziałowej skuteczności filtracji oraz strat ciśnienia przy przepływie przez warstwy filtracyjne. Rozdział 5 - *Analiza porównawcza teoretycznych i rzeczywistych wartości numerycznej przedziałowej skuteczności filtracji*, zawiera omówienie uzyskanych wyników oraz ocenę porównawczą obliczeń teoretycznych i wyników badań, wskazując jednoznacznie na konieczność poszukiwania nowych, bardziej wiarygodnych dróg analitycznego przewidywania numerycznej skuteczności filtracji. W Rozdziale 6 - *Opis procesu filtracji w ujęciu probabilistycznym*, podjęto próbę sformułowania uogólnionego modelu procesu filtracji, opartego na statystycznym wnioskowaniu z przeprowadzonych pomiarów. Rozdział 7 - *Kierunki doskonalenia struktury i właściwości wysokoskutecznych materiałów filtracyjnych*, poświęcono omówieniu tych wniosków z badań, które mogą być istotne dla przyszłego poszukiwania bardziej doskonałych materiałów. Rozdział 8 - *Wnioski*, zawiera podsumowanie uzyskanych w toku realizacji pracy doświadczeń naukowych, których rozwiązania uznano za istotne przy formułowaniu tematu rozprawy.

Po Rozdziale 8 zamieszczono zestawienie stosowanych w pracy oznaczeń oraz wykaz literatury.

Całość pracy uzupełniają 3 załączniki:

Załącznik 1 - *Wyniki pomiarów i analiz teoretycznych*,

Załącznik 2 - *Podstawy teoretyczne modelu regresji wieloparametrowej oraz wyniki analizy statystycznej*,

Załącznik 3 - *Zdjęcia mikroskopowe oraz próbki włókien filtracyjnych*.

3. TEORETYCZNE PODSTAWY PROCESU FILTRACJI POWIETRZA

3.1. Podstawowe pojęcia i definicje

3.1.1. Aerosol, cząstka, pył

Aerosol - układ dwu- lub trójfazowy składający się z gazowej fazy rozpraszającej oraz stałej lub ciekłej albo stałej i ciekłej fazy rozproszonej, spełniający warunek stabilności, tzn. istniejący w czasie, w którym bierze on udział w rozpatrywanym procesie [63].

Cząstka fazy rozproszonej aerosolu - pojedynczy stały lub ciekły element fazy rozproszonej aerosolu [63].

Cząstka (ziarno) pyłu - pojedynczy element ciała stałego przechodzący przez sito o wymiarze oczek 300 μm , wchodzący w skład fazy rozproszonej aerosolu lub w skład warstwy pyłu [63].

Cząstki ultradrobne - cząstki o średnicy równoważnej mniejszej od 0.1 μm [28].

Cząstki submikronowe - cząstki o średnicy równoważnej mniejszej od 1 μm .

Makrocząstki - cząstki o średnicy równoważnej większej od 5 μm [28].

Przedział wymiarów cząstek - prawostronnie i lewostronnie otwarty lub domknięty przedział wymiarów cząstek określonego rodzaju [63].

Pył - zbiór cząstek ciała stałego przechodzącego przez sito o wymiarze oczek 300 μm [63].

Średnia droga swobodna cząstki gazu - dla cząsteczek mających rozkład prędkości Maxwella-Bolzmann jest to odległość przebyta przez molekułę pomiędzy dwoma kolejnymi zderzeniami; dla powietrza o temperaturze $T=293\text{ K}$ i ciśnieniu $p=1013\text{ hPa}$ wynosi $\lambda=6.53 \cdot 10^{-8}\text{ m}$ [18].

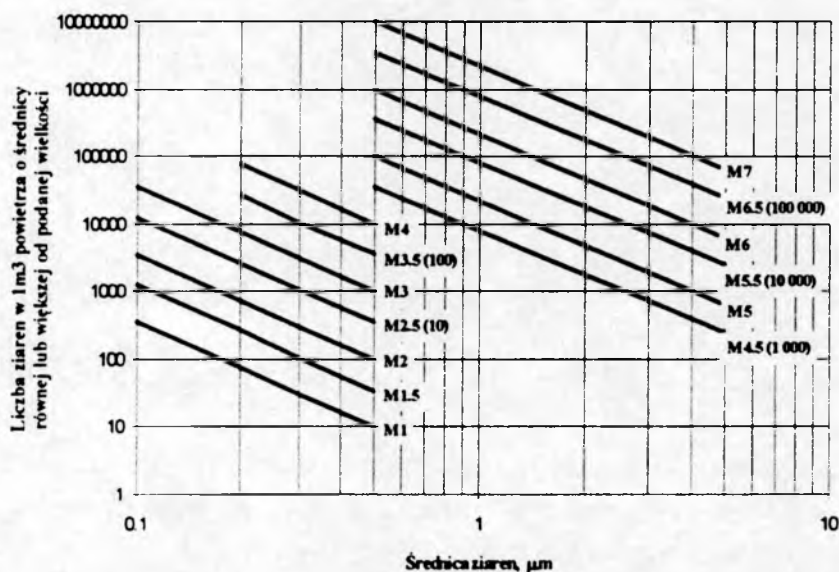
Zastępcza średnica cząstki - średnica cząstki sferycznej o takich samych właściwościach geometrycznych, optycznych, elektrycznych lub aerodynamicznych, jak cząstka rzeczywista [63].

3.1.2. Pomieszczenia czyste

Pomieszczenie (obszar, strefa) czyste - ściśle zdefiniowana przestrzeń, w której stężenie zawieszonych w powietrzu ziaren jest dokładnie kontrolowane na (lub poniżej) określonym bardzo niskim poziomie i przedstawiane jako ilość ziaren w jednostce objętości powietrza. Pomieszczenie czyste jest budowane i użytkowane w sposób umożliwiający zminimalizowanie wprowadzenia, wytwarzania i gromadzenia cząstek wewnątrz niego. W pomieszczeniu takim inne parametry powietrza (temperatura, wilgotność powietrza, układ ciśnienia) są w razie potrzeby również kontrolowane i utrzymywane na wymaganym poziomie [21], [28].

Klasa czystości pyłowej pomieszczenia - określana przez poziom czystości definiowany jako maksymalna dopuszczalna ilość cząstek w jednostce objętości powietrza (w układzie jednostek SI - w 1 m^3) większych od podanej ich średnicy. W najczęściej na świecie stosowanej normie dotyczącej pomieszczeń czystych, Fed. Std. 209E [21], nazewnictwo klas czystych (podawane w układzie metrycznym i oznaczone przez literę "M" oraz symbol liczbowy: M1, M1.5, ..., M7) pochodzi od mantysy logarytmu dziesiętnego z maksymalnej dopuszczalnej ilości cząstek o wymiarze $0.5 \mu\text{m}$ i większym w 1 m^3 powietrza. Poniżej zamieszczono graficzne przedstawienie granic klas czystości wykonane na podstawie Tabeli 1 znajdującej się w Fed. Std. 209E (Rysunek 3.1). Dodatkowo na wykresie znajdują się nazwy klas pomieszczeń czystych według poprzedniej wersji tej normy Fed. Std. 209D.

Najnowsza klasyfikacja pomieszczeń czystych jest przedstawiona w propozycji normy ISO/DIS 14644-1 (1996) [28]. W tej normie nazewnictwo klas (1, 2, ..., 9) oparte jest również na mantysie logarytmu dziesiętnego z maksymalnej dopuszczalnej ilości cząstek w 1 m^3 powietrza z tą różnicą, że ziarnami odniesienia są cząstki o wymiarze $0.1 \mu\text{m}$ i większym. Graficzne przedstawienie klas czystości według tej normy zamieszczono we wstępie do pracy doktorskiej (Rozdział 1, Rysunek 1.3).



Rysunek 3.1. Granice klas czystości pyłowej pomieszczeń wg Fed. Std. 209E [13]

3.1.3. Materiały filtracyjne

Filtr aerozolu - urządzenie służące do oddzielania cząstek stałych lub ciekłych ze strumienia gazu (aerozolu), w którym są zawieszone. Najważniejszym elementem urządzenia jest najczęściej włóknista lub porowata warstwa lub zespół warstw [64].

Element filtracyjny - część filtra, na której lub w której zatrzymywane są cząstki [64].



Efektywna średnica włókna d_{efw} - średnica włókna modelowego, w którym uporządkowane włókna o średnicy efektywnej podlegają takim samym siłom i zjawiskom jak włókna rzeczywiste.

Charakterystyka filtra - zbiór danych zawierających podstawowe właściwości filtracyjne i przepływowe filtru [8].

Filtr HEPA (High Efficiency Particulate Air) - standardowy filtr aerozoli koloidalnych o średniej i wysokiej skuteczności filtracji (klasy EU10÷EU13).

Filtr ULPA (Ultra Low Penetration Air) - filtr aerozoli koloidalnych, o bardzo wysokiej skuteczności filtracji (klasy EU14÷EU17).

Materiał filtracyjny - materiał, przez który przepływa oczyszczane powietrze, zamieszczony pomiędzy ramami filtra powietrza w sposób wynikający z jego konstrukcji; oczyszcza powietrze przez zatrzymanie pyłu na jego powierzchni i wewnątrz warstwy materiału. Materiały filtracyjne mogą być wykonane jako włókniny, tkaniny, dzianiny, papiery, bibuły, maty.

Włóknina¹⁾ - wytworzony płaski wyrób, runko lub runo o włóknach zorientowanych kierunkowo lub przypadkowo, połączonych przez tarcie i/lub kohezję i/lub adhezję, wyłączając papier (wyjaśnienie poniżej) oraz wyroby splecione przez tkanie, dzianie, wytworzone techniką "tufing", przesywane zawierające przędze lub filamenty wiążące, albo spilśnione metodą moką, niezależnie od tego czy były dodatkowo igłowane [68].

Dla odróżnienia włóknin formowanych na mokro od papierów formowanych na mokro, materiał lub wyrób powinien być uznany za włókninę, jeżeli:

1. więcej niż 50% zawartości w masie włóknistej jest wykonana z włókien (wyłączając chemicznie przerobione włókna roślinne), przy stosunku długości do średnicy większym od 300, lub, jeśli warunki podane w punkcie 1 nie są spełnione, to spełnione są następujące warunki:
2. więcej niż 30% masy włóknistej jest wykonane z włókien (wyłączając chemicznie przerobione włókna roślinne), przy stosunku długości do średnicy większym od 300 i pozorna masa właściwa jest mniejsza od 0.40 g/cm^3 [68].

Papier¹⁾ - określenie przyjęte dla pewnego zbioru materiałów w postaci arkusza albo wstęgi, uformowanych ze spilśnionych włókien, głównie celulozowych. W tradycyjnych procesach wytwarzania papieru środkiem płynnym jest zwykle woda, jednak w nowych technologiach stosuje się również powietrze lub inne płyny.

W zasadzie materiały o gramaturze poniżej 225 g/m^2 określa się jako papier, a materiały o większej gramaturze jako tekturę [65].

Papier filtracyjny - papier przeznaczony do selektywnego rozdziału cząstek z zawiesiny [65].

¹⁾ ze względu na skomplikowany sposób rozróżniania oraz na zwyczajowo stosowane nazewnictwo, w pracy nazwy te stosowane są zamiennie

Gramatura - masa jednostkowej powierzchni papieru lub tektury oznaczona znormalizowaną metodą badania, g/m^2 [69].

Czynna powierzchnia filtracyjna - całkowita powierzchnia filtracyjna filtru kontaktująca się z przepływającym powietrzem, m^2 [71].

Warstwa porowata - przepuszczalna warstwa stałego materiału o dowolnej postaci posiadająca wolne przestrzenie o niewielkich rozmiarach zwane porami [64].

Gęstość (stopień) upakowania warstwy porowatej - stosunek objętości elementów warstwy do objętości warstwy, równoważny stosunkowi pozornej gęstości warstwy do jej gęstości statycznej, (wielkość bezwymiarowa) [58].

Porowatość warstwy porowatej - stosunek objętości porów warstwy i porów elementów do objętości warstwy, (wielkość bezwymiarowa) [58].

Kinetyczna (pozorna) gęstość warstwy porowatej - stosunek masy elementów do objętości warstwy, kg/m^3 [58].

Statyczna gęstość warstwy porowatej - stosunek masy elementów do ich objętości statycznej, kg/m^3 [58].

Statyczna objętość elementu oddzielającego - objętość materiału elementu bez objętości porów, m^3 [58].

3.1.4. Proces filtracji powietrza i jego opis

Proces filtracji powietrza (gazów) - zjawisko lub zespół zjawisk fizycznych, pod wpływem których cząstki aerozolowe są wydzielane ze strumienia powietrza (gazów), w którym są zawieszone, gdy przepływając znajduje się on w pobliżu powierzchni kolektorów (elementów filtracyjnych np. włókien) [82].

Jest to proces zmienny w czasie i w związku z tym można go podzielić na dwie fazy:

- filtrację ustaloną,
- filtrację nieustaloną.

Filtracja ustalona - etap filtracji, podczas którego nie ulegają zmianie wartości parametrów materiału filtracyjnego wpływających na ten proces. Jest to, z teoretycznego punktu widzenia, przepływ czystego powietrza, sprowadzający filtrację do zagadnień przepływowych. Praktycznie przyjmuje się jednak, że filtracja ustalona występuje w początkowym okresie, tj. wtedy, gdy w materiale osadzona jest mała masa ziaren pyłu, powodująca tylko nieistotne zmiany w strukturze materiału [24] lub elementy warstwy filtracyjnej nie są jeszcze pokryte pyłem, a struktura geometryczna warstwy może być w miarę dokładnie określona wielkością tworzących ją elementów (np. średnice włókien), porowatością, grubością warstwy [35].

Filtracja nieustalona występuje w dowolnej chwili czasowej poza okresem początkowym. Wymaga uwzględnienia wpływu zmian struktury warstwy filtracyjnej wywołanych zgromadzeniem w niej lub na niej zatrzymanego pyłu tworzącego wtórną warstwę filtracyjną (tzw. placek filtracyjny). Warstwa ta wpływa na zmianę straty ciśnienia powietrza i skuteczności jego oczyszczania [35].

Wskaźniki filtracyjne - służą do opisu i oceny procesu filtracji powietrza. Są to:

- skuteczność filtracji (lub współczynnik przeskoku):
 - ♦ przedziałowa (frakcyjna),
lub
 - ♦ całkowita,
- strata ciśnienia podczas przepływu powietrza,
- pojemność pyłowa filtru.

Skuteczność filtracji - stosunek ilości (masy, ilości ziaren) pyłu zatrzymanej przez filtr do ilości doprowadzonej do filtru.

Współczynnik przeskoku (penetracji, przenikania) - stosunek ilości pyłu opuszczającego filtr do ilości pyłu doprowadzonego do filtru.

Skuteczność przedziałowa (frakcyjna) - stosunek liczby lub masy cząstek z określonego przedziału ich wymiarów, oddzielonego w oddzielaczu (np. filtrze) w jednostce czasu, odpowiednio do liczby lub masy cząstek doprowadzonych do oddzielacza w jednostce czasu; zależnie od oznaczenia rozróżnia się przedziałową skuteczność liczbową lub wagową [63].

Skuteczność całkowita - skuteczność zatrzymania całej masy pyłu bez uwzględniania podziału na frakcje.

Skuteczność przedziałową filtracji powietrza η_i oblicza się ze wzoru:

$$\eta_i = 1 - \frac{S_{P_i}}{S_{Z_i}} \quad (3.1)$$

Przedziałowy współczynnik przeskoku k_i oblicza się ze wzoru:

$$k_i = \frac{S_{P_i}}{S_{Z_i}} \quad (3.2)$$

Oba te współczynniki, będące miarą oceny filtracji powietrza, są związane zależnością:

$$\eta_i + k_i = 1 \quad (3.3)$$

Skuteczność przedziałowa filtracji może być wyrażona w oparciu o pojęcie skuteczności całkowitej filtracji jako:

$$\eta_i = \eta_c \frac{S_{W_i}}{S_{P_i}} \quad (3.4)$$

$$\eta_i = \frac{S_{P_i} - (1 - \eta_c \cdot S_{Z_i})}{S_{P_i}} \quad (3.5)$$

$$\eta_i = \frac{\eta_c \cdot S_{W_i}}{\eta_c \cdot S_{W_i} + (1 - \eta_c \cdot S_{Z_i})} \quad (3.6)$$

gdzie:

k_i przedziałowy współczynnik przeskoku odniesiony do ziaren pyłu o średnicy

	zastępczej D_{pi} , dla określonego przedziału wymiarowego cząstek, -
S_{Pi}	ilość ziaren o średnicy zastępczej D_{pi} w pyłe wprowadzanym na warstwę filtracyjną, szt.
S_{wi}	ilość ziaren o średnicy zastępczej D_{pi} w pyłe zatrzymanym w warstwie filtracyjnej, szt.
S_{zi}	ilość ziaren o średnicy zastępczej D_{pi} w pyłe, które przeszły przez warstwę filtracyjną, szt.
η_C	całkowita skuteczność filtracji powietrza, -
η_i	współczynnik przedziałowej skuteczności filtracji powietrza odniesiony do ziaren pyłu o średnicy zastępczej D_{pi} , dla określonego przedziału wymiarowego cząstek, -

Obszar największej przenikalności (obszar selektywności filtru) - zakres wymiarowy cząstek, dla których występuje minimum skuteczności filtracji.

Pojemność pyłowa filtru - masa pyłu zatrzymanego przez filtr, przypadająca na jednostkę powierzchni filtracyjnej, przy której został osiągnięty stan końcowy filtru, g/m^2 [72].

Strata ciśnienia - różnica ciśnienia powietrza przed i za materiałem filtracyjnym, Pa.

Etapy analizy fizycznej procesu filtracji [35]:

- opływ pojedynczych kolektorów (elementów filtracyjnych, takich jak np. włókna) i ich grup przez strumień gazu (powietrza),
- zderzenia pojedynczych ziaren pyłu z elementami filtracyjnymi opisywane jako wynik wystąpienia poszczególnych zjawisk i sił oddziaływających na ziarno,
- łączne oddziaływanie wielu rodzajów zjawisk na prawdopodobieństwo zderzeń i zatrzymywania ziaren na powierzchni włókien (a więc na skuteczność procesu filtracji) w początkowej fazie filtracji traktowanej jako proces ustalony,
- zmienność budowy warstwy filtracyjnej w wyniku gromadzenia się w niej i na jej powierzchni pyłu oraz wpływ tej zmienności na skuteczność filtracji, będącej procesem nieustalonym oraz na wzrost oporów przepływu powietrza.

Mechanizmy filtracji - zjawiska, z występowania których wynika separacja ziaren pyłu ze strumienia przepływającego gazu (powietrza) oraz zatrzymanie ich na powierzchni lub pomiędzy elementami filtracyjnymi.

Jako podstawowe mechanizmy filtracyjne najczęściej wymienia się:

- dyfuzję (dyfuzję molekularną),
- zderzenie bezwładnościowe (inercyjne),
- zaczepienie,
- osadzanie grawitacyjne,
- oddziaływanie elektrostatyczne.

Proces oczyszczania gazu (powietrza) jest zatem wynikiem złożonego układu zjawisk działających w przestrzeni urządzenia filtracyjnego, sprzyjających usunięciu cząstek z gazu i osadzenia ich na powierzchni kolektora. W trakcie procesu filtracji względny ruch cząstek w stosunku do strumienia gazu powoduje powstawanie dodatkowych sił

oporu hydrodynamicznego ze strony gazu. Pozostając dostatecznie długo w obszarze działania różnorodnych sił i zjawisk, cząstki mogą osadzać się na powierzchni kolektora w wyniku bezpośredniego zderzenia lub mogą być do niego kierowane wskutek działania mechanizmów filtracyjnych. Mechanizmy te mogą oddziaływać pojedynczo lub w odpowiedniej kombinacji, przy czym działanie jednego z nich jest zawsze dominujące [82].

Bezwymiarowe liczby podobieństwa - podobnie jak w innych dziedzinach nauk technicznych, również w teorii filtracji służą dla scharakteryzowania przebiegu procesu.

W pracy wykorzystano wymienione poniżej liczby podobieństwa [15], [35], [47]:

- **liczba Reynoldsa Re** - charakteryzująca przy przepływie płynów lepkich stosunek sił bezwładności do sił lepkości (tarcia wewnętrznego); dla przepływu wokół włókna przyjmuje ona postać:

$$Re = \frac{\rho_g \cdot d_w \cdot u}{\mu_g} \quad (3.7)$$

gdzie:

d_w średnica włókna, m

Re liczba Reynoldsa, -

u prędkość napływu powietrza, m/s

ρ_g gęstość gazu (powietrza), kg/m³

μ_g współczynnik dynamicznej lepkości gazu (powietrza), Pa·s

- **współczynnik dyfuzji D** - dotyczy ziaren pyłu o średnicy zbliżonej do wielkości swobodnej drogi cząsteczek gazu (wraz z liczbą Pecleta i stałą Cunninghama opisuje mechanizm dyfuzyjny):

$$D = \frac{C_u \cdot k_B \cdot T}{6\pi \cdot r_{cz} \cdot \mu_g} \quad (3.8)$$

gdzie:

C_u liczba Cunninghama, -

D współczynnik dyfuzji cząstek, m²/s

k_B stała Boltzmana, kJ/K, $k_B = 1.38 \cdot 10^{-20}$ kJ/K

r_{cz} promień cząstki aerozolu, m

T temperatura powietrza, K

μ_g współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, Pa·s

- **liczba Pecleta Pe** - liczba podobieństwa stosowana w teorii wymiany ciepła znajdująca zastosowanie w opisie zjawiska dyfuzji po zastąpieniu współczynnika wyrównania temperatury przez współczynnik dyfuzji D :

$$Pe = \frac{2 \cdot a_{w \text{ str}} \cdot u}{D} \quad (3.9)$$

gdzie:

- $a_{w\ sr}$ średni promień włókna filtru, m
 D współczynnik dyfuzji cząstek, m^2/s
 Pe liczba Pecleta, -
 u prędkość napływu powietrza, obliczona z objętościowego natężenia przepływu powietrza i powierzchni filtru, m/s

- **stała Cunninghama Cu** - wielkość korygująca prawo Stokesa w przypadku występowania ziaren pyłu o małych średnicach:

$$Cu = 1 + \frac{\lambda}{r_{cz}} \left[1.257 + 0.41 \cdot \exp\left(-1.1 \cdot \frac{r_{cz}}{\lambda}\right) \right] \quad (3.10)$$

gdzie:

- Cu liczba Cunninghama, -
 r_{cz} promień cząstki aerozolu, m
 λ średnia długość drogi swobodnej cząstki gazu, m

- **liczba Stokesa Stk** - opisuje właściwości ziarna w postaci ilorazu jego "drogi hamowania" i średnicy włókna; charakteryzuje mechanizm bezwładnościowy:

$$Stk = \frac{2 \cdot r_{cz}^2 \cdot \rho_g \cdot u \cdot Cu}{9 \cdot \mu_g \cdot a_{w\ sr}} \quad (3.11)$$

gdzie:

- $a_{w\ sr}$ średni promień włókna, m
 Cu liczba Cunninghama, -
 r_{cz} promień cząstki aerozolu, m
 Stk liczba Stokesa, -
 u prędkość napływu powietrza, m/s
 μ_g współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, Pa·s
 ρ_g gęstość powietrza, kg/m^3

- **liczba bezpośredniego zaczepienia R** - charakteryzuje mechanizm bezpośredniego zaczepienia:

$$R = \frac{r_{cz}}{a_{w\ sr}} \quad (3.12)$$

gdzie:

- $a_{w\ sr}$ średni promień włókna, m
 R liczba bezpośredniego zaczepienia, -
 r_{cz} promień cząstki aerozolu, m

- **liczba Knudsenowa Kn** - uwzględnia zjawisko poślizgu cząstek na powierzchni włókna wtedy, gdy średnice pyłu osiągają wielkość zbliżoną do średniej drogi swobodnej molekuly gazu; ziarna pyłu ślizgają się wówczas między cząsteczkami gazu i rzeczywiste prędkości ich ruchu są większe niż obliczone z prawa Stokesa, a opory ruchu zmniejszają się; zjawisko poślizgu cząstek może wystąpić również

wtedy, gdy proces filtracji będzie zachodził przy znaczących wielkościach podciśnienia:

$$Kn = \frac{2 \cdot \lambda}{d_w} \quad (3.13)$$

gdzie:

d_w średnica włókna, m

Kn liczba Knudsen, -

λ średnia długość drogi swobodnej cząstki gazu, m, $\lambda=6.53 \cdot 10^{-8}$ m (dla powietrza o temperaturze $T=293$ K i ciśnieniu $p=1013$ hPa)

Tabela 3.1. Klasyfikacja rodzaju przepływu przez materiał filtracyjny w oparciu o liczbę Knudsen [11], [23], [46]

Wartość liczby Kn , -	Opis przepływu przez materiał filtracyjny
$0 < Kn < 10^{-3}$	obszar przepływu, dla którego mogą być stosowane równania hydrodynamiki klasycznej
$10^{-3} < Kn < 0.25$	występuje nieciągłość przepływu spowodowana istnieniem poślizgu cząstek aerozolu na powierzchni włókien; przepływ w warunkach podciśnienia
$0.25 < Kn < 10$	przepływ w obszarze przejściowym
$Kn > 10$	przepływ o charakterze molekularnym (w warunkach normalnego ciśnienia dotyczy włókien o średnicach $< 0.01 \mu\text{m}$)

• **Parametr osadzania grawitacyjnego G**

$$G = \frac{Stk}{2 \cdot Fr} \quad (3.14)$$

gdzie:

Fr liczba Froude'a, -

G parametr osadzania grawitacyjnego, -

Stk liczba Stokesa, -

- **liczba Froude'a Fr** - charakteryzuje stosunek energii kinetycznej ziarna do jego energii potencjalnej:

$$Fr = \frac{u^2}{2 \cdot g \cdot d_w} \quad (3.15)$$

gdzie:

d_w średnica włókna, m

Fr liczba Froude'a, -

g przyspieszenie ziemskie, m/s^2

u prędkość napływu powietrza, m/s

3.2. Opływ elementów filtracyjnych przez strumień gazu

Napływający na warstwę filtracyjną gaz (powietrze) ulega podziałowi na szereg strug, które z kolei mogą się dalej dzielić lub łączyć wewnątrz warstwy. Skomplikowana

droga, jaką przebywa ziarno pomiędzy elementami filtracyjnymi, stosunkowo niewielkie prędkości napływu gazu oraz różnego rodzaju oddziaływające siły, sprzyjają zwiększeniu prawdopodobieństwa separacji ziarna ze strugi gazu i jego osadzenia na powierzchni elementu filtracyjnego [35].

Ukształtowanie linii prądu wokół elementu filtracyjnego (np. kuli lub walca) zależy od wartości liczby Reynoldsa, a więc m.in. od prędkości przepływu oraz charakterystycznego wymiaru elementu filtracyjnego [35].

Dla włóknistych materiałów filtracyjnych, z wyjątkiem zaliczanych do nich siatek, opływ gazu wokół tworzących je elementów ma charakter zdecydowanie laminarny, dla pozostałych mieści się (nawet w przypadkach największych wymiarów elementów i największych prędkości) w zakresach przepływu laminarnego i przejściowego (do $Re = 100$). Większe wartości liczby Reynoldsa (do $Re=1000$) mogą wystąpić wtedy, gdy gaz ma lepkość mniejszą od lepkości powietrza [35].

Zakres niewielkich wartości liczby Reynoldsa w istotny sposób komplikuje opis opływu gazu. Konieczne staje się wówczas uwzględnienie wpływu sił tarcia pomiędzy ziarnami pyłu, cząstkami gazu i elementami filtracyjnymi.

Opis linii prądu w warstwach filtracyjnych (a ściślej w przestrzeniach pomiędzy sąsiadującymi ze sobą elementami filtracyjnymi) jest dużo bardziej skomplikowany niż w przypadku opływu pojedynczego elementu. Na przebieg linii prądu ma wpływ, oprócz charakteru ruchu gazu, także kształt elementów i ich wzajemne rozmieszczenie. Większość materiałów filtracyjnych charakteryzuje się nieregularną strukturą o przypadkowo rozmieszczonych włóknach. Stąd do opisu budowy warstwy filtracyjnej, oprócz charakterystycznych wymiarów tworzących ją elementów, wykorzystuje się wielkości zwane porowatością warstwy lub jej upakowaniem.

W przypadku gdy wymiar ziarna jest znacznie większy od średniej drogi swobodnej cząsteczki gazu (to znaczy wtedy, gdy wartość liczby Knudsen'a jest mniejsza od 1) przepływ powietrza można traktować jako przepływ w ośrodku ciągłym opisany za pomocą prawa Stokesa i innych zależności określających opory ruchu ziarna.

Kiedy ziarno jest bardzo małe, tj. jego charakterystyczny wymiar jest zbliżony do długości średniej drogi swobodnej cząsteczki gazu (która w powietrzu przy ciśnieniu atmosferycznym wynosi $\lambda=6.5 \cdot 10^{-8}$ m), nie można rozważać gazu jako ośrodka ciągłego. Ziarna pyłu "ślizgają się" pomiędzy cząsteczkami gazu i rzeczywiste prędkości ich ruchu są większe niż obliczone ze wzoru Stokesa.

Wówczas traktuje się przepływ jako występujący w ośrodku nieciągłym stosując modyfikację prawa Stokesa z zastosowaniem poprawki Cunninghama.

Przy analizie ruchu ziaren w powietrzu o ciśnieniu i temperaturze zbliżonej do warunków atmosferycznych, poprawka Cunninghama może być pomijalna dla ziaren większych od 20 μm . Obliczona bez jej uwzględnienia prędkość ruchu ziarna będzie się wówczas różniła od rzeczywistej o mniej niż 1%, podczas gdy dla ziaren o wielkości 5 μm ta różnica wyniosłaby już 5%, dla 1 μm około 17%, a ponad 300% dla ziaren o wielkości 0.1 μm [35].

Ze względu na rozważanie w niniejszej pracy procesu filtracji dla cząstek mniejszych od $1\ \mu\text{m}$, zjawisko poślizgu gazu musi być wzięte pod uwagę podczas teoretycznego opisu przebiegu osadzania ziaren na włóknach. Również ze względu na niewielkie prędkości napływu powietrza na filtr i nominalne średnice włókien wynoszące około $1\ \mu\text{m}$ (według informacji producenta), należy spodziewać się uzyskania niewielkich wartości liczby Reynoldsa kwalifikujących przepływ jako laminarny, co jak stwierdzono w [35], komplikuje opis procesu filtracji także ze względu na konieczność uwzględnienia tarcia.

3.3. Mechanizmy filtracji

3.3.1. Dyfuzja molekularna

W miarę zmniejszania się średnic cząstek pyłu i ich masy, aż do osiągnięcia wielkości charakteryzujących cząstki gazu, ziarna w coraz większym stopniu będą podlegać prawom rządzącym kinetyką gazów [47]. Cząsteczki gazu znajdując się w nieustannym ruchu będą uderzać w submikronowe ziarna, wprawiając je dodatkowo w zygzakowate ruchy zwane ruchami Browna [35].

W procesie filtracji zjawisko dyfuzji i związane z tym ruchy ziaren nakładają się na zjawisko przepływu gazu w warstwie filtracyjnej. Tory ruchu bardzo drobnych ziaren pyłu, przemieszczających się wraz ze strugami gazu i poruszających się dodatkowo ruchami Browna, mogą znacznie odbiegać od kształtu linii prądu, także w strefie opływu elementu filtracyjnego. Zderzenia cząsteczek gazu, poruszających się ruchami Browna, z ziarnami pyłu mogą spowodować wytrącanie najmniejszych ziaren pyłu ze strumienia gazu w kierunku elementów filtracyjnych. Poszczególne ziarna pyłu, znajdujące się w strudze gazu napływającego na element filtracyjny, będą miały różne możliwości zderzenia się z powierzchnią tego elementu.

Prawdopodobieństwo dyfuzyjnego zderzenia ziarna pyłu z powierzchnią elementu filtracyjnego zależy od wartości współczynnika dyfuzji pyłu w gazie (wzór (3.8), Rozdział 3.1.4), a więc od wielkości ziarna i właściwości termodynamicznych gazu. Zależy również od czasu przemieszczania się ziarna w pobliżu elementu filtracyjnego (związanego z prędkością przepływu gazu) oraz od początkowego położenia ziarna względem elementu, jak również od geometrycznej struktury złoża filtracyjnego.

Znaczenie mechanizmu dyfuzyjnego jest szczególnie istotne dla ziaren submikronowych. Dla ziaren większych od $1\ \mu\text{m}$ ruchy Browna słabną, przybierają formę drgań, a dla ziaren większych od $20\ \mu\text{m}$ - stają się niezauważalne [35].

W przypadku cząstek o średnicach $0.3\div 1\ \mu\text{m}$ współczynnik dyfuzji przyjmuje małe wartości, a jednocześnie dla tych cząstek, w zakresie prędkości do $1\ \text{m/s}$, efekt osadzania bezwładnościowego również jest mały. Wartość współczynnika dyfuzji maleje bowiem ze wzrostem prędkości przepływu aerozolu oraz wzrostem wielkości cząstek. Podwyższenie temperatury aerozolu prowadzi do zwiększenia wartości współczynnika dyfuzji, co z kolei spowoduje wzrost efektywności dyfuzyjnego osadzania submikronowych cząstek.

Zmiana ciśnienia aerozolu również wpływa na wielkość efektywności osadzania dyfuzyjnego. Jest to związane ze zmianą wartości liczby Cunninghama dla małych cząstek. Jednocześnie wpływa ona na zmianę wartości liczby Pecleta i współczynnika dyfuzji. Wynika to z faktu, że średnia długość drogi swobodnej cząstek gazu jest funkcją jego ciśnienia i przy stałej temperaturze jest odwrotnie do niego proporcjonalna. Z tego właśnie powodu skuteczność osadzania dyfuzyjnego powinna rosnąć ze spadkiem ciśnienia gazu [81].

Wpływ struktury materiału filtracyjnego na skuteczność osadzania ziaren w wyniku występowania zjawiska dyfuzji molekularnej był rozważany przez wielu naukowców. I tak np. według Stieczkiny i Kirsza, gęstość upakowania nie wpływa w istotny sposób na intensywność osadzania dyfuzyjnego. Inni autorzy podają, że wraz ze wzrostem gęstości materiału zmniejsza się wpływ efektu dyfuzyjnego na skuteczność filtracji [37].

Ocenę skuteczności dyfuzyjnego osadzania pyłu w procesie filtracji dokonuje się zazwyczaj wychodząc z prawdopodobieństwa zderzeń dyfuzyjnych z pojedynczym elementem złoża.

Wokół każdego cylindra (włókna) istnieje warstwa przepływającego gazu, w której będzie istniało prawdopodobieństwo zderzenia cząstki z powierzchnią włókna tylko w wyniku dyfuzji (tzw. warstwa dyfuzyjna). Zależności służące do określenia grubości spokojnej warstwy dyfuzyjnej aerozolu, z której cząstki całkowicie osadzą się na włóknie w wyniku dyfuzji po czasie t , podane są m. in. w [81], [35].

Prawdopodobieństwo osadzania dyfuzyjnego określa się na podstawie analizy zmian stężenia pyłu zachodzących w trakcie opływu elementu lub z analogii do konwekcyjnej wymiany masy lub ciepła. W obu przypadkach opisy matematyczne odniesione są do elementów o regularnych kształtach, tj. kul przedstawiających ziarna w złożach ziarnistych lub walców przedstawiających włókna we włóknistych materiałach filtracyjnych.

Opis prawdopodobieństwa zderzeń dyfuzyjnych komplikuje się, jeśli rozpatrywane warunki będą bardziej zbliżone do panujących w rzeczywistych warstwach filtracyjnych, a więc wtedy, kiedy pole przepływu jest kształtowane przez sąsiadujące ze sobą elementy filtracyjne. Charakterystyka struktury złoża jest dokonywana wówczas za pomocą wielkości jego elementów (średnice włókien) i porowatości lub gęstości upakowania złoża.

Podsumowując, można przyjąć, że efekt osadzania dyfuzyjnego jest dobrze widoczny dla cząstek o średnicy nie przekraczającej $1 \mu\text{m}$, szczególnie w przypadku, gdy średnica włókna jest większa od średnicy ziarna. W warunkach wysokoskutecznego oczyszczania aerozolu praktycznie występuje tylko zjawisko dyfuzji i zaczepiania [81].

3.3.2. Zderzenia bezwładnościowe

Przy przepływie zapyłonego powietrza wokół elementów filtracyjnych, tory ziaren pyłu o większej masie i o dużej średnicy, nie są identyczne z liniami prądu. Ziarna

takie opuszczają linie prądu i docierają do powierzchni elementu filtracyjnego (do włókna warstwy filtracyjnej) poprzez warstwę przyścienną. Taki mechanizm osadzania występuje przy dużych prędkościach przepływu powietrza (1÷3 m/s) oraz dla ziaren o dużych wymiarach.

Przy bardzo małej masie cząstek, ich niewielkiej średnicy (<1 μm) i niedużej prędkości przepływu (<1 m/s) prawdopodobieństwo zderzenia bezwładnościowego z powierzchnią włókna może być niewielkie. Praktycznie dla cząstek o średnicy ≤0.2 μm i prędkości mniejszych od 1 m/s wpływ bezwładności na całkowitą skuteczność filtracji może być pominięty. Natomiast dla cząstek ≥1 μm mechanizm bezwładnościowy staje się jednym z najistotniejszych zjawisk w procesie filtracji [82].

Granica występowania efektu bezwładnościowego może być zdefiniowana graniczną (krytyczną) wartością liczby Stokesa. Jest ona różnie określona przez różnych autorów. I tak np.:

- dla pojedynczych izolowanych cylindrów przy przepływie potencjalnym - Bosanquet określił krytyczną wartość liczby Stokesa jako $Stk_{KR}=0.125$, Albrecht jako $Stk_{KR}=0.18$, przy przepływie lepkiem - Langmuir podał wartość $Stk_{KR}=0.54$ [35],
- podczas przepływów turbulentnych cząstki mogą zderzać się także (w sferze wirów) z przeciwną do kierunku ruchu powierzchnią cylindra i wówczas $Stk_{KR}=0$ [35].

Według [81] właściwie już przy wartości $Stk<0.1$ zaobserwować można małą skuteczność osadzania bezwładnościowego.

Wartość efektywności osadzania bezwładnościowego rośnie wraz ze wzrostem cząstek, proporcjonalnie do sześciangu wielkości ich średnic oraz ze wzrostem prędkości przepływu.

W wyniku zwiększenia lepkości aerozolu występującego przy wzroście temperatury można się spodziewać, że będzie zmniejszać się prawdopodobieństwo wychwycenia większych cząstek w wyniku zjawiska bezwładności. Jednocześnie będzie wzrastał opór przepływu aerozolu. Zwiększenie gęstości aerozolu wpłynie na wzrost skuteczności filtracji w wyniku mechanizmu bezwładnościowego. Natomiast, przy jednoczesnym podwyższeniu temperatury i ciśnienia gazu, efektywność osadzenia bezwładnościowego spada w wyniku silniejszego wpływu wzrostu ciśnienia w porównaniu z wpływem podwyższenia temperatury na wartość lepkości gazu [81].

Na wielkość prawdopodobieństwa zderzeń inercyjnych z pojedynczym elementem wchodzącym w skład warstwy filtracyjnej ma wpływ jej struktura. A zatem matematyczny opis mechanizmu bezwładnościowego nie może pomijać budowy materiału filtracyjnego (tj. jej porowatości).

3.3.3. Zjawisko zaczepienia

Ziarno pyłu może zderzyć się z elementem filtracyjnym poruszając się także wzdłuż linii prądu gazu, a więc bez wpływu mechanizmu bezwładnościowego. Takie

zjawisko, zwane mechanizmem zaczepienia, może zaistnieć w przypadku bardzo małych ziaren pyłu o niewielkiej gęstości, poruszających się z niewielkimi prędkościami, a więc wtedy, gdy zjawisko osadzania inercyjnego jest pomijalnie małe ($Pe \rightarrow \infty$, $Stk \rightarrow 0$). W skrajnym przypadku mechanizmowi zaczepienia może podlegać ziarno, które zetknie się stycznie z powierzchnią elementu filtracyjnego [35].

Prawdopodobieństwo zaczepienia ziarna o element filtracyjny jest definiowane podobnie jak prawdopodobieństwo zderzenia inercyjnego, z tym, że inaczej opisuje się wielkość strugi, dla której to prawdopodobieństwo występuje.

W formułach opisujących prawdopodobieństwo zaczepienia stosuje się wielkość zwaną parametrem zaczepienia.

Współczynnik osadzania w wyniku występowania zjawiska zaczepienia nie jest zależny od zmiany (wzrostu) prędkości przepływającego aerozolu, natomiast zmienia się zależnie od rodzaju przepływu [81], [85].

Wzrost gęstości upakowania materiału zwiększa intensywność oddziaływania mechanizmu zaczepienia.

Skuteczność zatrzymania ziaren w wyniku zaczepienia wzrasta również wraz ze zwiększaniem się wymiarów cząstek [85].

Na zwiększenie efektywności filtracji w przypadku, gdy dominującym zjawiskiem jest zaczepienie najbardziej wpływa jednoczesne występowanie w materiale włókien o różnej grubości i wynikający stąd efekt przesłaniania.

Zmiany gęstości gazu mają tu znacznie mniejszy wpływ niż w przypadku dyfuzji oraz bezwładności.

W badaniach eksperymentalnych bardzo trudno jest stworzyć warunki, w których proces filtracji przebiegałby wyłącznie w wyniku mechanizmu zaczepienia. Dlatego też porównywanie wielkości uzyskanych w wyniku rozważań teoretycznych z wynikami badań dotyczy z reguły równoczesnego występowania co najmniej dwóch mechanizmów (np. dyfuzji i zaczepienia czy bezwładności i zaczepienia) [35].

3.3.4. Osadzanie grawitacyjne

Zjawisko grawitacji ma znaczący wpływ na toru ruchu i prędkość poruszania się ziarna pyłu wówczas, gdy zapyłony gaz przepływa przez warstwę filtracyjną z bardzo małą prędkością, a ziarna charakteryzują się dużymi średnicami. Grawitacyjne osadzanie na powierzchni elementu filtracyjnego może być zauważalne dla ziaren o wielkości 1 mm, jeśli będą one przepływały z prędkością mniejszą od 0.5 mm/s przez warstwę utworzoną z włókien o średnicy 10 μm [35].

W opisie osadzania grawitacyjnego, w celu przedstawienia relacji pomiędzy wpływem bezwładności i grawitacji, stosuje się parametr osadzania grawitacyjnego G , definiowany jako stosunek liczb Stokesa i Froude'a. Osadzanie grawitacyjne staje się istotnym mechanizmem filtracji, gdy $G > 0.5Stk$ [35].

Przy określaniu całkowitego (łącznego) prawdopodobieństwa zderzeń z pojedynczym elementem, osadzanie grawitacyjne jest traktowane jako jeden ze składników sumy algebraicznej prawdopodobieństw zatrzymania ziaren w wyniku zderzeń dyfuzyjnych, bezwładnościowych, zaczepienia i grawitacyjnego osadzania.

3.3.5. Oddziaływanie elektrostatyczne

W przedstawionym powyżej opisie mechanizmów filtracyjnych ograniczono się do oceny procesu osadzania ziaren pyłu na elemencie filtracyjnym pod wpływem oddziaływań mechanicznych i termodynamicznych.

Tymczasem na charakter ruchu ziarna pyłu w pobliżu elementu filtracyjnego, a więc także na prawdopodobieństwo zderzenia, wpływać mogą również siły elektrostatycznego oddziaływania zarówno pomiędzy samymi ziarnami, jak i między ziarnami a elementami filtracyjnymi [35].

Gdy na układ cząstka-kolektor (włókno) nie działa zewnętrzne pole elektryczne, można rozróżnić następujące przypadki oddziaływania elektrostatycznego [82]:

- naładowany kolektor - naładowana cząstka,
- naładowany kolektor - cząstka obojętna,
- naładowana cząstka - obojętny kolektor.

W przypadku występowania zdecydowanej przewagi jednej z przedstawionych sytuacji, przy dodatkowo znikomym wpływie zaczeplenia (parametr zaczeplenia $R \rightarrow 0$), można w sposób przybliżony obliczyć prawdopodobieństwo elektrostatycznego osadzania na pojedynczym, wyizolowanym elemencie.

Natomiast przy słabym oddziaływaniu elektrostatycznym elementów filtracyjnych trudno jest analitycznie określić prawdopodobieństwo elektrostatycznego oddziaływania na osadzanie ziaren na ich powierzchni [35].

Każde ziarno pyłu i kropla cieczy poruszająca się wraz z gazem może posiadać ładunki elektryczne. Ładunki te powstają zarówno w trakcie tworzenia się pyłów i mgieł, jak i w trakcie ich przenoszenia przez gaz oraz uderzeń o powierzchnię ciał stałych [35]. W naturalnie naelektryzowanych aerozolach (pyłowo-gazowych i kroplowo-gazowych) istnieje na ogół równowaga ładunków dodatnich i ujemnych. Przewaga sumy ładunków jednego znaku nad sumą ładunków drugiego znaku nie przekracza 20%. O przewadze jednego z ładunków decyduje rodzaj materiału fazy rozproszonej, sposób jej powstawania i transportu [35].

Natomiast na pojawianie się ładunku elektrostatycznego w materiale może mieć wpływ elektryczne ładowanie włókien filtru w wyniku [47]:

- tarcia przy przepływie gazu przez filtr (tryboelektryzacja),
- styczności elektrycznie naładowanych ziaren z powierzchnią włókien,
- zderzenia ziaren lub ich oderwania z powierzchni włókna,
- elektrycznego naładowania włókien związanego z ich produkcją,
- trwałego naładowania elektretów w wyniku działania pola elektrycznego.

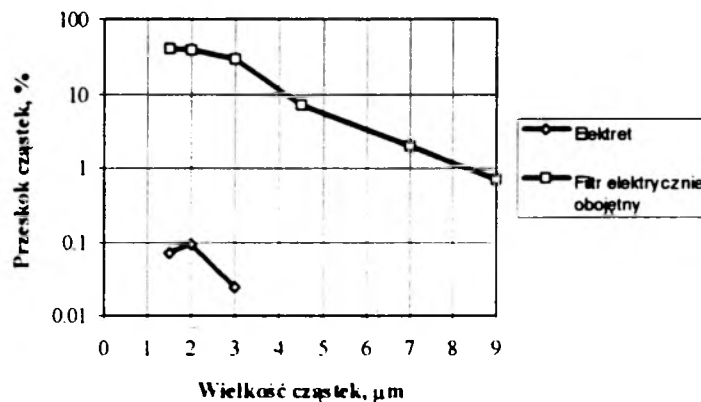
Pojęciem "elektret" obejmuje się dielektryki wykazujące stałe naelektryzowanie [78]. Niektóre z nich wprowadzone do pola elektrycznego wykazują trwałe "naelektryzowanie" po jego usunięciu [11]. Polaryzacja elektretów utrzymuje się długo, a np. w przypadku elektretów z materiałów organicznych stan ten utrzymuje się przez kilka dni lub tygodni, a dla materiałów ceramicznych nawet parę lat. Natomiast filtr wytworzony z mieszanki polipropylenu i włókien stali nierdzewnej, utrzymuje stały, choć niewielki, ładunek, którego stabilność nie jest do końca wyjaśniona, ale może się utrzymywać przez miesiące lub lata.

Takie filtry tracą część swojej skuteczności w ciągu dnia lub dwóch po ich wyprodukowaniu, przy czym dalsza strata ładunku zachodzi znacznie wolniej. W normalnych warunkach czas życia ładunków wynosi przynajmniej kilka lat [14].

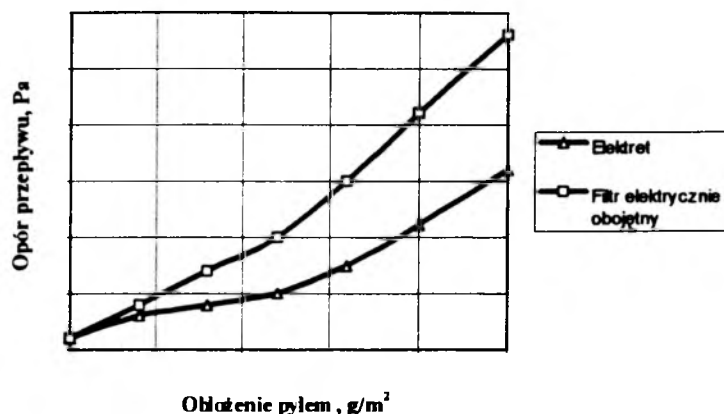
Wysoka efektywność zatrzymania submikronowych ziaren na filtrach elektretowych w początkowym stadium procesu filtracji jest niemal całkowicie wyjaśniana przyciąganiem elektrostatycznym [81].

Filtry elektretowe znalazły już zastosowanie w urządzeniach klimatyzacyjnych renomowanych producentów. W Polsce opracowywane są metody ich wytwarzania, a wykonywane włókniny znajdują zastosowanie w sprzęcie ochrony osobistej dróg oddechowych oraz jako filtry pomiarowe służące do określenia stężeń pyłu, ale wdrażane są na razie w skali laboratoryjnej. Wykorzystanie naładowanych elektrycznie włókien do produkcji materiału przeznaczonego dla półmasek filtrujących pozwala na zaklasyfikowanie ich do klasy wyższej w porównaniu z półmaskami wykonanymi z identycznych pod względem struktury materiałów, ale elektrycznie obojętnych.

Na Rysunkach 3.2 i 3.3 porównano wielkość przeskoku cząstek aerozolu w funkcji ich wymiarów oraz opory przepływu przez materiał elektrycznie obojętny i naładowany.



Rysunek 3.2. Przeskok cząstek aerozolu przez materiał elektrycznie obojętny i naładowany [11]



Rysunek 3.3. Opór przepływu powietrza przez materiał elektrycznie obojętny i naładowany [43]

3.3.6. Łączne oddziaływanie mechanizmów filtracji

Przedstawione powyżej rozważania dotyczyły określenia prawdopodobieństwa osadzania ziaren pyłu na pojedynczym elemencie, wyizolowanym w nieograniczonej przestrzeni lub znajdującym się w otoczeniu innych elementów, zachodzącego pod wpływem pojedynczego zjawiska lub mechanizmu.

W celu określenia całkowitej skuteczności filtracji należy wziąć pod uwagę jednoczesne występowanie wielu mechanizmów filtracji oraz należy obliczyć sumaryczne (łączne) prawdopodobieństwo osadzania [35].

A zatem określenie sumarycznego prawdopodobieństwa zderzeń uzyskuje się na podstawie oceny:

- pojedynczych mechanizmów filtracji oraz określenia prawdopodobieństwa wystąpienia osadzania cząstek dla każdego z nich,
- wyznaczenia sumarycznego prawdopodobieństwa osadzania jako sumy składowych prawdopodobieństw.

W opisie sumarycznego prawdopodobieństwa osadzania można uwzględnić wszystkie lub tylko niektóre mechanizmy filtracji. Jednak w każdym przypadku, a już szczególnie w przypadku uwzględnienia tylko wybranych zjawisk, konieczne jest ściśle stosowanie się do zakresu stosowności poszczególnych formuł podawanych przez autorów opisu matematycznego procesu filtracji (Rozdział 3.4.2).

Regułą jest, że każda z formuł opisująca składowe prawdopodobieństwa zderzeń ma przyporządkowane pewne liczby kryterialne i parametry bezwymiarowe, a także w dalszej konsekwencji, zależności opisujące początkową skuteczność procesu filtracji (w warunkach ustalonych) w warstwie złożonej z wielu elementów [35].

Metodyka określania łącznego prawdopodobieństwa osadzania oraz początkowej skuteczności filtracji w warstwach filtracyjnych utworzonych z włókien, dla podstawowych mechanizmów filtracyjnych mogących występować w przypadku rozważanych zakresów wymiarowych ziaren i przy pominięciu zjawiska

oddziaływania osadzania elektrostatycznego (co wyjaśniono w Rozdziale 4.7), została przedstawiona w Rozdziale 3.4.2.

3.4. Przegląd modeli matematycznych procesu filtracji aerozoli

3.4.1. Klasyfikacja modeli matematycznych

Teoria modelowania, opisując zachodzące procesy, posługuje się pojęciem systemu. Istnieją cztery cechy wyodrębniające system, które również można przypisać filtrom powietrza.

Filtr powietrza można interpretować jako system, ponieważ spełnia wymienione poniżej charakteryzujące go cechy:

- I cecha: wyodrębnienie z otoczenia (materiał filtracyjny ograniczony ramą wyraźnie stanowi odrębną część instalacji),
- II cecha: budowa z pojedynczych elementów (losowo umieszczone w materiale filtracyjnym pojedyncze włókna),
- III cecha: funkcja spełniana przez system (oczyszczenie powietrza z zanieczyszczeń i zatrzymanie ich w materiale filtracyjnym),
- IV cecha: ograniczenie zmienności w czasie (podczas pracy filtru, nie tylko w okresie filtracji ustalonej, zakres jego zmian w czasie jest ograniczony i przewidywalny).

Zgodnie z definicją podaną w [87] model matematyczny systemu jest to zespół zależności matematycznych, będących reprezentacją rozpatrywanych jego właściwości i umożliwiających badanie jego zachowania na drodze rozwiązania określonej klasy problemów matematycznych. Definicja ta dotyczy także poszukiwanego matematycznego opisu rozpatrywanego problemu procesu filtracji powietrza przez złożone strukturalnie włókniny filtracyjne.

Stosowane matematyczne modele systemów różnią się od siebie w zależności od celu, wymaganej dokładności oraz technicznych możliwości uzyskiwania oczekiwanych danych [87].

Podstawowym kryterium podziału modeli jest klasyfikacja ze względu na postać opisu modelu [87], [77]. Można rozróżnić:

- modele nieparametryczne,
- modele parametryczne.

Modele nieparametryczne przedstawiane są jako:

- wykresy - w modelach ciągłych,
- ciągi liczbowe - w modelach dyskretnych.

Ze względu na liczne ograniczenia w postaci np. braku uogólnionego opisu matematycznego, modele tego typu są rzadziej stosowane niż modele parametryczne.

Modele parametryczne są podawane w postaci zależności matematycznych o stałych lub zmiennych parametrach. Są one bardziej uniwersalne, stosując je można uzyskać np. model nieparametryczny.

O klasyfikacji modeli parametrycznych decydować może:

1. charakter zmienności w czasie opisywanego zjawiska:
 - modele statyczne,
 - modele dynamiczne,
2. charakter opisywanego zjawiska:
 - modele o parametrach rozłożonych,
 - modele o parametrach skupionych,
3. stopień szczegółowości opisu:
 - modele typu wejście-wyjście,
 - modele w przestrzeni stanów,
4. sposób zapisu matematycznego:
 - modele transmitancyjne,
 - modele różniczkowe,
5. postać sygnałów:
 - modele ciągle,
 - modele dyskretne,
6. stopień nieliniowości problemu:
 - modele liniowe,
 - modele nieliniowe,
7. liczba sygnałów wejściowych i wyjściowych systemów:
 - modele jednowymiarowe SISO (Single Input Single Output),
 - modele wielowymiarowe MIMO (Multi Input Multi Output).

Innym kryterium klasyfikacji modeli matematycznych, w zależności od sposobu odwzorowania zjawisk, jest podział na [77]:

1. modele niefizyczne (statystyczne, empiryczne),
2. modele fizyczne (deterministyczne),
3. modele hybrydowe.

Modele niefizyczne zajmują się dopasowaniem modeli statystycznych do posiadanych serii danych pomiarowych w celu uzyskania zależności odzwierciedlających w sposób zadawalający opisywaną rzeczywistość.

Modele fizyczne opierają się na aktualnym poziomie wiedzy na temat procesów fizycznych (mechanika płynów, chemia itp.). Celem ich stosowania jest wyprowadzenie zależności matematycznych opisujących łańcuch przyczynowo-skutkowy zjawiska i uzyskanie jak najbardziej dokładnego opisu rzeczywistych procesów. Modele fizyczne pozwalają na dokonywanie analiz rozważanych, ale nieistniejących zagadnień, w fazie projektowania i wyboru optymalnych rozwiązań.

Modele hybrydowe posiadają cechy zarówno modeli niefizycznych, jak i fizycznych. Rozpatrywany jest element niepewności spowodowany naturalną zmiennością lub niepełną znajomością zagadnienia, a uzyskany model ma charakter probabilistyczny i analizowany jest przy pomocy rachunku prawdopodobieństwa. Wartości zmiennych niezależnych nie są znane z absolutną pewnością i w ten sposób zmienne od nich

zależne nie mogą za pośrednictwem modeli fizycznych być precyzyjnie przewidziane [3].

Podział modeli matematycznych jest w pewnym sensie umowny, gdyż większość modeli niefizycznych uwzględnia pewne podstawowe zależności fizyczne pomiędzy zmiennymi. Natomiast w wielu modelach fizycznych dokonuje się oszacowania szeregu danych wejściowych modelu w oparciu o analizę statystyczną ich rozkładu. W związku z tym zaklasyfikowanie modeli oparte jest na przeważających w nich cechach.

Na podstawie przeglądu klasyfikacji modeli matematycznych, dalsze rozważania dotyczące procesu filtracji oparto o ostatnią z nich, tj. dzielącą modele na deterministyczne, niefizyczne i hybrydowe.

3.4.2. Modele deterministyczne

3.4.2.1. Założenia modeli deterministycznych

Modele matematyczne stosowane do opisu filtracji aerozoli należą do grupy modeli deterministycznych. W opisie procesu filtracji wykorzystują przybliżone zależności hydrodynamiczne przepływów płynów lepkich, nieściśliwych dla układów o sprecyzowanej geometrii [15]. W modelach równoznaczne z opisem procesu filtracji jest scharakteryzowanie zmian wartości skuteczności filtracji lub współczynnika przeskoku. Podstawę oceny skuteczności filtracji, opartej na klasycznych matematycznych modelach filtracji aerozolu przez włóknisty materiał filtracyjny, stanowi opis pola prędkości płynu wokół pojedynczego wyizolowanego włókna o kształcie cylindrycznym przedstawiony przez Lamba. Włókno to jest ustawione prostopadle do kierunku przepływu aerozolu.

Zależności opisujące wytrącanie się ziaren i ich osadzanie na powierzchni cylindra opierają się na następujących założeniach [15], [51]:

- płyn przepływający przez filtr jest traktowany jako "continuum", czyli ośrodek ciągły,
- pole przepływu gazu przez filtr opisane jest zlinearyzowanymi równaniami Naviera-Stokesa,
- zatrzymanie ziaren zachodzi na czystym, wolnym od pyłu włóknie,
- każde ziarno, które na skutek jakiegokolwiek mechanizmu filtracji wchodzi w kolizję z kolektorem (włóknem), zostaje na nim osadzone w sposób trwały,
- cylindryczne włókno ma idealnie gładką powierzchnię i niezmienną średnicę,
- przepływ aerozolu przez filtr jest ustalony,
- przepływający aerosol jest monodispersyjny,
- w każdej płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przepływu stężenie aerozolu jest izotropowe, niezależne od zatrzymania się cząstek na kolektorach (włóknach); a zatem zakłada się, że za każdym szeregiem cylindrycznych kolektorów następuje natychmiastowe wyrównanie się stężeń aerozolu poprzez jego dyfuzję.

W dalszych rozważaniach teoretycznych, korzystając z w/w założeń, filtr rozpatrywany był jako jednorodny system składający się z oddzielnych włókien o kształcie cylindrycznym, ułożonych prostopadle do kierunku przepływu aerozolu, dostatecznie daleko jedno od drugiego. Po opisanu opływu powietrza wokół wyizolowanego cylindra, rozwiązywane były równania określające zbliżenie cząstki wzdłuż linii prądu, pozwalające ocenić efektywność jej osadzenia na cylindrze pod wpływem różnych mechanizmów filtracyjnych. W modelach matematycznych w różny sposób uwzględniono wzajemny wpływ sąsiadujących włókien na warunki przepływu.

W niniejszej pracy przedstawiono następujące modele matematyczne procesu filtracji powietrza (omawiane w kolejności od najprostszego do najbardziej skomplikowanego) [15], [37], [39], [81]:

1. model matematyczny Daviesa,
2. model matematyczny Friedlandera - Whitbyego,
3. model matematyczny Torgensona,
4. model matematyczny Fuksa - Stieczkiny - Kirsza (równoległy),
5. model matematyczny Kirsza - Stieczkiny (wachlarzowy) bez uwzględnienia niejednorodności budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (model monodispersyjny),
6. model matematyczny Kirsza - Stieczkiny (wachlarzowy) z uwzględnieniem niejednorodności budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (model polidispersyjny).

Podczas tworzenia wymienionych powyżej i omówionych w kolejnych rozdziałach modeli matematycznych procesu filtracji, ich autorzy zwracali głównie uwagę na określenie wpływu trzech podstawowych mechanizmów:

- dyfuzji molekularnej,
- zderzenia bezwładnościowego,
- bezpośredniego zaczepienia.

3.4.2.2. Model Daviesa

W matematycznym modelu procesu filtracji opracowanym przez Daviesa we wzorze służącym do określenia sumarycznego współczynnika skuteczności osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie uwzględnione zostały następujące mechanizmy filtracji:

- mechanizm bezpośredniego zaczepienia,
- mechanizm dyfuzji molekularnej,
- mechanizm bezwładnościowego osadzania.

Teoretyczny model Daviesa został stworzony dla przepływu laminarnego, czyli dla małych wartości liczby Reynoldsa, ograniczonych do $Re \leq 0.2$.

Wprowadzenie liczby Cunninghama do wzoru obliczającego współczynnik dyfuzji pozwoliło na uwzględnienie zwiększenia prędkości poruszania małych cząstek, wielkość których jest porównywalna lub mniejsza od średniej drogi swobodnej

molekuł gazu wynoszącej $\lambda=6.53 \cdot 10^{-8}$ m (dla powietrza o temperaturze $T=293$ K i ciśnieniu $p=1013$ hPa) [81].

Przejsięcie od izolowanego, pojedynczego włókna do elementarnej warstwy filtracyjnej o określonej gęstości upakowania włókien α , zostało uwzględnione przez zastosowanie odpowiedniej poprawki empirycznej. We wzorze służącym do określenia sumarycznego współczynnika skuteczności filtracji opisuje ona wpływ oddziaływania sąsiadujących włókien i wynosi $(0.16+10.9\alpha-17\alpha^2)$ [51]. Davies założył, że gęstość upakowania filtrów jednakowo wpływa na efektywność osadzania cząstek dla każdego z mechanizmów. Inni autorzy raczej podają różne wartości poprawek dla różnych mechanizmów [81].

Na podstawie rozważań teoretycznych, Davies doszedł do wniosku, że efektywność filtracji wzrasta wraz z kwadratem gęstości upakowania. Natomiast Chen i Wong wykazali, że równania Langmuira i Daviesa przeceniają efekt wpływu gęstości materiału na skuteczność osadzania aerozolu [85].

W celu uzyskania zgodności modelu z rzeczywistymi warunkami procesu filtracji przez materiał włóknisty, tzn. w sytuacji, gdy w wyniku wzajemnego oddziaływania sąsiednich włókien pole prędkości powietrza wokół nich jest inne niż dla pojedynczego cylindra (w wyniku występowania zjawiska przysłonięcia jednych włókien przez drugie), Davies wprowadził do modelu empiryczne poprawki uwzględniające "efektywny" wymiar włókna.

W modelu Daviesa, podczas obliczenia współczynnika przeskoku lub przedziałowej skuteczności filtracji dla filtrów o gęstości upakowania $\alpha \geq 0.02$ [74], [81], zaleca się korzystać z zależności (3.16) określającej średnicę efektywną włókna $d_{ef,w}$ wyznaczoną na podstawie oporów przepływów Δp_{ex} otrzymanych na drodze doświadczalnej dla założonej prędkości filtracji. We wzorze opisującym skuteczność filtracji lub przeskoku, średnicę geometryczną włókien zastępuje się ich średnicą efektywną. W przypadku, gdy $\alpha < 0.02$ do równania (3.19) wstawia się rzeczywistą wartość średnicy włókna zmierzoną za pomocą mikroskopu.

Natomiast w przedstawionych wcześniej wzorach określających bezwymiarowe liczby podobieństwa charakteryzujące poszczególne mechanizmy filtracji, dla wszystkich wartości α , stosuje się rzeczywistą średnicę włókna $d_{w,rz}$.

Porównując liczne badania skuteczności filtracji, Davies stwierdził, że wyniki otrzymane z zaproponowanego przez niego równania określającego Δp_{ex} wykazują lepszą zgodność dla filtrów pulchnych (luźnych), w których włókna są dobrze rozdzielone.

Teoria Daviesa uwzględniając trzy podstawowe mechanizmy filtracji i jednocześnie wiążąc teorię z eksperymentem, stanowiła punkt wyjścia przy tworzeniu modeli matematycznych przez innych badaczy [81].

Poniżej przedstawiono zależności wykorzystywane w modelu Daviesa do określenia skuteczności filtracji.

Efektywną średnicę włókna $d_{ef\ w}$ oblicza się z zależności:

$$d_{ef\ w}^2 = \frac{17.5 \cdot \mu_g \cdot u \cdot H}{\Delta p_{ex}} \cdot \alpha^{1.5} (1 + 52 \cdot \alpha^{1.5}) \quad (3.16)$$

gdzie:

- $d_{ef\ w}$ średnica efektywna włókna, m
 H grubość włókniny, m
 u prędkość napływu powietrza, m/s
 α gęstość upakowania włókniny, określona z zależności (3.17), -
 Δp_{ex} opór przepływu powietrza przez filtr dla danej prędkości przepływu powietrza, określony z równania regresji oporu przepływu powstałego na podstawie danych eksperymentalnych $\Delta p=f(u)$, Pa
 μ_g współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, Pa·s, $\mu_g=1.81 \cdot 10^{-5}$ Pa·s

Gęstość upakowania włókniny można obliczyć ze wzoru [11]:

$$\alpha = \frac{M_p}{H \cdot \rho_w} \quad (3.17)$$

gdzie:

- H grubość włókniny, m
 M_p masa powierzchniowa włókniny, kg/m²
 ρ_w gęstość włókien, kg/m³
 α gęstość upakowania włókniny, -

Sumaryczne prawdopodobieństwo zderzeń cząstki aerozolu z kolektorem (włóknem) oblicza się z zależności:

$$\eta_p = [R + (0.25 + 0.4R)(Stk + 2/Pe) - 0.0263(Stk + 2/Pe)^2](0.16 + 10.9\alpha - 17\alpha^2) \quad (3.18)$$

gdzie:

- Pe liczba Pecleta, -
 R liczba bezpośredniego zaczepienia, -
 Stk liczba Stokesa, -
 α gęstość upakowania włókniny, -
 η_p sumaryczne prawdopodobieństwo osadzenia cząstki aerozolu na włóknie, -

Znając wielkości $d_{ef\ w}$ i η_p można obliczyć przeskok cząstek przez filtr k z równania:

$$\lg k = 2 - \frac{0.86 \cdot \alpha \cdot H \cdot \eta_p}{\pi \cdot d_{ef\ w} \cdot (1 - \alpha)} \quad (3.19)$$

gdzie:

- $d_{ef\ w}$ efektywna średnica włókna, m
 H grubość włókniny, m
 k współczynnik przeskoku cząstek, %
 α gęstość upakowania włókniny, -
 η_p sumaryczne prawdopodobieństwo osadzenia cząstek, -

Na podstawie określonego według wzoru (3.19) przedziałowego współczynnika przeskoku, można określić wielkość przedziałowej skuteczności filtracji z zależności:

$$\eta=100-k \quad (3.20)$$

gdzie:

k przedziałowy współczynnik przeskoku, %

η przedziałowa skuteczność filtracji, %

3.4.2.3. Model Friedlandera - Whitbyego

W matematycznym modelu procesu filtracji opracowanym przez Friedlandera i Whitbyego, we wzorze opisującym sumaryczny współczynnik określający prawdopodobieństwo osadzania cząstek na izolowanym włóknie za pomocą bezwymiarowych liczb podobieństwa, uwzględnione zostały następujące mechanizmy filtracji [81]:

- mechanizm bezpośredniego zaczepienia,
- mechanizm dyfuzji molekularnej,
- mechanizm bezwładnościowego osadzania.

W odróżnieniu od modelu Daviesa, w tym sposobie opisu procesu filtracji nie uwzględniono wpływu sąsiednich włókien przez wprowadzenie poprawki wiążącej współczynnik określający sumaryczne prawdopodobieństwo osadzania cząstek z gęstością upakowania materiału.

W modelu przedstawionym przez Friedlandera - Whitbyego we wszystkich wzorach obliczających liczby podobieństwa wykorzystano wartość średnicy geometrycznej włókna, w pozostałych wzorach - średnicę efektywną włókna, podobnie jak w modelu Daviesa, z tym, że zastosowano inny wzór służący do obliczenia $d_{ef.w.}$. Korzystanie z tego wzoru jest bardzo uciążliwe. Nim rozpocznie się obliczanie średnicy efektywnej, należy na podstawie wykonanych pomiarów stworzyć charakterystykę według zależności $\Delta p_{ex}/u^2=f(u)$. W punkcie odpowiadającym prędkości obliczeniowej przypyływu powietrza należy poprowadzić styczną i określić współczynnik jej nachylenia n . Następnie należy odczytać na osi rzędnych wartość $\Delta p_{ex}/u^2$ wyznaczoną z przecięcia się stycznej z odciętą dla prędkości 0.01 m/s (oznaczoną w modelu jako k_f). Wartość współczynnika czołowego oporu hydrodynamicznego izolowanego włókna C_D^* określa się na podstawie kolejnego wykresu, tj. zależności $C_D^*=f(n)$ [81]. A współczynnik poprawkowy uwzględniający własności gazu (jego gęstość i lepkość) Θ ocenia się albo z nomogramu $\Theta=f(n)$ [81], albo z odpowiedniego równania. Zalecana przez autorów procedura jest wyjątkowo pracochłonna i zniechęca do stosowania tej metody obliczeniowej.

Model Friedlandera - Whitbyego powinno się stosować dla:

- liczby Reynoldsa $Re < 1$,
- liczby Stokesa $Stk < 0.25$.

W omawianym modelu sumaryczne prawdopodobieństwo osadzenia cząstek określa się z zależności [81]:

$$\eta_p = 1.3Pe^{2/3} + 0.7R^2 + 0.075Stk^{1.2} \quad (3.21)$$

gdzie:

- Pe liczba Pecleta, -
 R liczba bezpośredniego zaczepienia, -
 Stk liczba Stokesa, -
 η_p sumaryczne prawdopodobieństwo osadzenia cząstek aerozolu na kolektorze (włóknie), -

Jak zaznaczono powyżej, dla określenia R, Pe, Stk stosuje się średnią rzeczywistą średnicę włókna $d_{w,rz}$, a do obliczenia współczynnika przeskoku średnicę efektywną $d_{ef,w}$ obliczoną z zależności:

$$2d_{ef,w} = (6.5 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{C_D''' \cdot M_p}{k_f \cdot \rho_w})^{\frac{1}{1-n}} \cdot (1 + 30 \cdot \alpha)^{\frac{1}{1-n}} \cdot \Theta \cdot 10^{-2} \quad (3.22)$$

gdzie:

- $d_{ef,w}$ średnica efektywna włókna, m
 k_f wartość na osi rzędnych zależności $\Delta p_{ex}/u^2 = f(u)$ wyznaczona z przecięcia się stycznej do krzywej z odciętą poprowadzonej dla prędkości obliczeniowej $u = 0.01$ m/s, Pa·s²/m²
 M_p masa powierzchniowa włókniny, kg/m²
 n współczynnik nachylenia stycznej do krzywej $\Delta p_{ex}/u^2 = f(u)$ poprowadzonej dla prędkości obliczeniowej, Pa·s²/m²
 C_D''' współczynnik czołowego oporu wyizolowanego włókna; wartość wyznacza się z wykresu $C_D''' = f(n)$ [81], -
 α gęstość upakowania włókniny, -
 μ_R współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, Pa·s
 ρ_R gęstość powietrza, kg/m³
 ρ_w gęstość włókien, kg/m³
 Θ współczynnik poprawkowy uwzględniający właściwości gazu (jego gęstość i lepkość), obliczony z zależności:
 $\Theta = \rho_R^{(1+n)/(1-n)} \cdot \mu_R^{n/(n-1)} \quad (3.23)$

Wielkość przedziałowego współczynnika przeskoku cząstek k oraz przedziałowej skuteczności filtracji η oblicza się z takich samych zależności, jakie zostały podane w przypadku modelu Daviesa (3.19), (3.20). Różnica między tymi dwoma modelami polega na sposobie określenia średnicy efektywnej włókna oraz sumarycznego prawdopodobieństwa zderzeń cząstki z włóknem.

3.4.2.4. Model Torgensona

W modelu Torgensona uwzględnione zostały następujące mechanizmy filtracyjne [81]:

- mechanizm bezpośredniego zaczepienia,
- mechanizm dyfuzyjny,
- łączne występowanie zaczepienia i osadzania bezwładnościowego.

Opis pola przepływu aerozolu oparty jest, podobnie jak w powyżej opisanych modelach, na układzie równoległe, w stosunku do siebie, ustawionych cylindrów i prostopadłym do nich przepływie aerozolu.

Stwierdzono, że wartość współczynnika określającego efektywność osadzania przy jednoczesnym występowaniu mechanizmu bezwładnościowego i zaczepienia jest wyższa od wartości sumy współczynników osadzania oddzielnie liczonych dla bezwładności i zaczepienia [81].

W odróżnieniu od poprzednich modeli, w modelu Torgensona sumaryczny współczynnik osadzania cząstek oblicza się ze wzoru łączącego jednostkowe współczynniki określające efektywność osadzania cząstek na izolowanym włóknie w wyniku oddziaływania poszczególnych mechanizmów filtracyjnych, opisane za pomocą zależności matematycznych. Na podstawie tych równań można określić udział i wpływ poszczególnych mechanizmów na całkowitą skuteczność. Wzory te nie uwzględniają poprawki określającej oddziaływanie sąsiednich włókien. Taka poprawka występowała we wzorze na sumaryczny współczynnik osadzania w omówionym wcześniej modelu Daviesa.

Opór przepływu aerozolu wprowadza się do tych wzorów przez współczynnik oporu hydrodynamicznego C_D określany m.in. w oparciu o eksperymentalnie określoną wartość Δp_{ex} .

We wzorze na całkowity współczynnik osadzania występują współczynniki poprawkowe opisujące:

- bezwładnościowe zatrzymanie cząstek w granicznej warstwie dyfuzyjnej,
- wpływ efektu zaczepienia na osadzanie dyfuzyjne.

Według niektórych naukowców [81], model ten prawdopodobnie przecenia wpływ osadzania dyfuzyjnego na całkowitą skuteczność filtracji.

We wszystkich zależnościach przedstawionych w modelu Torgensona stosowana jest średnica geometryczna włókna d_w (lub jego promień a_w) [81].

Poszczególne składowe prawdopodobieństwa osadzania cząstek na włóknie, potrzebne do określenia całkowitego prawdopodobieństwa osadzania, oblicza się z następujących zależności:

- prawdopodobieństwo zderzeń w wyniku bezpośredniego zaczepienia

$$\eta_R = 0.0518 \cdot \left(\frac{C_D \cdot Re}{2} \right) \cdot R^{1.5} \quad (3.24)$$

gdzie:

- η_R prawdopodobieństwo osadzania cząstek w wyniku bezpośredniego zaczepienia, -
- Re liczba Reynoldsa, -
- R liczba bezpośredniego zaczepienia, -
- C_D współczynnik poprawkowy uwzględniający czołowy opór wyizolowanego włókna określony dla rzeczywistych filtrów z zależności (3.25), -

Dla rzeczywistych filtrów $\frac{C_D'' \cdot Re}{2}$ można określić z zależności:

$$\frac{C_D'' \cdot Re}{2} = \frac{\pi \cdot a_{w\ sr}^2 \cdot \Delta p_{ex}}{\alpha \cdot \mu_g \cdot H \cdot u} \quad (3.25)$$

gdzie:

- $a_{w\ sr}$ średni promień włókna, m
- C_D'' współczynnik poprawkowy uwzględniający czołowy opór wyizolowanego włókna, -
- H grubość włókniny, m
- Re liczba Reynoldsa, -
- u prędkość napływu powietrza, m/s
- α gęstość upakowania włókniny, -
- Δp_{ex} opór przepływu powietrza przez filtr dla danej prędkości przepływu powietrza u , określony z równania regresji oporu przepływu powstałego na podstawie danych eksperymentalnych $\Delta p=f(u)$, Pa
- μ_g współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, Pa·s

- prawdopodobieństwo osadzania cząstek w wyniku bezpośredniego zaczepienia i osadzania bezwładnościowego:

$$\eta_{RSk} = \eta_R [1 + R^{-1.5} Stk(0.25 + 0.4R)] \quad (3.26)$$

gdzie:

- Stk liczba Stokesa, -
- R liczba bezpośredniego zaczepienia, -
- η_R prawdopodobieństwo osadzania cząstek w wyniku bezpośredniego zaczepienia, -
- η_{RSk} prawdopodobieństwo osadzania cząstek w wyniku bezpośredniego zaczepienia i osadzania bezwładnościowego, -

- prawdopodobieństwo osadzania cząstek na włóknie w wyniku dyfuzji:

$$\eta_D = 0.75 \left(\frac{C_D'' \cdot Re}{2} \right)^{0.4} Pe^{-0.6} \quad (3.27)$$

gdzie:

- C_D'' współczynnik uwzględniający czołowy opór wyizolowanego włókna, -
- Pe liczba Pecleta, -
- Re liczba Reynoldsa, -
- η_D prawdopodobieństwo osadzania na drodze dyfuzji, -

Sumaryczne prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie określa się z zależności:

$$\eta_P = 0.75 \eta_{RSk} + A \cdot B \cdot \eta_D \quad (3.28)$$

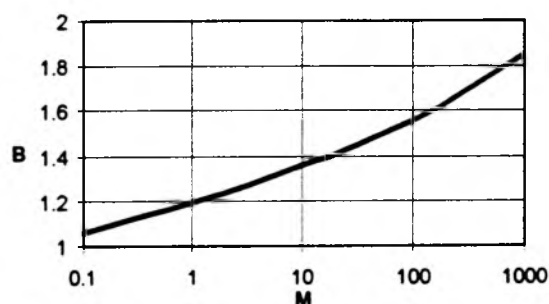
gdzie:

A współczynnik uwzględniający inercyjne zatrzymanie cząstek w granicznej warstwie dyfuzyjnej włókna, obliczony według wzoru (3.29), -

$$A = 1 + 0.025 \left(\frac{C_D \cdot Re}{2} \right)^{0.6} Pe^{0.6} Stk \left[0.25 + 4.74 \left(\frac{C_D \cdot Re}{2} \right)^{0.4} Pe^{-0.4} \right] \quad (3.29)$$

B współczynnik uwzględniający wpływ efektu zaczepienia na osadzanie dyfuzyjne, określony na podstawie wykresu $B=f(M)$ (Rys. 3.4) lub obliczony według wzoru (3.30), -

$$B = 0.0735619 \cdot \ln M + 1.22732 \quad (3.30)$$



Rysunek 3.4. Zależność $B=f(M)$

M współczynnik obliczony według zależności (3.31), -

$$M = \frac{C_D \cdot Re}{2} R^{2.5} \cdot Pe \quad (3.31)$$

C_D współczynnik uwzględniający czołowy opór wyizolowanego włókna, -

Pe liczba Pecleta, -

R liczba bezpośredniego zaczepienia, -

Re liczba Reynoldsa, -

Stk liczba Stokesa, -

η_D prawdopodobieństwo osadzania na drodze dyfuzji, -

η_p sumaryczne prawdopodobieństwo osadzania cząstki na wyizolowanym włóknie, -

η_{RSU} prawdopodobieństwo osadzania cząstek w wyniku bezpośredniego zaczepienia i osadzania bezwładnościowego, -

Wielkość przeskoku cząstek k oblicza się z zależności:

$$\lg k = 2 - \frac{0.86 \cdot \alpha \cdot H \cdot \eta_p}{\pi \cdot (1 - \alpha) \cdot a_{w sr}} \quad (3.32)$$

gdzie:

$a_{w sr}$ średni promień włókna, m

H grubość włókniny, m

k	współczynnik przeskoku, %
α	gęstość upakowania włókniyny, -
η_p	sumaryczne prawdopodobieństwo osadzania cząstki na wyizolowanym włóknie, -

Wzór (3.32) służący do określania przeskoku cząstek w modelu Torgensona różni się od wzorów podanych we wcześniej omawianych modelach sposobem określenia promienia włókna. W modelu Torgensona stosuje się rzeczywisty średni promień włókna $a_{w\ sr}$, w modelu Daviesa i Friedlandera-Whitbyego - promień efektywny włókna $a_{ef\ w}$.

Zależność, za pomocą której określa się przedziałową skuteczność filtracji η ma w przypadku modelu Torgensona taką samą postać jak we wcześniej omawianych modelach (wzór (3.20)).

3.4.2.5. Model Fuksa-Stieczkiny-Kirsza (równoległy)

Model matematyczny Fuksa-Stieczkiny-Kirsza opisuje układ regularnie zachodzących na siebie równoległych cylindrów stanowiący najprostszy opis budowy filtru włókninowego. Podobnie jak w poprzednich modelach, podczas określania współczynników osadzania cząstek, rozważa się idealnie kołowy, niezmienny przekrój poprzeczny włókna, a także kulisty kształt cząstek (ziaren) zatrzymywanych na filtrze.

W modelu uwzględnione zostały następujące mechanizmy filtracji [81]:

- dyfuzja molekularna,
- bezpośrednie zaczepienie,
- łączne występowanie zjawiska dyfuzji i bezpośredniego zaczepienia,
- bezwładnościowe osadzanie.

Współczynnik opisujący sumaryczne prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie uzyskuje się poprzez algebraiczne zsumowanie składowych współczynników osadzania, wynikających z oddziaływania poszczególnych mechanizmów filtracji. Spotyka się opinię, że całkowity współczynnik zatrzymania cząstek jest większy od każdego ze współczynników składowych, natomiast mniejszy od ich algebraicznej sumy [81]

Autorzy tego modelu nie znaleźli potwierdzenia, że zjawisko przysłonięcia jednych włókien przez drugie, uwzględnione przez zastosowanie specjalnie sformułowanych zależności matematycznych dotyczących tzw. średnicy efektywnej włókna, ma wpływ na końcową wartość efektywności filtracji. Opierając się na tym stwierdzeniu zaproponowali stosowanie, we wszystkich wzorach, średnicy geometrycznej włókna [37].

Natomiast poprawka opisująca wzajemne oddziaływanie sąsiadujących ze sobą włókien jest uwzględniona we wprowadzonych tzw. współczynnikach oporu hydrodynamicznego. Na jej podstawie można stwierdzić, że pole przepływu w

modelu równoległym jest określone przez wartość gęstości upakowania i odpowiednie współczynniki empiryczne [81].

W celu określenia spadku ciśnienia powietrza omywającego szereg cylindrów, wprowadzono bezwymiarową siłę oporu F odniesiona do jednostki długości cylindra, umieszczonego w izolowanym szeregu. Jej wartość oblicza się wykorzystując wielkość współczynnika oporu hydrodynamicznego. Stwierdzono, że taki sposób określenia spadku ciśnienia w zespole cylindrów jest prawdziwy tylko przy $Re < 1$.

Podstawowymi założeniami przy stosowaniu tego modelu matematycznego są:

- stałość ilorazu $\Delta p_{ex}/u$ lub $Re < 1$,
- skuteczność zderzeń cząstek z cylindrami (nie występuje zjawisko odbijania cząstek od powierzchni włókna),
- dokładne wymieszanie stężenia aerozolu po każdym szeregu cylindrów,
- niewystępowanie zatrzymania sedymentacyjnego na cylindrach.

Przy wyprowadzaniu zależności określającej współczynnik przeskoku dla układu równoległe w stosunku do siebie ustawionych włókien, założono, że w każdej płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przepływu, stężenie aerozolu jest stałe, niezależne od zatrzymanych cząstek na włóknach. Przy przepływie laminarnym jest to możliwe jedynie pod wpływem dyfuzji molekularnej. Z tego więc powodu, błąd uzyskany przy stosowaniu takiego wzoru może być szczególnie istotny przy zatrzymywaniu dużych cząstek w filtrze zbudowanym z równoległe ustawionych włókien [37].

Do wzoru służącego dla określenia współczynnika przeskoku cząstek wprowadzono poprawkę uwzględniającą niejednorodność materiału ϵ , obliczaną na podstawie teoretycznej i rzeczywistej wartości bezwymiarowego współczynnika oporu F .

Teoretyczne wartości skuteczności filtracji otrzymane poprzez zastosowanie modelu równoległe ustawionych, zachodzących na siebie cylindrów nie powinny być bezpośrednio odnoszone do rzeczywistych filtrów z powodu specyficznych cech hydrodynamiki trójwymiarowego przepływu i zatrzymania aerozolu. Mimo to, uzyskiwana pewna zgodność wyników badań i obliczeń na podstawie takiego modelu matematycznego umożliwiła przejście do kolejnego stadium badań nad procesem filtracji dotyczącego zatrzymywania cząstek aerozolu w układzie o nierównoległym układzie cylindrów (model wachlarzowy) [37].

We wszystkich obliczeniach w modelu równoległym stosuje się średni geometryczny promień włókna a_w .

W celu określenia sumarycznego prawdopodobieństwa osadzania, po obliczeniu współczynnika hydrodynamicznego filtru, określa się poszczególne składowe prawdopodobieństwa osadzania związane z mechanizmami filtracji [81].

Wartość współczynnika hydrodynamicznego filtru k_h oblicza się ze wzoru (3.33):

$$k_h = -1.15 \cdot \lg \alpha - 0.52 \quad (3.33)$$

gdzie:

k_h współczynnik hydrodynamiczny filtru, -
 α gęstość upakowania, -

Natomiast składowe prawdopodobieństwa osadzania określa się z zależności:

- prawdopodobieństwo osadzania na drodze bezpośredniego zaczepienia η_R :

$$\eta_R = (2k_h)^{-1} [(1+R)^{-1} - (1+R) + 2(1+R) \cdot \ln(1+R)] \quad (3.34)$$

gdzie:

k_h współczynnik hydrodynamiczny filtru, -
 R liczba bezpośredniego zaczepienia, -
 η_R prawdopodobieństwo osadzania na drodze bezpośredniego zaczepienia, -

- prawdopodobieństwo osadzania na drodze dyfuzji η_D :

$$\eta_D = 2.9 k_h^{-1/3} \cdot Pe^{-2/3} + 0.624 Pe^{-1} \quad (3.35)$$

gdzie:

k_h współczynnik hydrodynamiczny filtru, -
 Pe liczba Pecleta, -
 η_D prawdopodobieństwo osadzania na drodze dyfuzji, -

- prawdopodobieństwo osadzania na drodze dyfuzji z uwzględnieniem bezpośredniego zaczepienia η_{DR} :

$$\eta_{DR} = 1.24 k_h^{-0.5} Pe^{-0.5} R^{2/3} \quad (3.36)$$

gdzie:

k_h współczynnik hydrodynamiczny filtru, -
 Pe liczba Pecleta, -
 R liczba bezpośredniego zaczepienia, -
 η_{DR} prawdopodobieństwo osadzania na drodze dyfuzji z uwzględnieniem bezpośredniego zaczepienia, -

- prawdopodobieństwo osadzania na skutek bezwładności η_{Stk} :

$$\eta_{Stk} = (2k_h)^{-2} \cdot I \cdot Stk \quad (3.37)$$

gdzie:

k_h współczynnik hydrodynamiczny filtru, -
 I parametr określający mechanizm bezwładnościowy, obliczony według wzoru (3.39), -
 Stk liczba Stokesa, -
 η_{Stk} prawdopodobieństwo osadzania na drodze bezwładności, -

Sumaryczne prawdopodobieństwo osadzania cząstek η_p określa się z zależności:

$$\eta_p = \eta_R + \eta_D + \eta_{DR} + \eta_{Stk} \quad (3.38)$$

gdzie:

η_D prawdopodobieństwo osadzania na drodze dyfuzji, -
 η_{DR} prawdopodobieństwo osadzania na drodze dyfuzji z uwzględnieniem

- bezpośredniego zaczepienia, -
- η_P sumaryczne prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie, -
- η_R prawdopodobieństwo osadzania na drodze bezpośredniego zaczepienia, -
- η_{Suk} prawdopodobieństwo osadzania na drodze bezwładności, -

Wielkości i parametry potrzebne do określenia powyższych wartości prawdopodobieństw osadzania oblicza się z następujących wzorów:

$$I = (29.6 - 28\alpha^{0.62})R^2 - 27.5 \cdot R^{2.8} \quad (3.39)$$

$$F_t = \frac{4\pi}{k_h} \quad (3.40)$$

$$F_{ex} = \frac{\Delta p_{ex} \cdot \pi \cdot a_{w\ sr}^2}{\alpha \cdot \mu_g \cdot H \cdot u} \quad (3.41)$$

$$\varepsilon = \frac{F_t}{F_{ex}} \quad (3.42)$$

gdzie:

- $a_{w\ sr}$ średni promień włókna, m
- F_{ex} siła oporu hydrodynamicznego włókna dla filtru rzeczywistego, wyznaczona na podstawie doświadczalnie określonego spadku ciśnienia, -
- F_t teoretyczna siła oporu hydrodynamicznego wyizolowanego włókna, oddziaływająca na jednostkę długości włókna w filtrze modelowym, -
- H grubość włókniny, m
- I parametr określający mechanizm bezwładnościowy, -
- k_h współczynnik hydrodynamiczny filtru, -
- R liczba bezpośredniego zaczepienia, -
- u prędkość napływu powietrza, m/s
- α gęstość upakowania włókniny, -
- ε współczynnik poprawkowy uwzględniający niejednorodność materiału filtracyjnego, -
- Δp_{ex} opór przepływu powietrza przez filtr dla danej prędkości przepływu powietrza, określony z równania regresji oporu przepływu powstałego na podstawie danych eksperymentalnych $\Delta p=f(u)$, Pa
- μ_g współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, Pa·s

Na podstawie powyższych zależności określa się współczynnik przeskoku k :

$$\lg k = 2 - \frac{0.87 \cdot \alpha \cdot H \cdot \eta_P}{\pi \cdot a_{w\ sr} \cdot \varepsilon} \quad (3.43)$$

gdzie:

- $a_{w\ sr}$ średni promień włókna, m
- H grubość włókniny, m
- k współczynnik przeskoku, %
- α gęstość upakowania, -

- ε współczynnik poprawkowy uwzględniający niejednorodność materiału filtracyjnego, -
 η_p sumaryczne prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie, -

Wartość przedziałowej skuteczności filtracji η określa się korzystając z zależności (3.20).

3.4.2.6. Model Kirsza - Stieczkiny (wachlarzowy)

W filtrach rzeczywistych o nieregularnie, nawet przypadkowo ułożonych włóknach, pole przepływu jest trójwymiarowe i z tego powodu występują trudności z opisem teoretycznym. Aby jak najbardziej zbliżyć opis teoretyczny do warunków rzeczywistych, Kirsza i Stieczkiny zaproponowali tzw. model wachlarzowy filtru. Charakteryzuje się on tym, że każdy rząd cylindrów jest skręcony o przypadkowy kąt w swojej płaszczyźnie. Jednocześnie zakłada się, że kąt skrętu poszczególnych rzędów nie ma wpływu na wartość oporu przepływu, nawet wtedy, gdy rzędy są połączone razem. Opór przepływu w takim modelu wzrasta znacznie wolniej niż dla modelu zachodzących na siebie równoległe ułożonych cylindrów. Stwierdzono, że nierównoległy układ cylindrów w sąsiadujących rzędach osłabia hydrodynamiczne oddziaływanie siatek włókien [37].

Rozmieszczenie punktów przecięcia osi cylindrów lub rozmieszczenia wolnych obszarów pomiędzy cylindrami jest dla modelu wachlarzowego przypadkowe.

Model wachlarzowy wykazuje zatem największe podobieństwo do rzeczywistych filtrów, zarówno pod względem struktury jak i właściwości.

Model wachlarzowy Kirsza i Stieczkiny dotyczy tylko obszaru największej przenikalności cząstek przez materiał w procesie filtracji. Ustalono, że w tym obszarze za zatrzymanie cząstek na włóknach odpowiedzialne są jedynie dwa mechanizmy [81]:

- dyfuzja molekularna,
- zaczepienie.

Sumaryczny współczynnik opisujący prawdopodobieństwo osadzania cząstek na włóknie jest równy algebraicznej sumie współczynników zatrzymania w wyniku:

- zjawiska dyfuzji,
- zaczepienia,
- łącznego występowania dyfuzji i zaczepienia.

Aby obliczyć efektywność filtracji autorzy omawianego modelu wykorzystali zależności wyprowadzone dla modelu równoległego z zastosowaniem niezbędnych poprawek uwzględniających specyfikę modelu wachlarzowego o ultracienkich, zarówno monodispersyjnych, jak i polidispersyjnych, włóknach.

Autorzy stwierdzili, że podczas gdy w układzie równoległe ustawionych cylindrów dyfuzyjne osadzanie cząstek słabo zależy od gęstości upakowania α , w przypadku

modelu wachlarzowego jest ono całkowicie niezależne od α . Zostało to potwierdzone także dla filtrów rzeczywistych.

Warunek wymieszania stężenia aerozolu za każdym szeregiem nie jest tutaj tak silny, jak w modelu równoległym i wobec tego jest możliwe badanie zatrzymania cząstek w wyniku zjawiska zaczepienia na cylindrach ułożonych wachlarzowo.

W modelach wykonanych z ultracienkich cylindrów (o średnicy $<1 \mu\text{m}$) lub podczas filtracji przy obniżonym ciśnieniu, poślizg gazu na powierzchni cylindra zmniejsza wartość oporu przepływu. Zgodnie z tym twierdzeniem, do wzoru na bezwymiarową siłę oporu F wprowadzono współczynnik poprawkowy uwzględniający zjawisko poślizgu. Należy podkreślić, że chociaż na podstawie teoretycznych rozważań, poprawka ta jest jedynie słuszna dla małych wartości liczby Knudsen, to prawie taka sama liniowa zależność F od oporu przepływu Δp utrzymuje się dla wartości $Kn > 1$, a więc w obszarze przepływu gazu, który może być uważany za pośredni pomiędzy przepływem z "poślizgiem", a przepływem przejściowym.

W przypadku przepływu gazu w obszarze poślizgu (nieciągłość ośrodka), wpływ tego zjawiska na opór przepływu wzrasta wraz ze wzrostem niejednorodności struktury materiału. Zjawisko to zostało uwzględnione przez wprowadzenie współczynnika niejednorodności ϵ_0 . Wartość ϵ_0 można policzyć na podstawie znanej z pomiarów wielkości oporu przepływu. We wszystkich wzorach określających współczynniki prawdopodobieństwa osadzania dla poszczególnych mechanizmów filtracji, uwzględniono zjawisko niejednorodności stosując współczynnik oporu hydrodynamicznego k_H . Autorzy modelu stwierdzili, że wpływ poślizgu jest proporcjonalny do wartości $(1-\alpha)$. Dla filtrów wysokoporowatych poprawka ta może być pominięta. Ustalili także, że nierównoległość włókien w modelu wachlarzowym prowadzi do pewnego wzrostu wpływu poślizgu na wartość bezwymiarowej siły oporu F w porównaniu z modelem równoległym - poprawka ta wynosi $\tau = 1.43 \pm 0.05$ [37].

W modelu wachlarzowym uwzględniono polidispersyjność włókien poprzez podzielenie we wszystkich wzorach wartości gęstości upakowania przez $(1+\delta)$, gdzie δ określa stopień rozproszenia wartości średnic zastosowanych włókien. Stwierdzono, że polidispersyjność włókien nie narusza liniowej zależności spadku ciśnienia na filtrze od liczby Knudsen, mimo że przepływ gazu na powierzchni cienkich i grubych włókien ma zupełnie inny charakter. Polidispersyjność słabo wpływa na wartość współczynnika osadzania zarówno w wyniku dyfuzji, jak również w wyniku zaczepienia, stąd wynika wniosek, że do wzorów określających te współczynniki można wstawić średnią średnicę geometryczną włókna, nie zaś średnicę efektywną.

Obliczenie skuteczności filtracji (lub przeskoku) w obszarze największego przenikania cząstek zostało sprowadzone w modelu wachlarzowym do określenia sumarycznego współczynnika prawdopodobieństwa osadzania cząstek, bezwymiarowych sił oporu oraz współczynnika niejednorodności struktury.

Poniżej przedstawiono zaproponowany przez Kirsza i Stieczkinę sposób obliczania sumarycznego prawdopodobieństwa oczyszczania wysokodispersyjnych aerozoli na

filtrach włókninowych wykonanych z cienkich włókien o niewielkiej polidispersyjności [15]. Jak wspomniano wcześniej, we wszystkich obliczeniach stosuje się średnicę geometryczną włókna. Model ten uwzględnia zjawisko poślizgu gazu na cienkich włóknach w obszarze nieciągłości przepływu gazu. Obliczona według niego skuteczność filtracji odnosi się do cząstek najbardziej przenikających przez materiał filtracyjny. Model zakłada, że mechanizm bezwładnościowy nie ma wpływu na przeskok najbardziej przenikających cząstek (tj. model jest prawdziwy dla $Stk < 0.2$).

Dla porównania wpływu niejednorodności średnicy włókien na wielkość skuteczności filtracji, przedstawiono również zależności dla modelu wachlarzowego w przypadku monodispersyjnej budowy włókien.

W celu określenia sumarycznego prawdopodobieństwa osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie cząstek η_P przy małych prędkościach przepływu, oblicza się najpierw następujące składowe prawdopodobieństwa osadzania:

- prawdopodobieństwo osadzania na drodze bezpośredniego zaczepienia η_R :

$$\eta_R = (2k_H)^{-1} \{ (1+R)^{-1} - (1+R) + 2(1+R)\ln(1+R) + 2\tau Kn(2+R)R(1+R)^{-1} \} \quad (3.44)$$

lub (zależnie od sposobu obliczenia współczynnika oporu hydrodynamicznego):

$$\eta_R = (2k_{HI})^{-1} \{ (1+R)^{-1} - (1+R) + 2(1+R)\ln(1+R) + 2\tau Kn(2+R)R(1+R)^{-1} \} \quad (3.45)$$

gdzie:

- k_H współczynnik oporu hydrodynamicznego nie uwzględniający niejednorodności budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (model monodispersyjny), określony ze wzoru (3.51), -
- k_{HI} współczynnik oporu hydrodynamicznego uwzględniający niejednorodność budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (model polidispersyjny), określony ze wzoru (3.57), -
- Kn liczba Knudsen, -
- R liczba bezpośredniego zaczepienia, -
- η_R prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie w wyniku zjawiska bezpośredniego zaczepienia, -
- τ współczynnik poprawkowy wyznaczony przez Kirsza, uwzględniający wzajemne oddziaływanie cząstek i powierzchni włókna, $\tau = 1.43 \pm 0.05$, -

- prawdopodobieństwo osadzania na drodze dyfuzji η_D :

$$\eta_D = 2.7Pe^{-2/3} (1 + 0.39k_H^{-1/3} Pe^{1/3} Kn) + 0.624Pe^{-1} \quad (3.46)$$

lub (zależnie od sposobu obliczenia współczynnika oporu hydrodynamicznego):

$$\eta_D = 2.7Pe^{-2/3} (1 + 0.39k_{HI}^{-1/3} Pe^{1/3} Kn) + 0.624Pe^{-1} \quad (3.47)$$

gdzie:

- k_H współczynnik oporu hydrodynamicznego nie uwzględniający niejednorodności budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (model monodispersyjny), określony ze wzoru (3.51), -

- k_{HI} współczynnik oporu hydrodynamicznego uwzględniający niejednorodność budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (model polidispersyjny), określony ze wzoru (3.57), -
 Kn liczba Knudsen, -
 Pe liczba Pecleta, -
 η_D prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie w wyniku zjawiska dyfuzji, -

- prawdopodobieństwo osadzania na drodze dyfuzji z uwzględnieniem bezpośredniego zaczepienia η_{DR} :

$$\eta_{DR} = 1.24 k_{HI}^{-0.5} Pe^{-0.5} R^{2/3} \quad (3.48)$$

lub (zależnie od sposobu obliczenia współczynnika oporu hydrodynamicznego):

$$\eta_{DR} = 1.24 k_{HI}^{-0.5} Pe^{-0.5} R^{2/3} \quad (3.49)$$

gdzie:

- k_H współczynnik oporu hydrodynamicznego nie uwzględniający niejednorodności budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (model monodispersyjny), określony ze wzoru (3.51), -
 k_{HI} współczynnik oporu hydrodynamicznego uwzględniający niejednorodność budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (model polidispersyjny), określony ze wzoru (3.57), -
 Pe liczba Pecleta, -
 R liczba bezpośredniego zaczepienia, -
 η_{DR} prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie w wyniku zjawiska dyfuzji z uwzględnieniem bezpośredniego zaczepienia, -

Sumaryczne prawdopodobieństwo osadzania cząstek η_P określa się z zależności:

$$\eta_P = \eta_R + \eta_D + \eta_{DR} \quad (3.50)$$

gdzie:

- η_D prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie w wyniku zjawiska dyfuzji, -
 η_{DR} prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie w wyniku zjawiska dyfuzji z uwzględnieniem bezpośredniego zaczepienia, -
 η_P sumaryczne prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie, -
 η_R prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie w wyniku zjawiska bezpośredniego zaczepienia, -

Wielkości potrzebne do określenia powyższych zależności oblicza się z następujących równań:

- dla włókien monodispersyjnych:

$$k_H = -0.51 \ln(\alpha) - 0.52 + 0.64\alpha + \tau \cdot \epsilon_0^{0.5} (1 - \alpha) Kn \quad (3.51)$$

$$Kn = \frac{\lambda}{a_{w\ sr}} \quad (3.52)$$

$$\epsilon_o = \frac{F_o^f}{F_o} \quad (3.53)$$

$$F_o^f = \frac{4\pi}{k_H} \quad (3.54)$$

$$F^{-1} = F_o^{-1} + \frac{\tau \cdot (1 - \alpha) \cdot \epsilon_o^{0.5} \cdot Kn}{4\pi} \quad (3.55)$$

$$F = \frac{\Delta p_{ex} \cdot \pi \cdot a_{w\ sr}^2}{\alpha \cdot \mu_g \cdot H \cdot u} \quad (3.56)$$

gdzie:

- $a_{w\ sr}$ promień włókna, m
- F siła oporu hydrodynamicznego filtra rzeczywistego dla $Kn \neq 0$, -
- F_o teoretyczna siła oporu hydrodynamicznego w modelu równoległym filtra dla $Kn=0$, -
- F_o^f teoretyczna siła oporu hydrodynamicznego w modelu wachlarzowym filtra dla $Kn=0$, -
- H grubość włókniny, m
- k_H współczynnik oporu hydrodynamicznego nie uwzględniający niejednorodności budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (model monodispersyjny), określony ze wzoru (3.51), -
- Kn liczba Knudsena, -
- u prędkość napływu powietrza, m/s
- α gęstość upakowania włókniny, -
- λ średnia długość drogi swobodnej cząstki gazu, m
- ϵ_o współczynnik uwzględniający niejednorodność struktury filtra, -
- Δp_{ex} opór przepływu powietrza przez filtr dla danej prędkości przepływu powietrza u , określony z równania regresji oporu przepływu powstałego na podstawie danych eksperymentalnych $\Delta p=f(u)$, Pa
- μ_g współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, Pa·s
- τ współczynnik poprawkowy wyznaczony przez Kirsza, uwzględniający wzajemne oddziaływanie cząstek i powierzchni włókna, $\tau=1.43 \pm 0.05$, -

- dla włókien polidispersyjnych:

$$k_{H1} = -0.5 \ln\left(\frac{\alpha}{1+\delta}\right) - 0.52 + 0.64 \frac{\alpha}{1+\delta} + \tau \cdot \epsilon_{o1}^{0.5} \left(1 - \frac{\alpha}{1+\delta}\right) Kn \quad (3.57)$$

$$\delta = \frac{(a_w^2)_{sr} - a_{w\ sr}^2}{a_{w\ sr}^2} \quad (3.58)$$

$$Kn = \frac{\lambda}{a_{w\ sr}} \quad (3.59)$$

$$\varepsilon_{o1} = \frac{F_{o1}^f}{F_{o1}} \quad (3.60)$$

$$F_1 = \frac{\Delta p_{ex} \cdot \pi \cdot a_{w\bar{r}}^2 (1 + \delta)}{\alpha \cdot \mu_g \cdot H \cdot u} \quad (3.61)$$

$$F_{o1}^f = \frac{4\pi}{k_{H1}} \quad (3.62)$$

$$F_1^{-1} = F_{o1}^{-1} + \frac{\tau \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{1 + \delta}\right) \cdot \varepsilon_{o1}^{0.5} \cdot Kn}{4\pi} \quad (3.63)$$

gdzie:

- a_w promień włókna, m
- $a_{w\bar{r}}$ średni promień włókna, m
- F_1 siła oporu hydrodynamicznego filtra rzeczywistego dla $Kn \neq 0$, -
- F_{o1} teoretyczna siła oporu hydrodynamicznego w modelu równoległym filtra dla $Kn=0$, -
- F_{o1}^f teoretyczna siła oporu hydrodynamicznego w modelu wachlarzowym filtra dla $Kn=0$, -
- H grubość włókniny, m
- k_{H1} współczynnik oporu hydrodynamicznego uwzględniający niejednorodność budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (model polidispersyjny), określony ze wzoru (3.57), -
- Kn liczba Knudsena, -
- u prędkość napływu powietrza, m/s
- α gęstość upakowania włókniny, -
- Δp_{ex} opór przepływu powietrza przez filtr dla danej prędkości przepływu powietrza u , określony z równania regresji oporu przepływu powstałego na podstawie danych eksperymentalnych $\Delta p=f(u)$, Pa
- ε_{o1} współczynnik uwzględniający niejednorodność struktury filtru, -
- λ średnia długość drogi swobodnej cząstki gazu, m
- μ_g współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, Pa·s
- δ współczynnik poprawkowy charakteryzujący rozproszenie wartości promieni włókien, -
- τ współczynnik poprawkowy wyznaczony przez Kirsza, uwzględniający wzajemne oddziaływanie cząstek i powierzchni włókna, $\tau=1.43 \pm 0.05$, -

Podczas przeprowadzanych badań rzeczywistych filtrów powietrza, dla wielkości gęstości upakowania włókniny zawartych w przedziale $\alpha=0.02 \div 0.08$, Chen uzyskał wartość współczynnika uwzględniającego niejednorodność struktury filtru wynoszącą 2.0 [37].

Wzory opisujące współczynniki oporu hydrodynamicznego podano opierając się na ich interpretacji przedstawionej przez J. Nowickiego [15].

Na podstawie przedstawionych zależności określa się współczynnik przeskoku k , zależnie od sposobu obliczenia współczynnika oporu hydrodynamicznego:

- dla k_H :

$$k = 100 \cdot \exp\left(\frac{-a_{w\ \acute{s}r} \cdot \eta_P \cdot \Delta p_{ex} \cdot k_H}{2\pi \cdot \mu_g \cdot u}\right) \quad (3.64)$$

- dla k_{H1} :

$$k = 100 \cdot \exp\left(\frac{-a_{w\ \acute{s}r} \cdot \eta_P \cdot \Delta p_{ex} \cdot k_{H1}}{4\pi \cdot \mu_g \cdot u}\right) \quad (3.65)$$

gdzie:

- $a_{w\ \acute{s}r}$ średni promień włókna, m
- k współczynnik przeskoku, %
- k_H współczynnik oporu hydrodynamicznego nie uwzględniający niejednorodności budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (model monodispersyjny), określony ze wzoru (3.51), -
- k_{H1} współczynnik oporu hydrodynamicznego uwzględniający niejednorodność budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (wachlarzowy model polidispersyjny), określony ze wzoru (3.57), -
- u prędkość napływu powietrza, m/s
- Δp_{ex} opór przepływu powietrza przez filtr eksperymentalnych dla danej prędkości przepływu powietrza u , określony z równania regresji oporu przepływu powstałego na podstawie danych $\Delta p=f(u)$, Pa
- μ_g współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, Pa·s
- η_P sumaryczne prawdopodobieństwo osadzenia cząstek na wyizolowanym włóknie, -

3.4.2.7. Modele matematyczne a rzeczywiste warunki procesu filtracji

Poniżej przedstawiono porównanie niektórych założeń teoretycznych modeli matematycznych z rzeczywistymi warunkami przebiegu procesu filtracji [11], [12], [15], [23], [37], [41], [42], [51], [74], [81]. Podzielono je tematycznie ze względu na poruszane zagadnienia.

A) Warunki przepływu:

- Obliczenia oparte na opisie pola przepływu wokół izolowanego cylindra dostarczają informacji na temat jakościowej interpretacji procesu zatrzymania cząstek na włóknach filtru. Taki model obliczeniowy nie zawsze może przedstawić ilościową ocenę zgodną z wynikami eksperymentalnymi [37].
- Przepływ aerozolu przez materiał filtracyjny nie zawsze jest w pełni laminarny. Natomiast klasyczna teoria filtracji oparta na rozwiązywaniu równań Naviera-Stokesa obejmuje jedynie taki rodzaj przepływu. Jako granicę występowania

przepływu laminarnego dla opływu wyizolowanego włókna często przyjmowana jest wartość liczby Reynoldsa nie przekraczającej 1 [74].

Podczas badań uzyskano wartości liczby Reynoldsa mieszczące się w zakresie $2.2714 \div 8.1690 \cdot 10^{-3}$. Na tej podstawie zaklasyfikowano przepływ aerozolu przez włókniny jako laminarny, co pozwoliło porównywać wyniki eksperymentalne i uzyskane w oparciu o modele matematyczne.

- Większość modeli obowiązuje dla przepływów aerozolu opisanych równaniami hydrodynamiki i nie uwzględnia efektów molekularnych, tj. wpływu poślizgu gazu w pobliżu powierzchni włókna w warunkach, kiedy średnia droga swobodna molekuł gazu λ jest porównywalna z promieniem ziaren [74], [81]. Jak wynika z wartości liczby Knudseny występujących podczas pomiarów i wynoszących $0.047 \div 0.114$, zjawisko poślizgu mogło wystąpić i wobec tego powinno być uwzględnione w rozważaniach teoretycznych (klasyfikację przepływu na podstawie wartości liczby Knudseny zamieszczono w Tabeli 3.1 w Rozdziale 3.1.4).

B) Mechanizmy filtracyjne:

- Uwaga autorów modeli głównie skupiała się na trzech podstawowych mechanizmach filtracji (dyfuzja, zaczepienie, bezwładność). Wiadomo jednak, że w pewnych przypadkach decydujące znaczenie mogą mieć siły elektrostatycznego przyciągania, jak również siły oddziaływania międzycząsteczkowego (nie rozważane w modelach), a ich zdolność do narastania w czasie wpływa na trwałość powiązań ziaren z włóknem [51].
- W [37] stwierdzono, że w obszarze maksymalnego przenikania cząstek za ich zatrzymanie odpowiedzialne są jedynie zjawiska dyfuzji i zaczepienia. Są to również praktycznie jedyne zjawiska występujące podczas dokładnej filtracji. Problem ten został uwzględniony jedynie w modelu wachlarzowym.

C) Sumaryczna skuteczność filtracji:

Rzeczywista sumaryczna skuteczność filtracji jest wyższa od każdej składowej efektywności wynikającej z występowania pojedynczego mechanizmu, a mniejsza od ich algebraicznej sumy. W oparciu o zastosowane w modelach algebraiczne sumy współczynników osadzania ziaren na powierzchni włókien służące do określenia całkowitej skuteczności filtracji uzyskać można jedynie przybliżone wyniki [81].

Według [81] lepsze niż algebraiczne przybliżenie wartości całkowitego współczynnika osadzania, otrzymuje się przy założeniu, że cząstki nie wychwycone w przypadku zatrzymania w wyniku oddziaływania jednego z mechanizmów, będą zatrzymane w wyniku osadzenia pod wpływem innych mechanizmów. W takim przypadku, zamiast algebraicznej sumy współczynników osadzania, powinno się zastosować wzór:

$$\eta_p = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2)(1 - \eta_3) \quad (3.66)$$

gdzie:

η_p sumaryczny współczynnik prawdopodobieństwa osadzania ziarna

na powierzchni włókna
 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots$ składowe współczynniki prawdopodobieństwa osadzania ziarna

D) Aerosol, ziarno:

- Podczas określania teoretycznej skuteczności filtracji zakłada się, że w każdej płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przepływu stężenie aerozolu jest stałe, niezależnie od zatrzymywanego aerozolu na cylindrach. W rzeczywistości nie zachodzi tak idealne wymieszanie aerozolu za każdą warstwą włókien [37].
- Jedynie w obszarze przepływu laminarnego twierdzenie o trwałości zatrzymania ziarna na włóknie, które było jednym z podstawowych założeń przy tworzeniu modeli filtracji, nie powoduje rozbieżności pomiędzy teorią a wynikami eksperymentalnymi. Fuchs wykazał, że to założenie jest spełnione dla ziaren o średnicach nie przekraczających $1 \mu\text{m}$ zderzających się z włóknom w wyniku dyfuzji, przy czym średnica włókna jest większa od średnicy pyłu [74]. Podczas przeprowadzania pomiarów, założenie o trwałości zatrzymania cząstek zostało dotrzymane (przepływ aerozolu miał charakter laminarny, średnice ziaren były mniejsze od $1 \mu\text{m}$, a średnice włókien mieściły się w zakresie $1.142\text{--}4.107 \mu\text{m}$).
- Według założeń teoretycznych, modele dotyczą filtracji przebiegającej w warunkach ustalonych, podczas której ziarna osadzają się na czystych włóknach, a jest ich tak mało, że nie powodują istotnego wzrostu oporu przepływu powietrza. Badania przeprowadzono dla początkowego etapu procesu filtracji, tj. dla filtracji ustalonej, co stanowiło kolejną przesłankę umożliwiającą porównanie wyników eksperymentalnych z teoretycznymi.
- Większość modeli oparta była na przepływie monodispersyjnego aerozolu o wielkości cząstek nie przekraczającej $1 \mu\text{m}$, natomiast w praktyce częściej stosuje się aerozole polidispersyjne o szerokim zakresie wielkości cząstek. Zjawiska zachodzące w przypadku aerozoli polidispersyjnych są bardziej skomplikowane ze względu na zróżnicowane oddziaływanie poszczególnych mechanizmów osadzania w odniesieniu do kolejnych przedziałów wymiarowych cząstek [37]. Zastosowany podczas pomiarów aerosol chlorku sodu był polidispersyjny. Z tego powodu mogły wystąpić różnice pomiędzy wynikami rzeczywistymi a teoretycznymi dla wszystkich modeli oprócz modelu wachlarzowego, który uwzględniał zróżnicowany skład frakcyjny pyłu. W badaniach dotrzymano warunku występującego w przypadku wszystkich modeli, a zakładającego, że średnice pyłu są mniejsze od $1 \mu\text{m}$.

E) Materiał filtracyjny, włókna:

- W zastosowanych materiałach filtracyjnych wykonanych metodą papierniczą włókna nie są ułożone prostopadle do kierunku przepływu aerozolu; ich ułożenie jest zdecydowanie losowe i nieuporządkowane. Taka skomplikowana struktura włókniny utrudnia porównywanie warunków rzeczywistych procesu filtracji z modelami teoretycznymi (z wyjątkiem modelu wachlarzowego), dla których autorzy przyjęli założenie o prostopadłym ułożeniu włókien w stosunku do kierunku przepływu aerozolu [11], [12].

- Nawet najstaranniej wykonane rzeczywiste materiały charakteryzują się zmienną miejscową gęstością materiału, w wyniku czego przepływ odbywa się nierównomiernie przez całą powierzchnię filtra, koncentrując się w obszarach o zwiększonej porowatości [41], [42]. Zjawisko to nie zostało uwzględnione w modelach.
- Zależności przedstawione w teoretycznych modelach procesu filtracji dotyczą idealnie gładkich stykających się ze sobą powierzchni. W rzeczywistości włókna mają różne średnice, różna jest także chropowatość ich powierzchni, co ma wpływ na siły przyczepności ziaren do włókien i na fakt, że w praktyce nie wszystkie ziarna pyłu osadzają się w sposób trwały [74].
- W rzeczywistych materiałach filtracyjnych znaczącą rolę przy ocenie straty ciśnienia przy przepływie powietrza ma wzajemny wpływ sąsiadujących ze sobą włókien. W związku z tym pole prędkości wokół włókna nawet w izotropowym materiale, odbiega od pola prędkości wokół wyizolowanego cylindra, którego opis był podstawą w modelach matematycznych filtracji aerozolu. W modelach najczęściej wpływ sąsiednich włókien jest uwzględniany przez wprowadzenie wartości gęstości upakowania materiału filtracyjnego oraz dodatkowych empirycznych poprawek [74].
- W celu prawidłowego opisu wpływu zmienności średnicy włókien na charakterystykę oporową i skuteczność filtracji powinno się uwzględnić w modelach matematycznych tzw. efekt przysłonięcia, różny dla włókien o różnych grubościach. Występuje on we wszystkich rodzajach włókien, ale jest bardziej znaczący w przypadku materiałów dwuskładnikowych zbudowanych z niejednorodnych włókien o różnych średnicach, a mniej istotny w przypadku włókien jednoskładnikowych o w miarę jednorodnej budowie. Aby ten efekt uwzględnić, w niektórych modelach w zależnościach służących do określenia liczb podobieństwa opisujących poszczególne mechanizmy filtracji oraz we wzorach obliczających współczynniki osadzania ziaren i całkowity przeskok aerozolu, zamiast średnicy geometrycznej, stosuje się średnicę efektywną włókna. Autorzy modeli matematycznych nie przedstawili jednakowych i jednoznacznych metod określania jej wartości i zasad stosowania.
- Dla materiałów wykonanych z włókien o różnych średnicach jedynie w modelu wachlarzowym wprowadzono współczynnik poprawkowy uwzględniający rozrzut wielkości średnic włókien. Włókniwy wykorzystane w badaniach były wykonane z włókien o niejednorodnej budowie, a zatem wyniki otrzymane na podstawie pozostałych modeli teoretycznych również z tego właśnie powodu mogły różnić się od wartości rzeczywistych.

Jak wynika z powyższego opisu, niektóre różnice pomiędzy teoretycznymi modelami procesu filtracji a stanem rzeczywistym, które niewątpliwie mogą występować, mogą powodować różnice pomiędzy wartościami teoretycznymi a rzeczywistymi skuteczności filtracji. Najbliższy stanowi rzeczywistemu wydaje się polidispersyjny model wachlarzowy Kirsza i Stieczkiny. W swoim opisie uwzględnia wiele

szczegółowych zagadnień dotyczących elementów wpływających na wynik procesu filtracji. Są to m.in.:

- nieuporządkowane ułożenie włókien w materiale filtracyjnym (bardzo bliskie rzeczywistemu losowemu ich układowi w filtrze),
- wykonanie materiału filtracyjnego z cienkich i ultracienkich włókien,
- polidispersyjność włókien,
- niejednorodność materiału filtracyjnego,
- polidispersyjność aerozolu,
- występowanie w aerozolu submikronowych cząstek,
- selektywność filtru (w obszarze cząstek najbardziej przenikających przez filtr),
- podstawowe zjawiska filtracji występujące w obszarze selektywności filtru,
- zjawisko poślizgu gazu na powierzchni włókien.

3.4.2.8. Ocena wiarygodności opisu analitycznego przy złożonych strukturalnie materiałach filtracyjnych

Obecny stan teorii filtracji aerozolu nie pozwala na prawidłowe projektowanie rzeczywistych struktur filtracyjnych ze względu na często spotykane rozbieżności pomiędzy teorią a eksperymentem, a także ze względu na rozbieżności pomiędzy modelami matematycznymi opracowanymi i proponowanymi przez różnych autorów. Stworzenie zadowalającego modelu teoretycznego, nawet dla materiału jednoskładnikowego i dla filtracji ustalonej, napotyka na poważne trudności. Wynika to z faktu, że rzeczywiste włókniste materiały filtracyjne oraz warunki przepływu aerozolu różnią się od przyjętych założeń modeli matematycznych i nie spełniają przyjmowanych dla nich uproszczeń [23].

W tej sytuacji, przy wzrastającym nieuporządkowaniu struktury materiałów filtracyjnych, próby dalszej rozbudowy modeli teoretycznych mogą w efekcie nie przynieść prawidłowego rozwiązania opisu procesu filtracji.

Celem wykonywanych w pracy badań eksperymentalnych była m.in. ocena wpływu różnych parametrów struktur filtracyjnych w porównaniu z opisującymi je założeniami modeli.

W toku badań wykorzystano materiał filtracyjny wykonany techniką papierniczą, którego cechą charakterystyczną jest budowa warstwowa. Pojawiła się zatem nowa właściwość strukturalna nie uwzględniona w żadnym z modeli i odróżniająca zastosowany materiał od włóknin wykonanych z wykorzystaniem innej techniki.

Dodatkowo aerozol submikronowy, o wymiarach najistotniejszych w przypadku wysokoskutecznego oczyszczania powietrza, nie był odpowiednio uwzględniony (lub wyróżniony) w modelach matematycznych. Nie była także podkreślana polidispersyjność ziaren. Wręcz przeciwnie, poza jednym z modeli wachlarzowych, żaden inny model nie uwzględniał występującego w rzeczywistości aerozolu o różnych wymiarach ziaren. Taki skład aerozolu ma istotny wpływ na przebieg procesu filtracji ze względu na różne oddziaływanie zjawisk filtracyjnych na cząstki o różnych wymiarach i wynikającą z tego różną wartość skuteczności filtracji dla różnych frakcji pyłu.

Oprócz skomplikowanej budowy wysokoskutecznych papierów filtracyjnych i zróżnicowanego składu ziarnowego aerozoli, dodatkowy problem, powodujący rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarowymi a teoretycznymi, stanowi prawidłowa ocena zachodzących zjawisk i ich właściwy opis. Mimo, że od dawna były prowadzone badania m.in. nad przebiegiem mechanizmów filtracyjnych, do tej pory wśród naukowców nie ma pełnej zgodności co do sposobu ich matematycznego opisu. Także nieuwzględnienie w klasycznych modelach procesu filtracji takich zjawisk jak np. osadzanie ziaren pod wpływem sił elektrostatycznych, czy sił oddziaływania międzycząsteczkowego powoduje występowanie różnic pomiędzy wartością skuteczności otrzymaną na podstawie rozważań teoretycznych, a wartością rzeczywistą.

Wszystkie wymienione powyżej problemy zmuszają do poszukiwania innego niż deterministyczny sposobu opisu procesu filtracyjnego, wykorzystującego nie tylko wiedzę o samym zjawisku, ale rozszerzającą podejście do rozwiązywanego problemu modelowania w oparciu o wykorzystanie danych pomiarowych i ich analizę statystyczną.

3.4.3. Modele hybrydowe

3.4.3.1. Założenia dla modeli hybrydowych

Analiza modeli deterministycznych stosowanych opisu procesu filtracji powietrza oraz porównanie wyników otrzymanych na ich podstawie z wartościami eksperymentalnymi, podważyła możliwość szerokiego korzystania z nich np. w przypadku bardziej skomplikowanej struktury materiału filtracyjnego o losowo ułożonych niejednorodnych włóknach i podczas przepływu aerozolu polidispersyjnego.

Na podstawie wcześniej przedstawionego przeglądu klasyfikacji modeli matematycznych, wykorzystując w pracy ich podział na modele deterministyczne, niefizyczne i hybrydowe, do dalszych rozważań wybrano ostatni z wymienionych modeli. W model hybrydowym korzysta się z opisu statystycznego wiążącego podstawową wiedzę o procesie filtracji uzyskaną na podstawie modeli fizycznych z danymi zebranymi w wyniku przeprowadzania badań eksperymentalnych.

Istniejące modele hybrydowe skuteczności filtracji powietrza potwierdzają zasadność takiego właśnie kierunku poszukiwań sposobu jej opisu (autorami takich modeli byli m.in. Clarenburg [11], Blasewitz [81], M. Nowicki [51], Ptak [74], Wirski [85]). Jednak modele te, chociaż rozwiązują wiele istotnych problemów, mają pewne ograniczenia i dlatego nie mogą być zastosowane w niniejszej pracy. Zastrzeżenia te dotyczą m.in. innego niż rozważany w pracy doktorskiej rodzaju przepływu czy innego etapu procesu filtracji, innych zakresów wymiarowych średnic pyłu i włókien, innych prędkości filtracji lub wykorzystania aerozolu monodispersyjnego. Mimo tych zastrzeżeń, w oparciu o istniejące modele hybrydowe, potwierdzono poprawność wyboru zmiennych niezależnych służących do modelowania procesu filtracji.

Podczas opisu procesu filtracji oprzeć się można o teorię modelu pomiarowego, która po uwzględnieniu współczesnych zadań techniki pomiarowej została poddana pewnym modyfikacjom i opisuje model probabilistyczny zachodzącego procesu. Zgodnie z zasadami tej teorii, zastosowanie statystyki stosowanej, wiążącej model probabilistyczny z danymi rzeczywistymi zgromadzonymi na podstawie przeprowadzonych pomiarów, powinno pozwolić na stworzenie modelu procesu filtracji powietrza.

3.4.3.2. Probabilistyczny model procesu pomiarowego

Sens pomiarów różnie interpretowany jest w różnych naukach. W filozofii pomiar przedstawiany jest jako narzędzie procesu poznania [55]. Teoria poznania w ujęciu filozoficznym jest formą uzyskiwania informacji o otaczającej rzeczywistości ze zwróceniem uwagi na ustalenie źródeł wiedzy, granic poznania oraz prawdziwości wiedzy. Narzędziem poznania stają się obserwacje i eksperymenty. Pomiar jest więc aktem poznawczym rzeczywistości, wtedy gdy informacje o niej przedstawia się w postaci liczbowej. Rezultat pomiaru musi spełniać wymóg prawdy obiektywnej. Aby obraz rzeczywistości uzyskiwany za pomocą pomiarów i przedstawiony w dziedzinie abstrakcji był obiektywny, muszą być spełnione pewne reguły postępowania. A mianowicie: obiektem pomiaru musi być pewna wybrana cecha określonego przedmiotu lub zjawiska stanowiącego fragment rzeczywistości. Cecha ta ujawnia się w badanych przedmiotach lub w jednym przedmiocie z różną intensywnością wyrażaną rozmaitymi stanami tej cechy.

Zasady te można z powodzeniem realizować w złożonym obszarze nauk technicznych, a zatem również w odniesieniu do niniejszej pracy. W tym przypadku badaną cechą procesu filtracji powietrza jest określenie skuteczności filtracji w wyniku pomiaru ilości ziaren przed i za badanym filtrem. Natomiast cechami samego filtru mogą być wszystkie jego parametry strukturalne.

Klasyczny model procesu pomiarowego rozumianego jako eksperyment i wykonany w dokładnie określonych oraz przestrzeganych warunkach, formułowany był w metrologii przy uwzględnieniu następujących ograniczeń [36]:

- w ciągu jednego cyklu pomiarowego mierzona wielkość fizyczna nie zmienia swej wartości rzeczywistej, przy czym wartość rzeczywista charakteryzowana jest za pomocą tzw. wartości poprawnej leżącej wewnątrz końcowego przedziału nieokreśloności (przedziału ufności),
- czas pomiaru jest nieograniczony i porównanie z miarą może trwać dowolnie długo,
- warunki zewnętrzne oraz inne czynniki wpływające na wynik pomiaru są dokładnie określone.

Jednak obecne zadania techniki pomiarowej coraz bardziej odbiegają od wyidealizowanego eksperymentu metrologicznego będącego porównywaniem wielkości mierzonej z miarą. Zmiany te powodują weryfikację zasad budowy modeli procesu pomiarowego.

Cechy charakterystyczne współczesnego modelu procesu pomiarowego, tzw. probabilistycznego (informacyjnego), są następujące:

- mierzona wielkość jest traktowana jako proces losowy zawierający informację o stanie badanego lub kontrolowanego obiektu i opisana jest przez ciąg wartości przypadkowych lub uogólnione charakterystyki tego ciągu (wartość oczekiwana, wariancję); rzeczywista (chwilowa) wartość wielkości mierzonej może pozostać nieokreślona na danym etapie procesu pomiarowego,
- w przypadku ogólnym pomiar uważa się za ciąg operacji o ograniczonym i skończonym czasie trwania, a bezpośredniego porównania wielkości mierzonej z jednostką miary nie dokonuje się wcale,
- właściwości urządzenia pomiarowego mogą zmieniać się w czasie pod wpływem zmiennych z natury czynników zewnętrznych (są to zmiany losowe traktowane jako procesy losowe wpływające na nieokreśloność wyniku pomiaru).

Przedstawiony wcześniej model klasyczny może być więc traktowany jako szczególny przypadek modelu probabilistycznego.

Podejście informatyczne jest bardziej ogólne i konsekwentne, choć wiąże się z koniecznością opisaną zależności probabilistycznych pomiędzy wszystkimi czynnikami wpływającymi na wynik pomiaru.

Model probabilistyczny pozostaje pojęciem abstrakcyjnym aż do momentu powiązania go z obserwacjami zjawisk fizycznych. Dane uzyskane w wyniku pomiarów umożliwiają liczbowe oszacowanie parametrów modelu oraz sprawdzenie tego modelu przez porównywanie obserwacji z prognozami modelu [3].

Modele probabilistyczne stosowane są najczęściej do modelowania zjawisk powtarzalnych, przy czym prawdopodobieństwo interpretowane jest jako częstość zdarzeń. Opis probabilistyczny wykorzystuje się również do modelowania zjawisk, które nie mogą zająć ponownie, interpretując prawdopodobieństwo jako miarę stopnia przekonania, że dane zjawisko będzie miało miejsce [54]. Modele probabilistyczne są obecnie powszechnie stosowane m.in w technice, biologii, socjologii, psychologii, medycynie.

Omówione wyżej cechy potraktowano jako kolejną przesłankę dla podjęcia w niniejszej pracy próby sformułowania probabilistycznego modelu procesu pomiarowego w zakresie opisu przedziałowej numerycznej skuteczności filtracji.

W dążeniu do uzyskania w toku badań jak największego zasobu informacji wykorzystano:

- aerozol polidispersyjny o zakresie wymiarowym ziaren od 0.032 do 1 μm ,
- jak najszerszy zakres zmienności parametrów charakteryzujących włókniny, przy wyraźnym nieuporządkowaniu ułożenia włókien.

Uznano, że zastosowanie materiałów wykonanych metodą papierniczą jest w stanie zapewnić maksymalny zakres zmienności w tym zakresie.

4. BADANIA EKSPERYMENTALNE

4.1. Zakres badań

Wskaźniki filtracyjne charakteryzujące wykonane specjalnie dla potrzeb pracy doktorskiej włókniny (przewidziane dla wysokoskutecznego oczyszczania powietrza nawiewanego do pomieszczeń o wymaganym wysokim poziomie) określone zostały w pracy w sposób eksperymentalny.

Podczas pomiarów określono następujące wskaźniki filtracyjne:

- numeryczną przedziałową skuteczność filtracji testem chlorku sodu,
- całkowitą skuteczność filtracji testem mgły olejowej,
- stratę ciśnienia podczas przepływu czystego powietrza,
- stratę ciśnienia podczas przepływu mgły olejowej.

Ponadto określono ładunek elektrostatyczny materiałów filtracyjnych.

Zakres badań dostosowano do wartości liczb podobieństwa ograniczających stosowanie modeli matematycznych, tak aby było możliwe porównywanie wyników eksperymentalnych z teoretycznymi (Rozdział 3.4.2.7).

Zgodnie ze sformułowaniem rozwiązywanego tematu rozprawy, najważniejszym określanym eksperymentalnie wskaźnikiem była skuteczność filtracji, występująca w początkowym etapie procesu oczyszczania aerozolu. Przyjmuje ona wówczas najbardziej niekorzystne wielkości z punktu widzenia przebiegu procesu oczyszczania powietrza (najniższa wartość skuteczności).

Skuteczność początkowa filtracji jest, obok skuteczności średniej, bardzo istotnym parametrem przy doborze filtrów powietrza podawanym w normach (m.in. w [2], [10], [19], [71]). O tym, jak ważnym jest parametrem świadczy fakt, że jest ona najważniejszym wskaźnikiem determinującym zakwalifikowanie filtrów do odpowiedniej klasy. Także w katalogach producenci zalecają dobór odpowiedniego filtra w oparciu o skuteczność początkową. A zatem określanie podczas badań tego właśnie parametru i opisanie procesu filtracji ustalonej jest tendencją występującą w technice filtracyjnej w kraju i na świecie oraz pozwalająca na ocenę pracy filtra w okresie najbardziej dla niego niekorzystnym.

Nowoczesne materiały filtracyjne powinny charakteryzować się bardzo dużą skutecznością przy niewielkiej stracie ciśnienia i dużej pojemności pyłowej.

Straty ciśnienia podczas przepływu powietrza przez filtr są nierozzerwalnie związane ze skutecznością filtracji, przy czym, z reguły, im wyższa jest skuteczność filtracji, tym wyższymi wartościami charakteryzują się straty ciśnienia. Jednak, w przypadku gdy nadrzędnym zadaniem filtra jest zapewnienie wyjątkowo wysokiej czystości powietrza doprowadzanego do pomieszczeń, utrzymanie niskiej wartości straty ciśnienia (a także dużej pyłochłonności) staje się czynnikiem drugorzędym.

Określona podczas badań przedziałowa numeryczna skuteczność filtracji wraz z parametrami strukturalnymi włókien i włóknin posłużyła do stworzenia modelu probabilistycznego filtracji powietrza omówionego w dalszej części pracy. Podczas

pomiarów określono także wartości straty ciśnienia podczas przepływu powietrza przez materiał. Były one wykorzystane podczas oceny przydatności istniejących modeli matematycznych procesu filtracji oraz do określenia kryterium dobroci filtra służącego do porównania jakości materiałów filtracyjnych.

W Rozdziałach 4.4, 4.5, 4.6 omówiono metodykę przeprowadzania pomiarów wskaźników filtracyjnych i otrzymane wyniki. Pełne wyniki badań w postaci tabelarycznej i graficznej zamieszczono w Załączniku 1.

4.2. Wybór włókien filtracyjnych

Najczęściej stosowanymi obecnie włóknami do produkcji materiałów filtracyjnych są włókna szklane. Oprócz zalet, wynikających m.in. z ich odporności chemicznej, mikrobiologicznej i niehigroskopijności, ważną cechą jest możliwość ich formowania w szerokim zakresie wymiarów średnic, począwszy od 0.05 μm . A zatem z włókien szklanych można wytwarzać materiały filtracyjne w postaci włókien i papierów filtracyjnych o różnej spodziewanej skuteczności filtracji. Jednocześnie włóknina filtracyjna wykonana z włókien szklanych jest tańsza od innych materiałów wysokoskutecznych, może być długo przechowywana bez utraty swoich właściwości oraz ma bardzo długi czas użytkowania. Prowadzone w Polsce prace badawcze i wdrożeniowe dotyczące produkcji wysokoskutecznych filtrów powietrza przede wszystkim z włókien szklanych, dowodzą, że można wykonać z nich filtry powietrza charakteryzujące się bardzo wysoką skutecznością [31].

Wykonanie takich materiałów jest możliwe w wyniku właściwego przystosowania metod papierniczych z uwzględnieniem specyfiki włókien szklanych. W wyniku zastosowania odpowiedniej techniki formowania uzyskuje się bardzo cienki nietkany materiał o skomplikowanej strukturze wynikającej z losowego ułożenia włókien. Budowa taka wspomaga proces filtracji, gdyż sprzyja poprawieniu skuteczności zatrzymania ziaren pyłu.

W oparciu o przedstawione powyżej informacje, postanowiono w trakcie pomiarów przebadac papiery filtracyjne wykonane z utracienkich i cienkich włókien szklanych, zapewniające wysokoskuteczne oczyszczenie powietrza. Papiery takie, wykonane specjalnie dla potrzeb pracy doktorskiej, dawały możliwość efektywnego zatrzymania drobnych cząstek aerozolu o wymiarach mniejszych od 1 μm .

W technice filtracyjnej metoda papiernicza, służąca do wytwarzania formowanych na mokro z włókien szklanych specjalnych włókien zwanych papierami szklanymi, wykorzystywana jest w świecie od 1960 roku [17]. Od 1980 roku nastąpił szybki rozwój tej techniki, a znacząca część produkcji jest obecnie stosowana dla potrzeb wysokoskutecznej filtracji powietrza. Należy zwrócić uwagę na coraz szersze wykorzystywanie przez producentów na całym świecie włókien szklanych do produkcji filtrów HEPA i ULPA wykonanych w większości przypadków techniką papierniczą. Natomiast pierwszą krajową produkcję specjalnych papierów z mikrowłókien szklanych służących do oczyszczania powietrza uruchomiono w 1990 roku w Instytucie Celulozowo-Papierniczym w Łodzi.

Wykorzystane w badaniach włókniny filtracyjne, wykonane metodą papierniczą, powstały w Instytucie Papiernictwa i Maszyn Papierniczych Politechniki Łódzkiej w 1993 roku.

Struktura wykonanych tą metodą papierów filtracyjnych w sposób szczególny różni się od innych wyrobów produkowanych także w postaci arkuszy lub wstęgi, ponieważ [17]:

- w odróżnieniu od folii z tworzywa sztucznego lub metalu, papier jest zbudowany z włókien,
- w odróżnieniu od tkaniny, strukturę papieru tworzą pojedyncze, krótkie włókna, ułożone w dużym stopniu przypadkowo (można zatem przyjąć, że swoją strukturą papier jest zbliżony do omawianego wcześniej modelu wachlarzowego budowy materiału filtracyjnego o losowo rozmieszczonych włóknach),
- w przeciwieństwie do tkaniny, filcu lub skóry, papier charakteryzuje się budową warstwową, w której pojedyncze włókna są rozmieszczone przede wszystkim w płaszczyźnie arkusza papieru, znajdując się na określonym poziomie jego grubości.

Do formowania papierów filtracyjnych wykorzystane zostały następujące rodzaje włókien:

- włókna szklane wyprodukowane przez Zakłady Materiałów Termoizolacyjnych w Gorlicach COBR Przemysłu Izolacji Budowlanej w Katowicach, oznaczone symbolem U-10 (PL),
- włókna szklane produkcji szwedzkiej, oznaczone symbolem I.15 (S),
- bielone włókna celulozowe (sosnowe).

Zastosowane włókna szklane różnią się od siebie wielkością średnic. Fabryczne symbole włókien opisują ich średnice nominalne. W przypadku włókien polskich średnica nominalna powinna wynosić 1 μm , w przypadku włókien szwedzkich: 1.15 μm . Konieczność zatrzymania cząstek submikronowych wymaga zastosowania materiału wykonanego z cienkich włókien. Opierając się na danych dotyczących średnic włókien, można było przypuszczać, że wykonane z nich papiery filtracyjne faktycznie będą odpowiednie dla wysokoskutecznej filtracji powietrza. Z tego powodu właśnie te włókna wykorzystano do produkcji papierów filtracyjnych.

Wymienione rodzaje włókien szklanych wykorzystywane były do wykonania wysokoskutecznych włóknin lub papierów filtracyjnych nie tylko dla potrzeb niniejszej pracy, ale także dla potrzeb innych ośrodków badawczych.

W Rozdziałach 4.2.1, 4.2.2 przedstawiono właściwości włókien szklanych i celulozowych oraz omówiono możliwość ich wykorzystania w procesie formowania włóknin metodą papierniczą.

4.2.1. Charakterystyka włókien szklanych

Włókna szklane charakteryzują się szczególnymi właściwościami, sprawiającymi, że formowanie struktur papieropodobnych z ich wodnej zawiesiny jest skomplikowane. Ujawnia się to nawet w nazewnictwie, gdyż właściwie rzadko stosuje się określenia

"papier szklany" czy "papier z włókien szklanych", a raczej nazywa się je "strukturą papieropodobną z włókien szklanych" lub "formowaną techniką papierniczą włókniną z włókien szklanych". Mimo problemów, jakie włókno szklane stwarza podczas wytwarzania włókniny, jest ono, ze względu na swoje liczne zalety, wykorzystywane do produkcji wysokoskuteknych materiałów stosowanych w filtracji powietrza [16]. Poniżej opisano niektóre ich właściwości.

Włókna szklane, wytwarzane najczęściej ze szkła glinowo-borokrzemowego (z dodatkiem związków fluorowych), mogą być formowane w znacznym zakresie średnic (0.1 ÷ 100 μm).

W literaturze krajowej spotyka się różne sposoby klasyfikacji włókien szklanych zależnie od ich wymiarów.

Według [18] wśród najcieńszych włókien szklanych w zależności od ich średnicy rozróżnia się:

- włókna ultracienkie (poniżej 1 μm),
- włókna niskomikronowe (1 ÷ 3 μm),
- włókna normalne (4 ÷ 7 μm),
- rowing (9 ÷ 12 μm).

Natomiast w PN-88/P-04768 [62] włókna szklane dzieli się na:

- ultracienkie (poniżej 1 μm),
- niskomikronowe (1 ÷ 5 μm).

Materiały filtracyjne wykonane z włókien szklanych cechuje wysoka wytrzymałość termiczna. Znaczący spadek wytrzymałości występuje dopiero po przekroczeniu temperatury 315°C. Jednak przy dłuższym działaniu ciepła dopuszczalna temperatura użytkowa jest niższa i wynosi około 260°C. W temperaturze 370°C włókna tracą około 50% swojej wytrzymałości [70]. Włókna szklane nie palą się, natomiast w płomieniu początkowo żarzą się na czerwono, a następnie topią się tworząc jasną twardą kulkę i nie wydzielając żadnego zapachu [56].

Włókna szklane nie absorbują wody i z tego powodu nie pęcznieją, jednak w środowisku wody występuje niewielki spadek ich wytrzymałości mechanicznej.

Ujemną cechą włókien szklanych jest bardzo mała odporność na zginanie, dotyczy to zwłaszcza grubszych włókien. Stąd istnieje tendencja do wytwarzania włókien o mniejszej średnicy, bardziej wytrzymałych na dynamiczne i zmęczeniowe naprężenia. Są one bardzo sprężyste nawet po odkształceniu w warunkach bliskich punktowi zerwania.

Włókna szklane cechuje doskonała odporność na działanie rozpuszczalników organicznych oraz nieorganicznych, a także bardzo dobra odporność na działanie większości kwasów. Jedynie działanie gazów zawierających HF, SiF₄ i BF₃, a także bezpośrednie oddziaływanie stężonych kwasów H₂SO₄ i HCl, gorącego H₃PO₄ oraz silnych i stężonych zasad może spowodować ich uszkodzenie [35].

Włókna szklane, jak wszystkie surowce nieorganiczne, są w pełni odporne na mikroorganizmy i insekty oraz działanie promieniowania słonecznego. Nie stanowią zagrożenia dla jakości powietrza, gdyż nie emitują żadnych szkodliwych substancji.

Wytwarzanie z włókien szklanych papierów napotyka na pewne trudności, gdyż nie wykazują one budowy fibrylarniej, a więc nie charakteryzują się elastycznością wynikającą z ich fibrylacji wewnętrznej. Podczas mechanicznego mieszania wodnej zawiesiny włókien te cienkie sztywne pręciki szklane łamią się, zmniejszając swoją długość. Mimo to ich wskaźnik smukłości, charakteryzujący stosunek długości do średnicy włókna, jest znacznie większy niż dla włókien celulozowych. Np. mikrowłókno szklane o średnicy 1 μm , skrócone do 1 mm ma wskaźnik smukłości wynoszący 1000, a dla typowych włókien z drewna z drzewa iglastego o średnicy 30 μm i o średniej długości włókna 3 mm ten wskaźnik wynosi około 100.

Wyższy wskaźnik smukłości wskazuje na zwiększoną zdolność włókien do flokulacji (tworzenia skupisk włókien - flokuł) zawiesiny włóknistej, szczególnie w przypadku włókien sztywnych, nie poddanych mieleniu i nie wykazujących elastyczności. Dodatkowa trudność w formowaniu techniką papierniczą jednorodnej struktury z mikrowłókien szklanych wynika z faktu, że podczas formowania na sicie ich wodne zawiesiny odwadniają się bardzo szybko z powodu niemożności wystąpienia w nich efektu fibrylacji wewnętrznej oraz wytworzenia frakcji drobnej o znacznym stopniu spęcznienia. Dodatkowo włókna szklane nie mają samoistnej zdolności do tworzenia wiązań pomiędzy włóknami. Zatem, w odróżnieniu od włókien celulozowych, powstałe z nich struktury charakteryzują się niewielką wytrzymałością.

Powyższe czynniki sprawiają, że wytwarzanie w powtarzalny sposób techniką papierniczą jednorodnych struktur z mikrowłókien szklanych nie jest proste. Trudności te są pogłębione przez fakt, że stosowane w papiernictwie typowe sposoby oceny i metody oznaczeń właściwości zawiesiny włóknistej oraz jakości uformowanej z nich struktury okazują się często zawodne w przypadku włókien szklanych. [16].

Własności fizykochemiczne włókien zamieszczono w Tabeli 4.1 [18], [35], [56], [70].

4.2.2. Charakterystyka włókien celulozowych

Włókna celulozowe są typowym półproduktem włóknistym stosowanym w papiernictwie.

Celuloza (błonnik) jest polocukrem naturalnym i powstaje w zielonych częściach rośliny w wyniku biosyntezy. Jest ona ciałem stałym, bezwonnym o barwie białej, silnie higroskopijnym. Charakteryzuje się niską wytrzymałością mechaniczną i odkształcalnością pod działaniem sił rozciągających oraz niską wartością średniego stopnia sprężystości. Właściwości mechaniczne celulozy nie mogą być utożsamiane z właściwościami mechanicznymi włókna roślinnego, gdyż na cechy celulozy nakłada się wpływ budowy anatomicznej włókna (specyficzna spiralna budowa fibrylarna) [80].

Z punktu widzenia właściwości termicznych celuloza stanowi polimer termorozkładalny. Długotrwałe ogrzewanie w temperaturze 100°C nie powoduje istotnych zmian w budowie chemicznej, lecz pociąga za sobą zmniejszenie zdolności do spęczniania sorpcyjnego i pogorszenia wybarwalności, co wskazuje na

zachodzenie pewnych zmian w budowie fizykochemicznej makrocząstki. Rozpad chemiczny, pociągający za sobą pogorszenie właściwości fizycznych, rozpoczyna się od temperatury 140°C i objawia się wydzielaniem lotnych (metan, etan, tlenek i dwutlenek węgla) oraz ciekłych (aceton, kwas octowy) produktów rozpadu.

Celuloza jest polimerem łatwopalnym. Temperatura zapłonu wynosi 288°C, temperatura samozapłonu 400°C, temperatura płomienia 450 ÷ 860°C.

Celuloza charakteryzuje się:

- złymi właściwościami elektroizolacyjnymi i względnie dobrym przewodnictwem elektrycznym (oporność elektryczna wynosi $10^5 \div 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$),
- posiada niską zdolność do ładowania elektrostatycznego, co jest następstwem łatwego odprowadzania ładunków w wyniku przewodzenia powierzchniowego,
- wysoką zdolnością do sorpcji wody: woda wiązana jest zarówno w wyniku reakcji fizykochemicznych (wiązanie absorpcyjne, osmoza), jak i mechanicznych (adhezja, woda kapilarna). Retencja wody może osiągać 45 ÷ 55% suchej masy celulozy. W wyniku wysokiej higroskopijności następuje spęcznienie sorpcyjne, które w formie spęcznienia objętościowego może dochodzić do 30% i więcej. Sorpcja wody pociąga za sobą zmniejszenie wytrzymałości mechanicznej celulozy.
- silną reaktywnością chemiczną, ujawniającą się podczas działania na celulozę kwasami, alkaliami i związkami utleniającymi. Jednocześnie jest ona praktycznie niewrażliwa na działanie związków redukujących i rozpuszczalników organicznych. W wyniku działania kwasów lub wodnych roztworów soli silnych kwasów celuloza ulega stopniowej degradacji molekularnej do glikozy. Jest natomiast związkiem nierozpuszczalnym w rozpuszczalnikach organicznych. Roztworzenie może zachodzić tylko w specyficznych warunkach.
- względnie niską odpornością biologiczną, w warunkach podwyższonej wilgotności atakują ją zarówno bakterie, jak i grzyby pleśniaki [80].

Ze względu na swoje zalety celuloza szeroko wykorzystywana jest w papiernictwie.

Włókna celulozowe charakteryzują się budową fibrylarną oraz dużym powinowactwem do wody. Dzięki tym swoim właściwościom pod wpływem działania mechanicznego na ich wodną zawiesinę następuje wprowadzenie dodatkowych i znacznych ilości wody pomiędzy elementy ich struktury, co jest niemożliwe do osiągnięcia na drodze samego (nawet długotrwałego) moczenia w wodzie włókien pozbawionych takich właściwości. Ten podstawowy w papiernictwie proces, zwany mieleniem, prowadzi do znacznego uwodnienia włókien celulozowych, które tracąc swoją pierwotną sztywność, stają się elastyczne lub nawet plastyczne, a podczas formowania na sicie tworzą jednorodne struktury o dużej powierzchni kontaktu pomiędzy włóknami. Sprzyja temu, postępujące w miarę intensywności mielenia, pewne skracanie włókien, a także wydzielanie silnie spęczniałej drobnej frakcji, spowalniającej przebieg odwadniania na sicie zawiesiny włóknistej. W przypadku formowania papieru z zawiesiny niezmielonych włókien celulozowych, jej odwodnienie na sicie przebiega niezwykle szybko, uniemożliwiając uformowanie jednorodnego cienkiego papieru. Z takich włókien można jedynie formować grube

wytwory papierowe, stosując zawiesinę o wyższym stężeniu, a więc wolniej się odwadniająca. Dodatkowo, włókna celulozowe charakteryzują się niewielkim, w porównaniu z włóknami szklanymi, wskaźnikiem smukłości. Nie sprzyja to flokulacji zawiesiny włóknistej, czyli tworzeniu się skupisk włókien (flokul), co powoduje poprawę jakości formowanego papieru [16].

W Tabeli 4.1 zestawiono porównanie własności fizykochemicznych włókien szklanych i celulozowych.

Tabela 4.1. Własności fizykochemiczne włókien szklanych i celulozowych

Własności	Jedn.	Włókno szklane	Włókno celulozowe
Gęstość	kg/m ³	2200 ÷ 2700	1455 ÷ 1590
Wytrzymałość na rozrywanie	N/mm ²	1480 ÷ 2450	niska
Względna elastyczność	-	zła	zła
Chłonność wilgoci	-	0	silnie higroskopijne
Oporność elektryczna	Ω·cm	1015	10 ⁵ ÷ 10 ⁶
Odporność termiczna	°C	slabnie powyżej 300°C mięknie powyżej 650°C topnieje w temp. 742÷848°C	rozpad chemiczny od temp. 140°C, temp. zapłonu 288°C, temp. samozapłonu 400°C, temp. płomienia 450 ÷ 860°C
Odporność na kwasy nieorganiczne	-	b. dobra	zła
Odporność na kwasy organiczne	-	b. dobra (z wyjątkiem HF)	zła
Odporność na alkalia	-	dobra	zła
Odporność na rozpuszczalniki organiczne i nieorganiczne	-	doskonała	b. dobra
Odporność na mikroorganizmy	-	doskonała	zła

4.2.3. Metodyka wykonania włóknin filtracyjnych

Podczas wytwarzania włóknin filtracyjnych techniką papierniczą wykorzystano niektóre właściwości fizykochemiczne charakteryzujące włókna szklane i celulozowe opisane w Rozdziałach 4.2.1, 4.2.2.

Włókniny filtracyjne wykonano z dwóch rodzajów włókien szklanych (PL, S) w postaci struktur o różnej gramaturze (60 g/m² i 80 g/m²), stosując różnego typu dodatki oraz susząc je w różnych warunkach i otrzymując w ten sposób 24 różne rodzaje włóknin.

Podczas formowania włóknin zastosowano następujące dodatki:

- **papiernicze włókna celulozowe** (sosnowe, bielone) w ilości 5% masy włókien szklanych; wywierają one korzystny wpływ na stabilność dyspersji mikrowłókien w wodzie (mają właściwości deflokulujące), a także na przebieg formowania na sicie struktury papieropodobnej oraz w niewielkim stopniu poprawiają ich

- wytrzymałość mechaniczną (próbki zawierające włókna celulozowe oznaczono symbolem I),
- **substancja deflokulująca** (odpychająca włókna szklane w zawiesinie wodnej i przeciwdziałająca tworzeniu się ich skupisk, czyli flokuł), zastosowano polimer o charakterze anionowym - **CMC - karboksymetylocelulozę** w postaci soli sodowej, w ilości 2% masy włókien szklanych, który bardzo skutecznie stabilizuje dyspersję włókien szklanych w wodzie, poprawia jakość struktury formowanej na sicie; preparat ten wykazuje równocześnie pewne właściwości wiążące, jednak jego zatrzymanie w formowanej na sicie strukturze włóknistej jest nieznaczne (próbki oznaczono symbolem II),
 - **substancja deflokulująca- CMC - karboksymetyloceluloza** (jak w II serii próbek) oraz **substancja flokulująca - Ipowod P (żywica poliamidowo-poliaminowa modyfikowana epichlorohydryną etylenu)** w ilości 1% masy włókien szklanych; Ipowod P jest to substancja o charakterze kationowym zwiększająca zatrzymywanie karboksymetylocelulozy na mikrowłóknach szklanych, powodująca jednak ich pewną flokulację oraz poprawiająca wytrzymałość mechaniczną struktury (próbki oznaczono symbolem III).

W literaturze brak jest bliższych i w miarę spójnych informacji dotyczących wytwarzania techniką papierniczą włóknin filtracyjnych z ultracienkich włókien szklanych (papierów szklanych). Niewątpliwie są na świecie prowadzone w tym zakresie badania, lecz raczej wynikiem ich są wysokiej jakości drogo sprzedawane produkty, a nie prace naukowe i artykuły dotyczące metodyki ich wytwarzania. Przedstawiona poniżej technologia wytwarzania papierów filtracyjnych, wykonanych w Instytucie Papiernictwa i Maszyn Papierniczych Politechniki Łódzkiej dla potrzeb pracy doktorskiej, stanowi cenny wkład w jej rozwój i jest na pewno nowatorskim podejściem do rozwiązania tego problemu w skali kraju [16].

Dyspergowanie włókien szklanych przeprowadzono w rozwłókniaczu laboratoryjnym, biorąc 20 g tych włókien na 10 litrów wody i mieszając przez 10 minut przy szybkich obrotach mieszadła. Następnie, stosując wolne obroty mieszadła, utrzymywano zawiesinę w stanie łagodnego mieszania. Formowanie struktur papieropodobnych zostało przeprowadzone w laboratoryjnym aparacie do formowania krążków papieru o średnicy 20 cm. Stężenie zawiesiny podczas formowania było niewielkie (około 0.3 g/l). W przypadku wytwarzania krążków o różnej masie powierzchniowej (gramaturze) było zachowywane stałe stężenie zawiesiny podczas formowania. Oznacza to, że zwiększając ilość mikrowłókien szklanych wprowadzanych do cylindra formującego aparatu (w celu zwiększenia gramatury) równocześnie zwiększano objętość zawiesiny w cylindrze formującym aparatu. Sito, na którym zachodziło formowanie, było bardzo starannie przemywane po zdjęciu nowowytworzonego krążka, a przed formowaniem następnego [16].

Suszenie struktur włóknistych uformowanych techniką papierniczą z zawiesiny mikrowłókien szklanych wykonywano dwoma metodami. Połowa uformowanych krążków była suszona w suszarce stanowiącej wyposażenie aparatu do formowania

Rapid-Koetha (RK). W suszarce zachodziło znaczne zagęszczenie struktury wskutek docisku wywieranego na arkusiki. Druga część krążków była suszona w suszarce powietrznej przewiewowej (temperatura powietrza 105°C), w której krążki wysychały swobodnie, tworząc pulchne struktury. Dzięki takiemu postępowaniu uzyskano zestawy krążków powstałych z identycznie uformowanych struktur, a zmodyfikowanych przez sam proces suszenia. Miało to na celu umożliwienie przeprowadzenia oceny wpływu gęstości upakowania struktur identycznie uformowanych i z tych samych włókien na ich właściwości filtracyjne.

Po wysuszeniu krążki były poddane starannym oględzinom, wskutek których odrzucono te które wykazywały defekty formowania lub uszkodzenia struktury. Dla pozostałych krążków zostały wykonane oznaczenia gramatury i zrezygnowano z tych, których gramatury odbiegały od wartości założonych. Do dalszych badań przygotowano po pięć krążków dla każdego typu materiału.

Formowanie w laboratorium struktur papieropodobnych z wodnej zawiesiny mikrowłókien szklanych odbywało się w warunkach statycznych, tzn. bez występowania przemieszczania się sita w czasie formowania. Z tego względu badania laboratoryjne mogą mieć raczej charakter orientacyjny, nie pozwalający na bezpośrednie wnioskowanie o efektach formowania w warunkach dynamicznych, a więc z przemieszczaniem się sita formującego, jak to jest w warunkach produkcyjnych. Doświadczenia laboratoryjne umożliwiają jednak skuteczne rozpoznanie tendencji zmian właściwości filtracyjnych, warunkowanych przez jakość mikrowłókien szklanych oraz rodzaj i ilość substancji dodatkowo wprowadzonych do formowania z nich struktur papieropodobnych [16].

W Tabeli 4.2 zestawiono opis zastosowanych symboli włókien filtracyjnych.

Tabela 4.2. Symbole włókien filtracyjnych wykorzystanych w badaniach

Lp.	Symbol	Sposób wykonania włókniny filtracyjnej
1	I PL/60/RK	wykonana z włókna szklanego produkcji polskiej oznaczonego symbolem U-10, o gramaturze 60 g/m ² , suszona w warunkach zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha, z dodatkiem 5% bielonych włókien celulozowych sosnowych
2	I PL/80/RK	wykonana z włókna szklanego produkcji polskiej oznaczonego symbolem U-10, o gramaturze 80 g/m ² , suszona w warunkach zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha, z dodatkiem 5% bielonych włókien celulozowych sosnowych
3	I PL/60/SP	wykonana z włókna szklanego produkcji polskiej oznaczonego symbolem U-10, o gramaturze 60 g/m ² , suszona w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej w temp. 105°C, z dodatkiem 5% bielonych włókien celulozowych sosnowych
4	I PL/80/SP	wykonana z włókna szklanego produkcji polskiej oznaczonego symbolem U-10, o gramaturze 80 g/m ² , suszona w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej w temp. 105°C, z dodatkiem 5% bielonych włókien celulozowych sosnowych
5	I S/60/RK	wykonana z włókna szklanego produkcji szwedzkiej oznaczonego symbolem I.15, o gramaturze 60 g/m ² , suszona w warunkach zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha, z dodatkiem 5% bielonych włókien celulozowych sosnowych

Tabela 4.2. cd.

Lp.	Symbol	Sposób wykonania włókniny filtracyjnej
6	I S/80/RK	wykonana z włókna szklanego produkcji szwedzkiej oznaczonego symbolem 1.15, o gramaturze 80 g/m ² , suszona w warunkach zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha, z dodatkiem 5% bielonych włókien celulozowych sosnowych
7	I S/60/SP	wykonana z włókna szklanego produkcji szwedzkiej oznaczonego symbolem 1.15, o gramaturze 60 g/m ² , suszona w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej w temp. 105°C, z dodatkiem 5% bielonych włókien celulozowych sosnowych
8	I S/80/SP	wykonana z włókna szklanego produkcji szwedzkiej oznaczonego symbolem 1.15, o gramaturze 80 g/m ² , suszona w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej w temp. 105°C, z dodatkiem 5% bielonych włókien celulozowych sosnowych
9	II PL/60/RK	wykonana z włókna szklanego produkcji polskiej oznaczonego symbolem U-10, o gramaturze 60 g/m ² , suszona w warunkach zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha, z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy
10	II PL/80/RK	wykonana z włókna szklanego produkcji polskiej oznaczonego symbolem U-10, o gramaturze 80 g/m ² , suszona w warunkach zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha, z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy
11	II PL/60/SP	wykonana z włókna szklanego produkcji polskiej oznaczonego symbolem U-10, o gramaturze 60 g/m ² , suszona w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej w temp. 105°C, z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy
12	II PL/80/SP	wykonana z włókna szklanego produkcji polskiej oznaczonego symbolem U-10, o gramaturze 80 g/m ² , suszona w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej w temp. 105°C, z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy
13	II S/60/RK	wykonana z włókna szklanego produkcji szwedzkiej oznaczonego symbolem 1.15, o gramaturze 60 g/m ² , suszona w warunkach zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha, z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy
14	II S/80/RK	wykonana z włókna szklanego produkcji szwedzkiej oznaczonego symbolem 1.15, o gramaturze 80 g/m ² , suszona w warunkach zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha, z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy
15	II S/60/SP	wykonana z włókna szklanego produkcji szwedzkiej oznaczonego symbolem 1.15, o gramaturze 60 g/m ² , suszona w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej w temp. 105°C, z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy
16	II S/80/SP	wykonana z włókna szklanego produkcji szwedzkiej oznaczonego symbolem 1.15, o gramaturze 80 g/m ² , suszona w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej w temp. 105°C, z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy
17	III PL/60/RK	wykonana z włókna szklanego produkcji polskiej oznaczonego symbolem U-10, o gramaturze 60 g/m ² , suszona w warunkach zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha, z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy oraz 1% Ipowodu P

Tabela 4.2. cd.

Lp.	Symbol	Sposób wykonania włókniny filtracyjnej
18	III PL/80/RK	wykonana z włókna szklanego produkcji polskiej oznaczonego symbolem U-10, o gramaturze 80 g/m ² , suszona w warunkach zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha, z dodatkiem 2% karboksymetwlocelulozy oraz 1% Ipowodu P
19	III PL/60/SP	wykonana z włókna szklanego produkcji polskiej oznaczonego symbolem U-10, o gramaturze 60 g/m ² , suszona w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej w temp. 105°C, z dodatkiem 2% karboksymetwlocelulozy oraz 1% Ipowodu P
20	III PL/80/SP	wykonana z włókna szklanego produkcji polskiej oznaczonego symbolem U-10, o gramaturze 80 g/m ² , suszona w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej w temp. 105°C, z dodatkiem 2% karboksymetwlocelulozy oraz 1% Ipowodu P
21	III S/60/RK	wykonana z włókna szklanego produkcji szwedzkiej oznaczonego symbolem I.15, o gramaturze 60 g/m ² , suszona w warunkach zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha, z dodatkiem 2% karboksymetwlocelulozy oraz 1% Ipowodu P
22	III S/80/RK	wykonana z włókna szklanego produkcji szwedzkiej oznaczonego symbolem I.15, o gramaturze 80 g/m ² , suszona w warunkach zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha, z dodatkiem 2% karboksymetwlocelulozy oraz 1% Ipowodu P
23	III S/60/SP	wykonana z włókna szklanego produkcji szwedzkiej oznaczonego symbolem I.15, o gramaturze 60 g/m ² , suszona w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej w temp. 105°C, z dodatkiem 2% karboksymetwlocelulozy oraz 1% Ipowodu P
24	III S/80/SP	wykonana z włókna szklanego produkcji szwedzkiej oznaczonego symbolem I.15, o gramaturze 80 g/m ² , suszona w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej w temp. 105°C, z dodatkiem 2% karboksymetwlocelulozy oraz 1% Ipowodu P

4.3. Określenie parametrów strukturalnych włókien filtracyjnych

4.3.1. Metodyka pomiarów parametrów strukturalnych

Dla potrzeb oceny skuteczności filtracji przez włókniny filtracyjne niezbędne było określenie następujących parametrów strukturalnych włókien, a także wykonanych z nich włóknin:

- poprzecznych charakterystycznych wymiarów włókien:
 - ◊ średnic włókien szklanych,
 - ◊ szerokości płaskich włókien celulozowych,
- grubości włókniny filtracyjnej,
- masy próbek materiałów filtracyjnych.

Teorie dotyczące procesu filtracji gazu (powietrza) zakładają, że włókna mają stałą średnicę. W normie PN-72/P-04604 [56] dotyczącej metod rozpoznawania włókien podano, że włókna szklane powinny mieć powierzchnie bez żadnej skazy, brzegi gładkie i równoległe oraz powinny charakteryzować się przekrojem okrągłym. Jednak w praktyce nie jest możliwe wytworzenie włókien o tak jednorodnej budowie,

szczególnie w zakresie tak małych ich średnic. Nawet w przypadku jednoskładnikowych materiałów filtracyjnych, tzn. wykonanych z takiego samego rodzaju włókien, zauważa się duży rozrzut rzeczywistych wielkości ich średnic. Materiały stosowane szczególnie w wysokoskutecznych filtrach powietrza są najczęściej wykonywane z paru (wielu) rodzajów włókien. Stanowią struktury wieloskładnikowe, w których obecność mikrowłókien wpływa na zwiększenie skuteczności filtracji, natomiast włókna o większych średnicach poprawiają wytrzymałość mechaniczną materiału.

Włókniny wykonane dla potrzeb pracy doktorskiej były zarówno jednoskładnikowe, jak i dwuskładnikowe. Niezbędne było zatem określenie wymiarów zastosowanych włókien szklanych i celulozowych będących jednym z czynników wpływających w rezultacie na jednorodność budowy włókniny.

Wyznaczenie charakterystycznych wymiarów poprzecznych włókien szklanych i celulozowych (średnic lub szerokości w przypadku płaskich włókien celulozowych) zostało wykonane z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego BS-300 firmy "TESLA" w 1993 roku na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej [52]. Sposób wykonania pomiarów nie odbiegał od metody zalecanej przez PN-88/P-04768 [62] do stosowania w przypadku określania wymiarów wszystkich włókien, ze szczególnym uwzględnieniem włókien ultracienkich.

Przedmiotem badań były wymiary charakterystyczne włókien znajdujących się w:

- próbce waty szklanej wyprodukowanej przez Zakłady Materiałów Termoizolacyjnych w Gorlicach COBR Przemysłu Izolacji Budowlanej w Katowicach, oznaczonej symbolem U-10 (PL),
- próbce waty szklanej produkcji szwedzkiej oznaczonej symbolem 1.15 (S),
- na powierzchni próbki kartonu wykonanego z bielonych celulozowych włókien sosnowych (papierniczych), dostarczonej przez Instytut Papiernictwa i Maszyn Papierniczych Politechniki Łódzkiej

W każdej próbce waty szklanej włókna zostały poddane kilkakrotnemu ręcznemu mieszaniu. Po wymieszaniu każdej z próbek z co najmniej pięciu różnych miejsc pobrano po 1 pęczku włókien. Pęczki, oddzielnie z każdego rodzaju waty szklanej, były łączone razem, rozluźniane i kilkakrotnie ręcznie mieszane. Po wymieszaniu były wydzielone próbki robocze, z których każda liczyła kilkaset włókien, a następnie zostały one przyklejone do stolików mikroskopowych.

Z kartonu z włókien celulozowych sosnowych zostały wycięte kwadraty 10×10 mm i przyklejone do stolików mikroskopowych za pomocą kleju przewodzącego.

Przygotowane w ten sposób próbki włókien szklanych i kartonu z włókien sosnowych, były umieszczone w napyłarce próżniowej. Po odpompowaniu powietrza i uzyskaniu próżni napyłono na nie cienką warstwę węgla o grubości $15 \div 20$ nm, a następnie warstwą miedzi o podobnej grubości.

Po umieszczeniu próbek włókien szklanych w mikroskopie wykonano 500 pomiarów średnic każdego rodzaju włókien. Po ustawieniu powiększenia 10 000 razy, średnice włókien były zmierzone z dokładnością do $0.1 \mu\text{m}$ [52].

Dla próbek kartonu filtracyjnego z włókien sosnowych wykonano 500 pomiarów ich szerokości. Ze względu na specyficzny charakter włókien sosnowych, przypominających płaskie tasiemki o nieregularnych, zaokrąglonych i pogrubionych brzegach, nie zostały zmierzone ich wysokości.

Badana próbka była umieszczana w mikroskopie i po ustawieniu powiększenia 1000 razy, z ekranu mikroskopowego szerokość włókien została zmierzona z dokładnością do 1 μm .

Zostały wykonane mikrostrukturalne fotografie wszystkich badanych próbek w powiększeniach 500, 1000 i 2500 razy (Załącznik 3).

Wśród norm polskich dotyczących filtrów powietrza istnieje norma, której przedmiotem jest oznaczenie parametrów charakterystycznych tkaniny filtracyjnej (PN-74/M-52052 [57]), tj. średniego charakterystycznego wymiaru włókien, średniej grubości oraz porowatości kinetycznej.

Normę tę zaleca się stosować do tkanin o jednym układzie osnowa-wątek i jednolitej strukturze, np. do tkanin szklanych, syntetycznych oraz bawełnianych gładkich o grubości większej niż 0.25 mm. Norma ta opisuje metodę pomiaru średnicy włókien, z której w późniejszym okresie wytworzy się włókninę oraz podaje zalecaną aparaturę. Nie dotyczy ona materiałów o bardzo skomplikowanej, słabo zorganizowanej budowie, czyli takiej jaką posiadają włókniny wykonane dla potrzeb niniejszej pracy. Niemniej jednak zaleca określenie średniego charakterystycznego wymiaru włókien z wykorzystaniem mikroskopu zaopatrzonego w ekran lub okular ze skalą oraz zaleca zmierzenie losowo grubości co najmniej 100 pasm przędzy. Średni charakterystyczny wymiar włókien (np. średnicę, grubość) zgodnie z tą normą oblicza się jako średnią arytmetyczną.

Podsumowując należy stwierdzić, że wymagania normy dotyczące aparatury i metody obliczania wartości średniej zostały zachowane, a zwiększenie ilości wykonanych pomiarów tylko polepszyło dokładność określenia wymiaru charakterystycznego badanych włókien.

W przypadku próbki papieru celulozowego sosnowego ze względów technicznych nie było możliwe zastosowanie się do wymagań normy mówiących, że powierzchnia próbki powinna wynosić $16\pm 64\text{ cm}^2$. Inne zalecenia zostały zachowane.

Grubość oraz masa próbek włókien filtracyjnych zostały określone w Laboratorium Wojskowego Instytutu Chemii i Radiometrii w Rembertowie w 1993 roku. Grubość została zmierzona w pięciu różnych losowo wybranych miejscach za pomocą grubościomierza powierzchni płaskich VEB WERKSTOFFPRUFMASCHINEN (prod. NRD) o zakresie pomiarowym $0\text{--}10.0\text{ mm}$, powierzchni stopki pomiarowej $10\pm 0.2\text{ cm}^2$, dokładności odczytu 0.01 mm przy nacisku 54 Pa. Metodyka wykonania pomiaru była zgodna z PN-74/M-52052 [57] oraz PN-81/P-04612 [59]. Z tym, że nie było możliwe zachowanie wymaganej powierzchni próbki wynoszącej co najmniej 0.5 m^2 , ponieważ otrzymany w laboratoryjnym aparacie do formowania krążek papieru filtracyjnego miał średnicę 0.2 m (powierzchnia wynosiła 0.0314 m^2). Grubość materiałów określono jako średnią arytmetyczną z 5 pomiarów.

Próbki zostały zważone na wadze analitycznej model WA-33 o dokładności 0.05 mg. Norma PN-EN 29073-1: 1994 [67] omawiająca warunki wyznaczania masy powierzchniowej włóknin zaleca stosować wagę o dokładności do $\pm 0.1\%$ masy próbki. Takie same wymagania znajdują się w normie PN-ISO 536: 1996 [69] dotyczącej oznaczania gramatury w przypadku papieru i tektury. Podczas przeprowadzanych badań najlżejsza próbka ważyła 0.1703 g. W przypadku tej próbki 0.1% jej masy wynosiła 0.00017 g. Ponieważ pomiar wykonano z dokładnością do 0.00005 g, w rzeczywistości zważono ją z dokładnością większą od zalecanej przez obie wymienione normy. W przypadku pozostałych pomiarów masy cięższych próbek dokładność była jeszcze większa od zalecanej. Natomiast nie została dotrzymana wymagana powierzchnia próbki wynosząca według normy 50 000 mm². Wielkość ważonych próbek była dopasowana do uchwytu pomiarowego stanowiska badawczego. Miały zatem średnicę wynoszącą 64 mm (powierzchnia 3215 mm²). Dodatkowo polepszone dokładność wykonywania pomiarów masy przez zwiększenie ilości próbek z 3 zalecanych przez normę do 5, bo dla tylu próbek wykonywano wszystkie pomiary przeprowadzane w ramach pracy doktorskiej.

4.3.2. Ocena parametrów strukturalnych włókien

Określając poniżej średnie wielkości wymiarów charakterystycznych włókien (średnica włókien szklanych i szerokość włókien celulozowych), jako ich średnie arytmetyczne wartości, oparto się na zaleceniach zawartych w omówionej wcześniej normie dotyczącej materiałów filtracyjnych PN-74/M-52052 [57].

Również w normie PN-88/P-04768 [62] dotyczącej wyznaczania średniej średnicy włókien szklanych zaleca się określanie jej jako średniej arytmetycznej ze wszystkich wykonanych pomiarów.

W przypadku zastosowanych w pracy włóknin wykonanych z włókien szklanych oraz włókien celulozowych, ocenę statystyczną ich wymiarów przeprowadzono, na podstawie wyników pomiaru ich średnic pod mikroskopem elektronowym, który przeprowadzono przed wykonaniem materiałów filtracyjnych, jak dla materiału jednorodnego (serie włóknin wykonane jedynie z włókien szklanych, oznaczone symbolami II i III) określając wartość średnią arytmetyczną. Natomiast zastępczą średnicę włókien dla materiału dwuskładnikowego (włókniny z włókien szklanych z 5% dodatkiem włókien celulozowych, oznaczone symbolem I) określono na podstawie znanych udziałów poszczególnych rodzajów włókien w wytworzonym z nich materiale jako średnią ważoną. Wyniki analizy statystycznej włókien zamieszczono w Tabeli 4.3.

Mimo, że badania wykonywane przez Wenera i Clarenburga (1965) oraz Farrowa (1966) [12], [33] wykazały, że średnice włókien stosowanych do wytwarzania filtrów włóknistych mogą mieć rozkład o charakterze logarytmiczno-normalnym, w niniejszej pracy postanowiono oprzeć dalsze rozważania o metodę ich określania zawartą w PN-74/M-52052 [57]. Dla porównania zamieszczono jednak w Tabeli 4.4 wartości średnie średnic i szerokości włókien uzyskane na podstawie aproksymacji rozkładem logarytmiczno-normalnym. Rozkłady te przedstawiono na Rysunkach 4.1,

4.2 i 4.3. Można zauważyć, że faktycznie rozkład logarytmiczno-normalny dobrze przybliża wartości rzeczywiste wymiarów włókien. Jednak wartości średnie określone jako średnie arytmetyczne i z rozkładu logarytmiczno-normalnego niewiele różnią się od siebie. Przyjęcie do dalszych analiz wartości średnich arytmetycznych nie powinno spowodować dużych błędów obliczeniowych w porównaniu z zastosowaniem zamiast nich wartości z rozkładu log-normalnego sugerowanych w [12], [33].

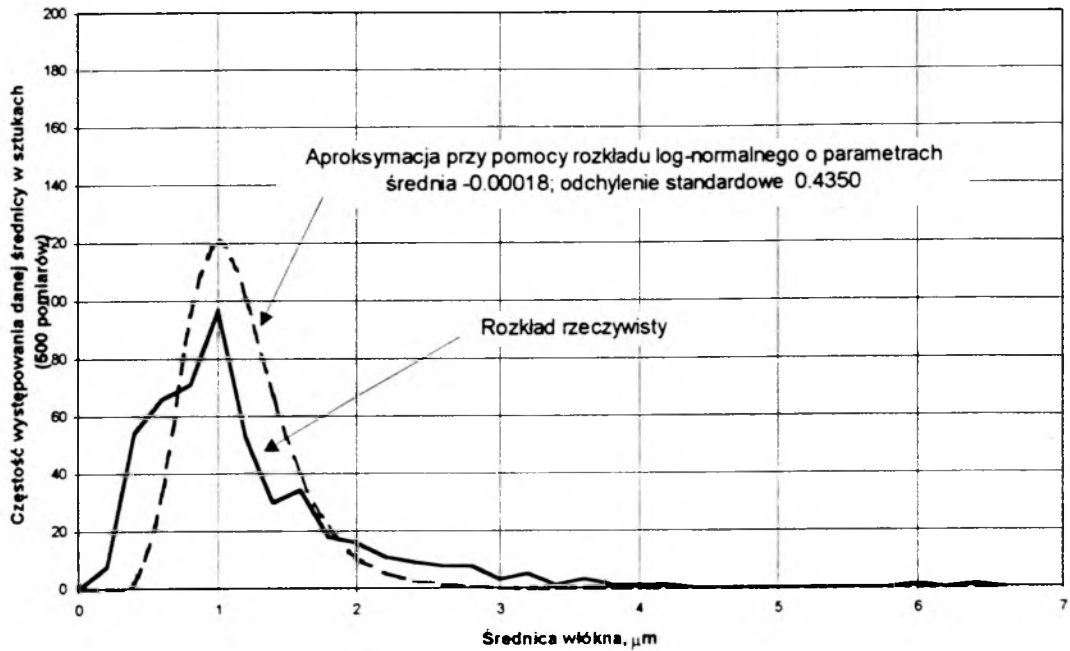
Poniżej średnią średnicę lub szerokość włókien oznaczono przez d_w , natomiast ich wielkość rzeczywistą przez d_{wr} .

Tabela 4.3. Analiza statystyczna wymiarów charakterystycznych włókien określonych jako średnie arytmetyczne

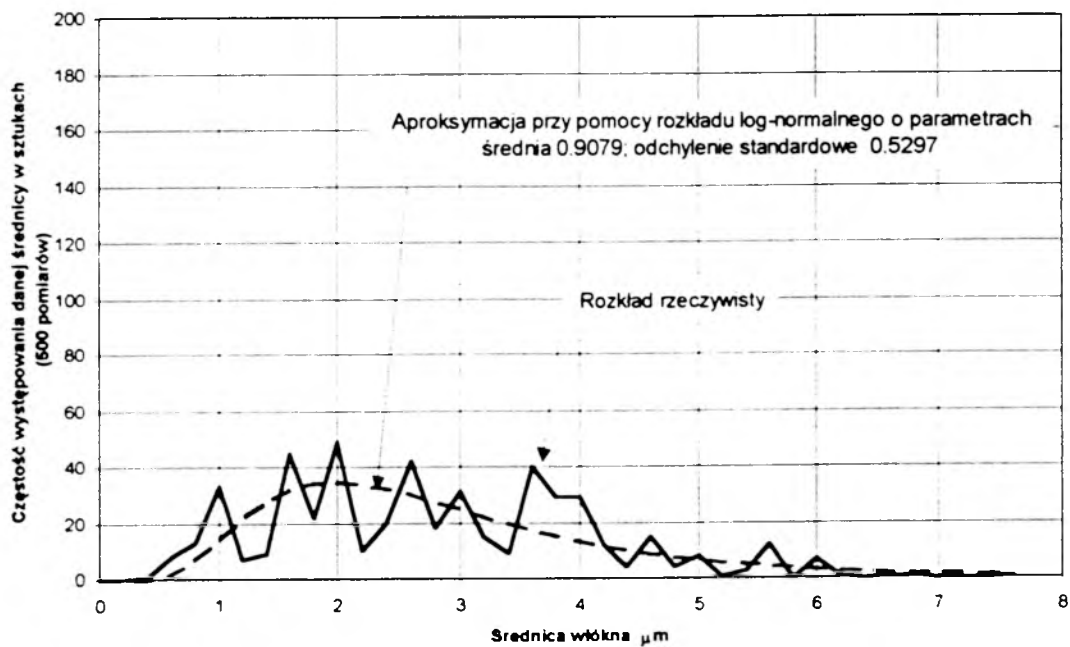
Parametry rozkładu prawdopodobieństwa	Jedn.	Włókno szklane polskie (PL)	Włókno szklane szwedzkie (S)	Włókno celulozowe sosnowe
Wartość średnia d_w	μm	1.142	2.7698	29.522
Błąd standardowy	μm	0.034132	0.058725	0.404686
Mediana	μm	1.0	2.6	28
Moda	μm	1.0	2	25
Odchylenie standardowe	μm	0.763204	1.313132	9.049049
Wartość minimalna $d_{w\min}$	μm	0.2	0.3	10
Wartość maksymalna $d_{w\max}$	μm	6.4	7.5	70
Liczność próbki	szk.	500	500	500
Przedział ufności (95%)	μm	± 0.066896	± 0.115099	± 0.793168

Tabela 4.4. Porównanie wartości średnich charakterystycznych wielkości określanych jako średnie arytmetyczne i z aproksymacji rozkładem log-normalnym

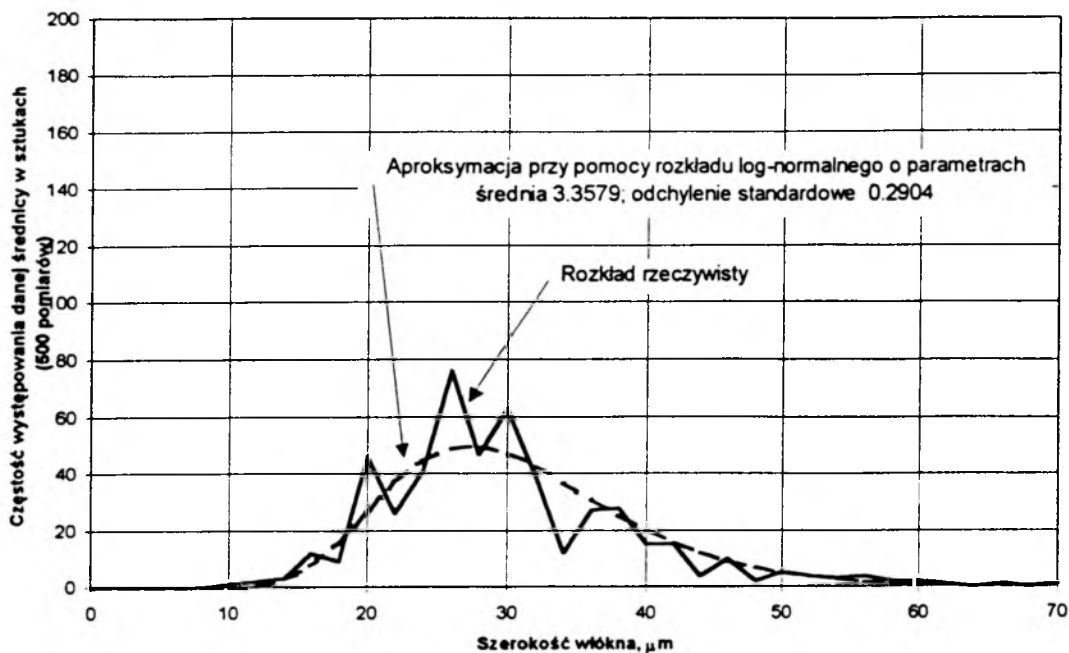
	Wielkość charakterystyczna	Średnie arytmetyczne wartości, μm	Wartości z rozkładu log-normalnego, μm
Włókno szklane polskie	średnica	1.142	0.999
Włókno szklane szwedzkie	średnica	2.7698	2.479
Włókno celulozowe	szerokość	29.522	28.728



Rysunek 4.1. Rozkład rzeczywisty i logarytmiczno-normalny średnic włókien szklanych polskich (PL)

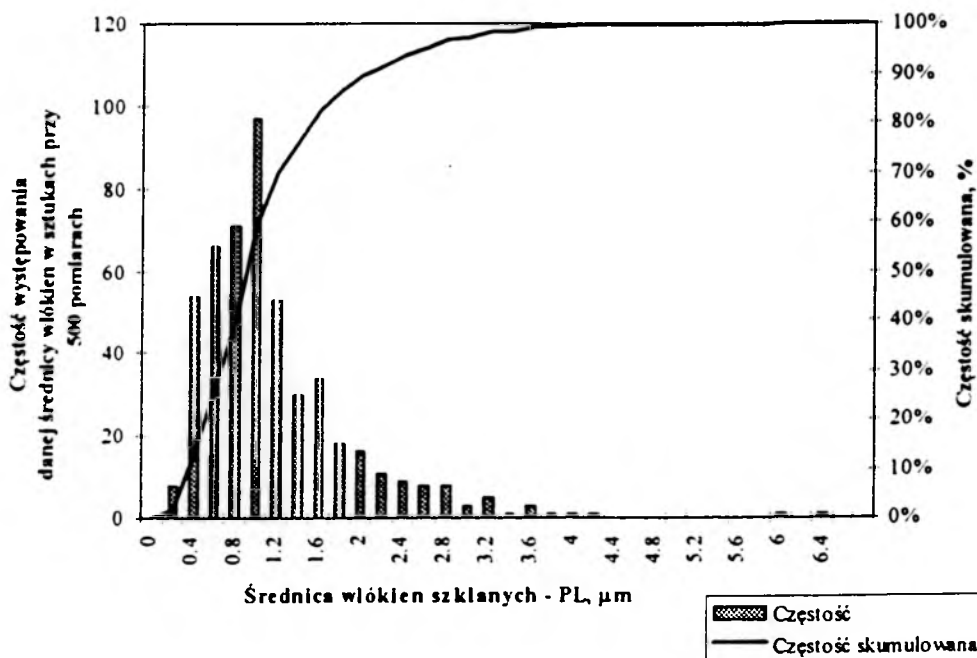


Rysunek 4.2. Rozkład rzeczywisty i logarytmiczno-normalny średnic włókien szklanych szwedzkich (S)

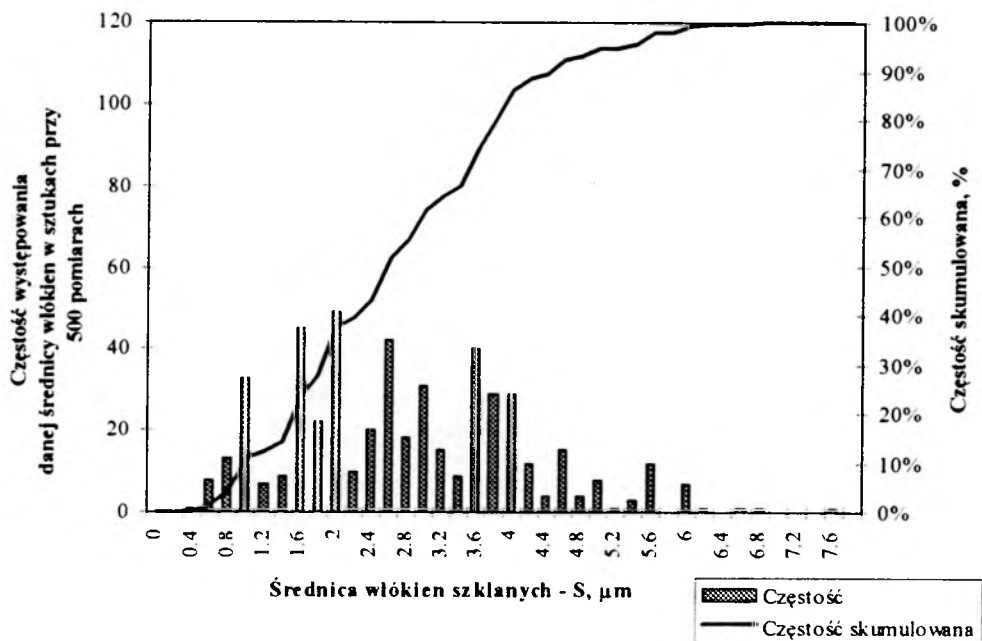


Rysunek 4.3. Rozkład rzeczywisty i logarymiczno-normalny szerokości włókien celulozowych sosnowych

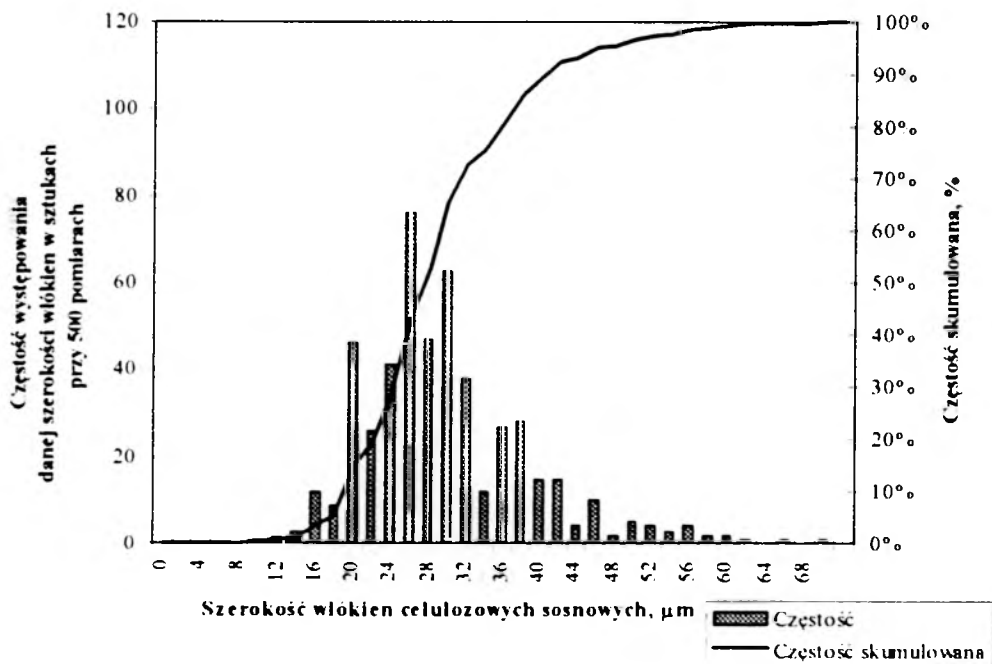
Na Rysunkach 4.4, 4.5 oraz 4.6 przedstawiono rzeczywiste rozkłady częstości skumulowanej oraz częstości występowania danej wielkości charakteryzującej omawiane włókna.



Rysunek 4.4. Rozkład częstości skumulowanej oraz częstości występowania danej wielkości średnicy włókna szklanego polskiego (PL)



Rysunek 4.5. Rozkład częstości skumulowanej oraz częstości występowania danej wielkości średnicy włókna szklanego szwedzkiego (S)



Rysunek 4.6. Rozkład częstości skumulowanej oraz częstości występowania danej wielkości szerokości włókna celulozowego sosnowego

Wśród badanych włókien szklanych produkcji polskiej najliczniej występowały włókna w przedziałach wymiarowych $0,4 \leq d_{w\text{rz}} < 0,8 \mu\text{m}$ (27,4%) i $0,8 \leq d_{w\text{rz}} < 1,2 \mu\text{m}$ (30,0%). Przeważająca większość włókien miała średnice do $2 \mu\text{m}$ (89,4% wszystkich włókien). W przypadku włókien szwedzkich nie było tak wyraźnie wyodrębnionych przedziałów wymiarowych o zdecydowanej większości występowania danych średnic włókien, był bowiem duży rozrzut częstości występowania średnic. Występują cztery

przedziały zawierające ponad 10% zmierzonych średnic włókien: $1.2 \leq d_{w, rz} < 1.6 \mu\text{m}$ (10.8%), $1.6 \leq d_{w, rz} < 2.0 \mu\text{m}$ (14.2%), $2.4 \leq d_{w, rz} < 2.8 \mu\text{m}$ (12%), $3.6 \leq d_{w, rz} < 4.0 \mu\text{m}$ (11.6%). Znaczna część włókien miała wymiary mniejsze od $4.0 \mu\text{m}$ (86.2% włókien), a włókien o średnicach do $2.0 \mu\text{m}$ (najliczniej występujących wśród włókien polskich) było 37.6%. Włókna szklane polskie miały zdecydowanie bardziej jednorodną strukturę niż włókna szwedzkie.

Najcieńsze włókno wśród włókien polskich miało średnicę $0.2 \mu\text{m}$, natomiast wśród włókien szwedzkich $0.3 \mu\text{m}$. Najwięcej włókien najcieńszych o średnicach do $0.4 \mu\text{m}$ występowało wśród włókien polskich (12.4%), natomiast wśród włókien szwedzkich takie włókna praktycznie nie było (0.2% przebadanych włókien, czyli 1 z 500 pomierzonych włókien miało taką średnicę). Najgrubsze włókno produkcji polskiej miało średnicę $6.4 \mu\text{m}$, a produkcji szwedzkiej $7.5 \mu\text{m}$. Uwzględniając częstość występowania włókien w krańcowych przedziałach średnic, po odrzuceniu pojedynczych włókien stanowiących 1% lub mniej wszystkich włókien, praktycznie średnice najgrubszych włókien szklanych polskich nie przekraczały $3.5 \mu\text{m}$, a włókien szwedzkich $5.4 \mu\text{m}$.

Jak stwierdzono wcześniej, w przypadku włókien celulozowych określona została ich szerokość, a nie średnica. Z powodu ich specyficznej wstążkowej (płaskiej) budowy o zaokrąglonych, wyższych brzegach właśnie ten wymiar przyjęto jako wymiar charakterystyczny.

Wśród włókien celulozowych zaobserwowano trzy przedziały wymiarowe o częstości występowania danych szerokości przekraczającej 20%. Były to następujące przedziały: $20 \leq d_{w, rz} < 25 \mu\text{m}$ (20.8%), $25 \leq d_{w, rz} < 30 \mu\text{m}$ (26.8%), $30 \leq d_{w, rz} < 35 \mu\text{m}$ (20.4%). Przeważająca większość włókien (91.8%) miała szerokość wynoszącą od $15 \mu\text{m}$ do $45 \mu\text{m}$. Najcieńsze przebadane włókno miało szerokość $10 \mu\text{m}$, najgrubsze $70 \mu\text{m}$. Po odrzuceniu szerokości, które występowały rzadziej niż wśród 1% przebadanych włókien, można przyjąć, że najcieńsze włókna miały wielkość $14 \mu\text{m}$ (1.4%), najgrubsze zaś $44 \mu\text{m}$ (1.8%).

4.3.3. Zestawienie parametrów strukturalnych włókien filtracyjnych

W przytoczonych poniżej Tabelach 4.5÷4.10 zestawiono następujące parametry strukturalne badanych włókien filtracyjnych:

- średnią średnicę włókien d_w , μm
- grubość włókniny filtracyjnej H , mm
- gęstość włókien ρ_w , kg/m^3
- masę powierzchniową włókniny (gramaturę) M_p , kg/m^2
- gęstość upakowania włókniny α , -

Wielkości parametrów strukturalnych, takich jak średnica włókien i grubość włókniny filtracyjnej, zostały określone w wyniku przeprowadzenia pomiarów (Rozdział 4.3). Wartość gęstości włókien podano opierając się na informacjach uzyskanych od

producenta. Dwa pozostałe parametry określono w oparciu o zależności matematyczne.

Zgodnie z PN-EN 29073-1: 1994 [67] oraz PN-ISO 536: 1996 [69] przy określeniu masy powierzchniowej (gramatury) próbek oznacza się powierzchnię i masy badanych próbek, a gramaturę wylicza się według podanego poniżej wzoru:

$$M_p = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2} \quad (4.1)$$

Natomiast gęstość upakowania określa według zależności [11]:

$$\alpha = \frac{M_p}{H \cdot \rho_w} \quad (4.2)$$

gdzie:

D średnica próbki włókniny filtracyjnej, m, D=0.064 m, (średnica robocza 0.062 m)

H grubość włókniny filtracyjnej, m

M masa próbki włókniny o średnicy D, kg

M_p masa powierzchniowa włókniny (gramatura), kg/m^2

α gęstość upakowania włókniny, -

ρ_w gęstość włókien, kg/m^3

Tabela 4.5. Parametry strukturalne włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych polskich (PL), oznaczonych symbolem I (tj. z dodatkiem 5% włókien celulozowych sosnowych)

Parametry strukturalne włókniny	Jedn.	I PL/60/SP	I PL/60/RK	I PL/80/SP	I PL/80/RK
Średnica włókien	μm	2.561	2.561	2.561	2.561
Grubość włókniny	mm	0.448	0.39	0.612	0.6
Gęstość włókien	kg/m^3	2250	2250	2250	2250
Masa pow. włókniny	kg/m^2	0.060858	0.060696	0.080752	0.079117
Gęstość upakowania włókniny	-	0.0604	0.0692	0.0586	0.0586

Tabela 4.6. Parametry strukturalne włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych szwedzkich (S), oznaczonych symbolem I (tj. z dodatkiem 5% włókien celulozowych sosnowych)

Parametry strukturalne włókniny	Jedn.	I S/60/SP	I S/60/RK	I S/80/SP	I S/80/RK
Średnica włókien	μm	4.107	4.107	4.107	4.107
Grubość włókniny	mm	0.402	0.378	0.488	0.454
Gęstość włókien	kg/m^3	2250	2250	2250	2250
Masa pow. włókniny	kg/m^2	0.061318	0.059279	0.076786	0.082736
Gęstość upakowania włókniny	-	0.0678	0.0697	0.0699	0.081

Tabela 4.7. Parametry strukturalne włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych polskich (PL), oznaczonych symbolem II (tj. z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy)

Parametry strukturalne włókniny	Jedn.	II PL/60/SP	II PL/60/RK	II PL/80/SP	II PL/80/RK
Srednica włókien	µm	1.142	1.142	1.142	1.142
Grubość włókniny	mm	0.418	0.4	0.534	0.518
Gęstość włókien	kg/m ³	2290	2290	2290	2290
Masa pow. włókniny	kg/m ²	0.060168	0.058446	0.074678	0.077234
Gęstość upakowania włókniny	-	0.0629	0.0638	0.0611	0.0651

Tabela 4.8. Parametry strukturalne włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych szwedzkich (S), oznaczonych symbolem II (tj. z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy)

Parametry strukturalne włókniny	Jedn.	II S/60/SP	II S/60/RK	II S/80/SP	II S/80/RK
Srednica włókien	µm	2.7698	2.7698	2.7698	2.7698
Grubość włókniny	mm	0.382	0.346	0.522	0.5
Gęstość włókien	kg/m ³	2290	2290	2290	2290
Masa pow. włókniny	kg/m ²	0.056226	0.056295	0.077545	0.087703
Gęstość upakowania włókniny	-	0.0643	0.071	0.0649	0.0766

Tabela 4.9. Parametry strukturalne włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych polskich (PL), oznaczonych symbolem III (tj. z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy i 1% Ipowodu P)

Parametry strukturalne włókniny	Jedn.	III PL/60/SP	III PL/60/RK	III PL/80/SP	III PL/80/RK
Srednica włókien	µm	1.142	1.142	1.142	1.142
Grubość włókniny	mm	0.462	0.382	0.582	0.586
Gęstość włókien	kg/m ³	2290	2290	2290	2290
Masa pow. włókniny	kg/m ²	0.058458	0.057557	0.075804	0.082512
Gęstość upakowania włókniny	-	0.0553	0.0658	0.0569	0.0615

Tabela 4.10. Parametry strukturalne włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych szwedzkich (S), oznaczonych symbolem III (tj. z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy i 1% Ipowodu P)

Parametry strukturalne włókniny	Jedn.	III S/60/SP	III S/60/RK	III S/80/SP	III S/80/RK
Srednica włókien	µm	2.7698	2.7698	2.7698	2.7698
Grubość włókniny	mm	0.414	0.356	0.532	0.588
Gęstość włókien	kg/m ³	2290	2290	2290	2290
Masa pow. włókniny	kg/m ²	0.060299	0.058427	0.081188	0.069985
Gęstość upakowania	-	0.0636	0.0717	0.0666	0.052

4.4. Określenie przedziałowej skuteczności filtracji

4.4.1. Stanowisko badawcze i metodyka pomiarowa

4.4.1.1. Wybór metodyki pomiarowej

Podjętym w pracy zamierzeniem była ocena numerycznej przedziałowej skuteczności filtracji drobnych i bardzo drobnych ziaren o wymiarach do 1 μm . W tym celu wykorzystano wykonane metodą papierniczą włókniny filtracyjne z cienkich i ultracienkich włókien szklanych. Określenie wskaźników filtracyjnych takich materiałów należało przeprowadzić na stanowisku pomiarowym przewidzianym do badań wysokoskutecznych materiałów filtracyjnych, stosując właściwy aerozol testowy. Na Rysunku 1.4 w Rozdziale 1 przedstawiono charakterystyki najczęściej stosowanych aerozoli testowych. Odpowiednie dla zamierzonych pomiarów aerozole testowe to aerozol chlorku sodu i mgła olejowa. W badaniach zastosowano obydwie te aerozole testowe wykorzystując otrzymane wyniki do analizy probabilistycznej skuteczności numerycznej (test chlorku sodu) i do porównania jakości materiałów filtracyjnych (strata ciśnienia i całkowita skuteczność określana testem mgły olejowej). Została także określona strata ciśnienia przy przepływie czystego powietrza wykorzystana podczas analizy przydatności istniejących modeli teoretycznych procesu filtracji.

4.4.1.2. Przeprowadzanie testu chlorku sodu według norm

W Polsce brak jest normy opisującej metodykę i aparaturę służącą do przeprowadzenia testem aerozolu chlorku sodu badań filtrów wysokoskutecznych, przeznaczonych dla potrzeb wentylacji i klimatyzacji. Taka metoda opracowana początkowo w Wielkiej Brytanii (BS 3928:1969 - Sodium Flame Test) [38] została przyjęta przez EUROVENT (EUROVENT - The European Committee of the Construction of Air Handling Equipment) jako obowiązująca i opisana w dokumencie EUROVENT 4/4 [19]. Przedstawione jest tam zarówno stanowisko badawcze, jak i sposób przeprowadzania pomiarów. Zgodnie z tą normą aerozol testowy otrzymuje się z 2% roztworu chlorku sodu. Po jego odparowaniu przed filtrem jest już właściwie suchy aerozol o cząstkach chlorku sodu o średnicach w zakresie od 0.02 do 2 μm . Przeciętna średnica cząstek wynosi 0.6 μm [38]. Stężenie aerozolu w pobieranych próbkach określa się za pomocą pomiarów spektrometrycznych. Cząsteczka NaCl pobudzona płomieniem wodorowym w komorze fotometru emituje błysk żółtego światła o długości fali 589 nm [47]. Zmiana zabarwienia płomienia, wywołana obecnością chlorku sodu, powoduje naruszenie równowagi i wychylenie się wskaźnika mikroamperomierza. Odczytując jego wskazania określa się stężenie chlorku sodu przed i za filtrem, a następnie na tej podstawie oblicza się skuteczność filtracji. W wyniku pomiarów przeprowadzanych zgodnie z [19] nie uzyskuje się jednak wartości numerycznej przedziałowej skuteczności filtracji, a jedynie wartości średniej skuteczności filtracji (lub przeskoku).

W Polsce w dwóch normach (PN-87/Z-02010/15 [61] i PN-EN 143: 1996 [66]) obowiązujących podczas badania filtrów wykorzystywanych w sprzęcie indywidualnej ochrony dróg oddechowych i, wobec tego, nie dotyczących materiałów filtracyjnych dla klimatyzacji, jest opisana metodyka wyznaczania wskaźnika filtracji metodą chlorku sodu. Według obu norm stałe cząstki chlorku sodu wytwarza się w generatorze Collisona przez zdyspergowanie 1% wodnego roztworu NaCl sprężonym powietrzem i odparowanie wody z powstałych cząstek ciekłych. Aerosol uzyskany tą metodą ma charakter poldispersyjny ze średnią średnicą cząstek około 0.6 μm .

Aerosol z cząstkami chlorku sodu jest spalany w płomieniu wodorowym. Intensywność żółtej barwy produktów spalania określona przed i za badanym obiektem umożliwia określenie wskaźnika filtracji. Według normy PN-EN 143 [66] do analizy stężeń NaCl można użyć dowolnego przyrządu o odpowiedniej czułości lub specjalnego fotometru z płomieniem wodorowym przeznaczonego wyłącznie do tego celu. Stężenie cząstek, które przejdą przez filtr określa się w mg/m^3 .

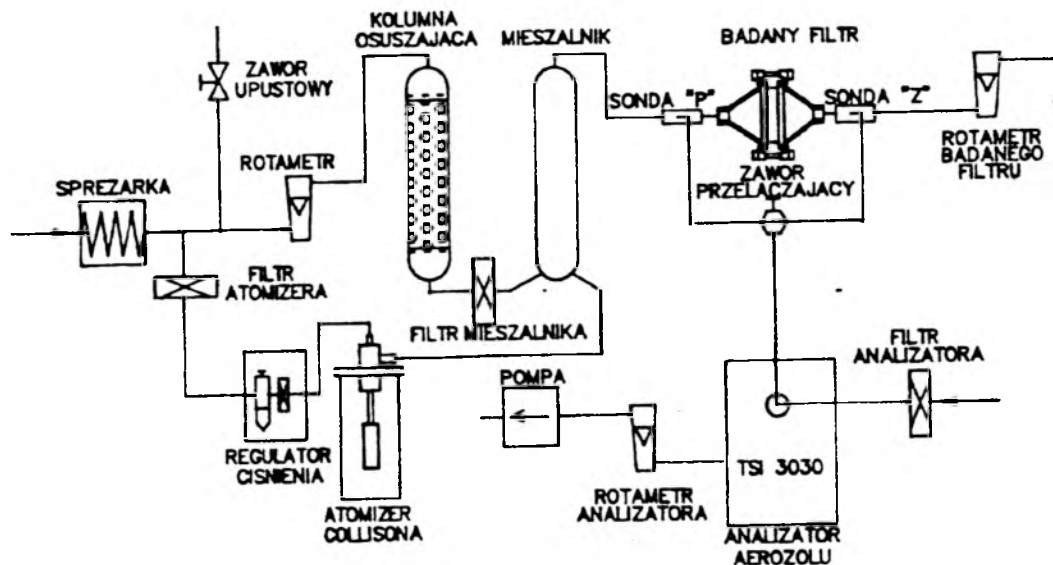
Norma [61] nie podaje wymiarów cząstek aerozolu stosowanego do pomiarów. Natomiast w normie [66] zamieszczony został wykres przedstawiający rozkład wymiarowy cząstek testowego aerozolu chlorku sodu (Rysunek 4.9). Na jego podstawie można stwierdzić, że zalecane wymiary cząstek zawierają się w zakresie 0.04÷1.0 μm . Są to zatem wymiary cząstek, dla jakich powinny zostać wykonane pomiary przewidziane w pracy doktorskiej.

4.4.1.3. Zastosowana metodyka pomiarów

Dla potrzeb niniejszej pracy wartości numerycznej przedziałowej skuteczności filtracji aerozolu testowego (NaCl) zostały określone podczas badań wykonanych na istniejącym stanowisku pomiarowym w Wojskowym Instytucie Chemii i Radiometrii w Rembertowie w latach 1993 i 1994. Stanowisko to było wykorzystywane do badań włóknin filtracyjnych przeznaczonych dla potrzeb klimatyzacji oraz do sprzętu indywidualnej ochrony dróg oddechowych. Skorzystanie z tego stanowiska badawczego oraz ze stosowanej tam metodyki pomiarów stanowiło jedyną dostępną autorce możliwość wykonania pomiarów skuteczności filtracji, przy uwzględnieniu frakcji pyłu o wymiarach ziaren mniejszych od 1 μm .

Pomiary wskaźnika filtracji określanego podczas przepływu aerozolu testowego chlorku sodu przeprowadzono na stanowisku przedstawionym na Rysunku 4.7 [50].

Do określenia wskaźników filtracyjnych wyznaczanych metodą chlorku sodu zastosowano elektrostatyczny klasyfikator aerozoli TSI 3030 pozwalający na oznaczenie średnic różnych rodzajów aerozoli w zakresie od 0.0032 do 1 μm . Pracuje on na zasadzie pomiaru prądu jonowego naładowanych cząstek aerozolu, przepływających w zmieniającym się, według założonego programu, polu elektrycznym [49], [50].



Rysunek 4.7. Schemat stanowiska do pomiaru wskaźników filtracji testem aerozolu chlorku sodu [50]

Aerozol testowy był generowany przy pomocy atomizera Collisona z 1% wodnego roztworu chlorku sodu. Kropelki przygotowanego roztworu były wdmuchiwane do kolumny mieszania, w której, w wyniku zmieszania z powietrzem osuszonym w kolumnie z sitami molekularnymi, zachodziło odparowanie wody. Osuszony aerozol był kierowany na uchwyt pomiarowy z badaną próbką materiału filtracyjnego. Przed rozpoczęciem pomiarów ustalono parametry pracy układu wytwarzania aerozolu tak, aby stężenie aerozolu było bliskie górnej granicy zakresu pomiarowego, ale jej nie przekraczało. Przy pomocy sond przełączanych zaworami, próbki aerozolu zasysano do miernika TSI 3030, który umożliwił wykonanie analizy wymiarowej cząstek aerozolu w zakresie 10 kanałów wymiarowych o przedstawionych w Tabeli 4.11 geometrycznych średnicach zastępczych. Czas pomiaru wynosił 1 minutę.

Na podstawie wartości napięcia podawanego przez licznik dla poszczególnych kanałów odpowiadających założonej wartości napięcia kolektorowego, obliczone zostały stężenia ilościowe (liczbowe), powierzchniowe i objętościowe cząstek o danych średnicach "przed" i "za" badaną próbką, a następnie przy pomocy programu komputerowego określono przedziałowe oraz całkowite wskaźniki filtracji aerozolu testowego dla badanej próbki: współczynnik skuteczności oraz współczynnik przeskoku [49], [50].

Zastosowane jednostki miary stężenia cząstek aerozolu (odniesione do jednostkowego strumienia objętościowego przepływającego aerozolu) oparte zostały na trzech systemach ich określania, stosowanych często w praktyce filtracji powietrza [47]:

- system numeryczny (liczbowy, ilościowy) - ziarna pyłu są zliczane, przy czym średnica ziarna wzrasta liniowo w rozkładzie frakcyjnym pyłów wzorcowych, do określenia średnicy stosowane są metody konimetryczne, zliczanie odbywa się przy pomocy mikroskopów lub metodą rozproszenia światła,

- system aerometryczny (powierzchniowy) - pomiarowi podlegają powierzchnie cienia rzucanego przez ziarno,
- system wolumetryczny (objętościowy) - stosowany w przypadku ziaren jednorodnych pod względem gęstości, pomiar polega z zasady na oznaczeniu masy pyłu zatrzymanego na filtrach pomiarowych, dlatego w praktyce stężenia podawane w tym systemie noszą nazwę masowych lub grawimetrycznych.

Pierwszy z wymienionych sposobów określania stężenia został uzyskany z pomiarów licznikiem cząstek znajdujących się "przed" i "za" badaną próbką. Dwa następne - to wynik przeliczeń uzyskany przy pomocy wspomnianego wcześniej programu komputerowego (wydruki komputerowe znajdują się w archiwum pracy).

Określane przy użyciu licznika ziaren wymiary ziaren zostały przedstawione jako ich geometryczne średnice zastępcze.

Geometryczna średnica zastępcza dla kanałów wymiarowych została obliczona ze wzoru [40]:

$$d_g = \sqrt{d_1 \cdot d_2} \quad (4.3)$$

gdzie:

d_g geometryczna średnica zastępcza ziaren, μm

d_1 dolna granica kanału wymiarowego średnic ziaren, μm

d_2 górna granica kanału wymiarowego średnic ziaren, μm

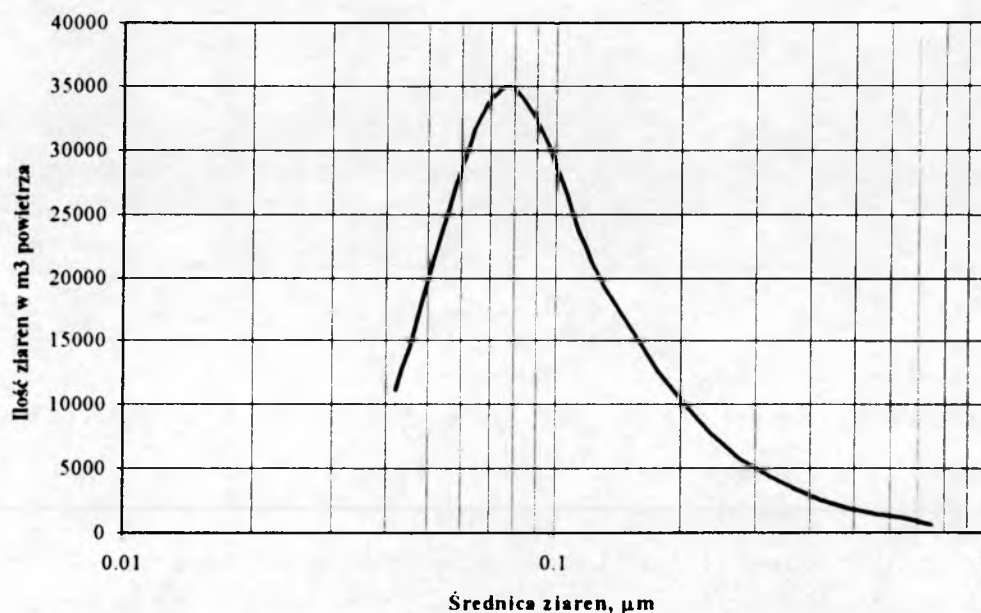
Tabela 4.11. Kanały wymiarowe cząstek stosowane podczas pomiarów wskaźników filtracji metodą chlorku sodu przy pomocy miernika TSI 3030

Lp.	Kanały wymiarowe, μm	Geometryczna średnica zastępcza cząstek, μm
1	0.0032 ÷ 0.0056	0.0042
2	0.0056 ÷ 0.01	0.0075
3	0.01 ÷ 0.0178	0.0133
4	0.0178 ÷ 0.0316	0.0237
5	0.0316 ÷ 0.0562	0.0422
6	0.0562 ÷ 0.1	0.0750
7	0.1 ÷ 0.178	0.1330
8	0.178 ÷ 0.316	0.2370
9	0.316 ÷ 0.562	0.4220
10	0.562 ÷ 1.0	0.750

Podczas analizowania otrzymanych wyników pomiarów wskaźników filtracji pominięto cztery pierwsze kanały wymiarowe, ponieważ minimalne wymiary średnic cząstek zastosowanego aerozolu chlorku sodu wynoszą około 0.04 μm i są rozpoznawalne przez miernik dopiero w piątym kanale pomiarowym.

Dla każdego rodzaju włókniny filtracyjnej wykonano 5 pomiarów wskaźników filtracyjnych przy prędkości napływu aerozolu testowego $u=0.03$ m/s. Do badań wykorzystano wycięte z włókniny próbki o średnicy czynnej (roboczej) 62 mm (średnica rzeczywista próbek wynosiła 64 mm).

Na Rysunku 4.8 przedstawiono średni (określony na podstawie wszystkich pomiarów) numeryczny rozkład frakcyjny aerozolu testowego chlorku sodu przed badanymi włókninami.

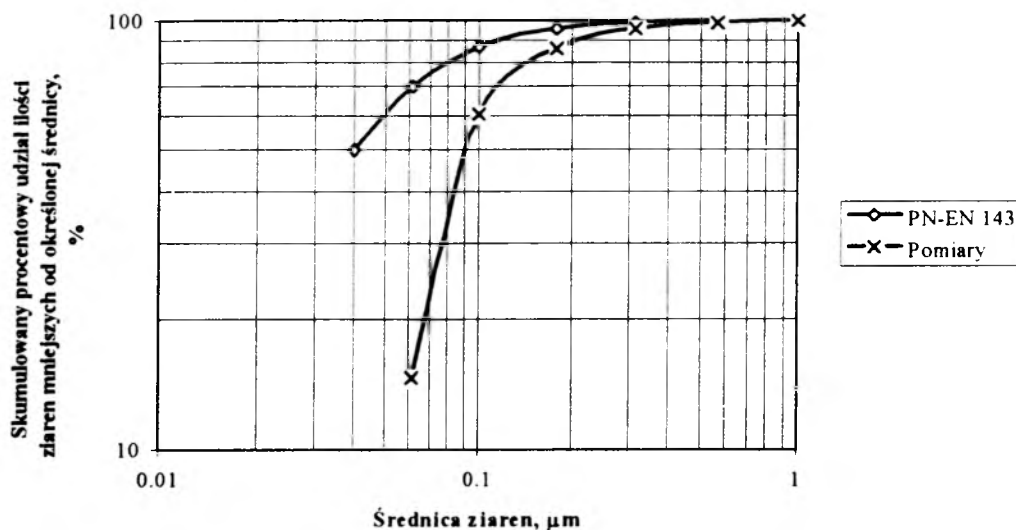


Rysunek 4.8. Średni numeryczny rozkład frakcyjny ziaren aerozolu NaCl przed badanymi włókninami

Analizując Rysunek 4.8 można zauważyć, że przed badanymi włókninami występuje najwięcej ziaren o geometrycznej średnicy zastępczej wynoszącej $0.075 \mu\text{m}$, co odpowiada kanałowi wymiarowemu obejmującemu zakres średnic $0.0562 \div 0.1 \mu\text{m}$.

4.4.1.4. Porównanie metodyki pomiarów: zastosowanej i zalecanej przez normy

Na Rysunku 4.9 przedstawiono wartości dystrybuanty rozkładu średnic aerozolu chlorku sodu zalecanego przez PN-EN 143 [66] do pomiarów skuteczności filtracji elementów sprzętu ochrony dróg oddechowych oraz aerozolu wykorzystanego podczas przeprowadzanych pomiarów. Znaczące różnice występują przede wszystkim dla średnic wynoszących $0.0562 \mu\text{m}$. W normach PN-87/Z-02010/15 [61] i PN-EN 143: 1996 [66] stwierdza się, że średni wymiar cząstek aerozolu powinien wynosić $0.6 \mu\text{m}$. Podczas przeprowadzonych pomiarów wynosił on $0.5 \mu\text{m}$. Wartości średniej średnicy cząstek aerozolu były zbliżone także do wymagań stawianych przez EUROVENT 4/4 [19]. Przy jednoczesnej zbieżności zalecanego i stosowanego zakresu wymiarowego cząstek oraz metody badawczej, można zatem mówić o dostosowaniu zastosowanej procedury pomiarowej do metodyki zalecanej przez PN-EN 143 [66].



Rysunek 4.9. Dystrybuanta rozkładu wielkości cząstek aerozolu chlorku sodu

Podsumowując porównanie metody badań oraz schematów stanowisk pomiarowych przedstawionych w Dokumencie EUROVENT 4/4 [19] oraz zastosowanych podczas pomiarów można stwierdzić, że sposób wykonania badań i wykorzystane podczas przeprowadzania badań w WICHiR stanowisko różnią się od tych zalecanych przez w/w normę. Są natomiast zgodne z normami opisującymi metody badań filtrów przeznaczonych do ochrony układu oddechowego, tj. z PN-87/Z-02010/15 [61] i PN-EN 143: 1996 [66].

W okresie wykonywania pomiarów do celów niniejszej pracy nie było jeszcze w Polsce, zgodnego z normami zachodnimi (do tej pory nie powstały jeszcze polskie normy dotyczące tego problemu), stanowiska służącego do przeprowadzania testu aerozolu chlorku sodu dla potrzeb filtracji powietrza. Brak jest także propozycji normy określającej metodykę badawczą w odniesieniu do materiałów wysokoskutecznych z wykorzystaniem innych aerozoli testowych, na której możnaby oprzeć się podczas wykonywania pomiarów.

Jednak przede wszystkim celem tej pracy jest określenie przedziałowej numerycznej skuteczności filtracji w zakresie wymiarowym ziaren do $1 \mu\text{m}$. W standardowym stanowisku do badań chlorkiem sodu [19] nie ma możliwości określenia skuteczności filtracji z podziałem na frakcje ziaren (wyznacza się całkowitą skuteczność filtracji). Dopiero w propozycji normy pr EN 1882 przedstawione zostaną wymagania dotyczące badania filtrów HEPA i ULPA w oparciu o ocenę numeryczną stężenia aerozolu wykonywaną z wykorzystaniem odpowiednich liczników [32], [84].

Zatem można uznać, że wykorzystując stanowisko do badań włóknin filtracyjnych przeznaczonych dla potrzeb klimatyzacji oraz do sprzętu indywidualnej ochrony dróg oddechowych znajdujące się w WICHiR, przeprowadzono pomiary na najlepszym dostępnym autorce i nadającym się dla celów niniejszej pracy stanowisku.

4.4.2. Analiza wyników pomiarów przedziałowej skuteczności filtracji

W niniejszym rozdziale przeprowadzono analizę otrzymanych wyników pomiarów numerycznej przedziałowej skuteczności filtracji. Poniżej, przykładowo, zamieszczono tabelę przedstawiającą dane dla włókniny I PL/60/SP (Tabela 4.12). Wyniki pomiarów dla pozostałych włókien znajdują się w Załączniku 1.

Tabele, zamieszczone zarówno w Załączniku 1, jak i w tym rozdziale, opracowano podając wartości:

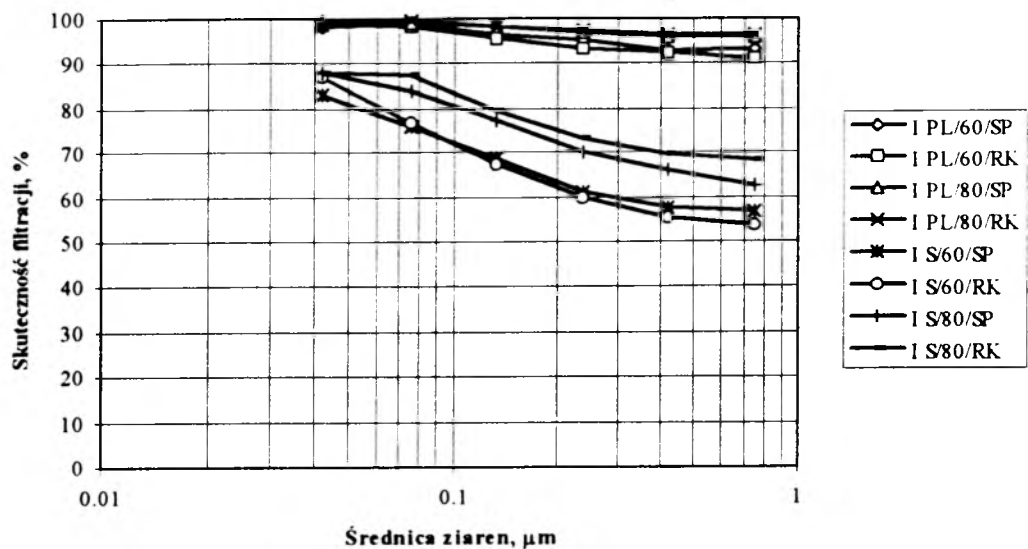
- stężenia liczbowego ziaren przed badaną włókniną filtracyjną, określonego w ilości ziaren w strumieniu przepływającego aerozolu dla danego przedziału średnic cząstek opisanego przez jego geometryczną średnicę zastępczą,
- stężenia liczbowego ziaren za badaną włókniną filtracyjną, określonego w ilości ziaren w strumieniu przepływającego aerozolu dla danego przedziału średnic cząstek opisanego przez jego geometryczną średnicę zastępczą,
- przedziałowego numerycznego współczynnika przeskoku ziaren, określonego w %,
- przedziałowego współczynnika numerycznej skuteczności filtracji, określonego w %.

Wykonane pomiary dotyczyły ziaren o średnicach zawierających się w zakresie $0.0316 \div 1.0 \mu\text{m}$. W tabelach i na wykresach wyniki badań odniesiono do geometrycznych średnic zastępczych cząstek określonych dla kolejnych kanałów wymiarowych licznika TSI 3030 (stąd np. największa wymieniana w nich wartość średnicy wynosi $0.75 \mu\text{m}$, a nie $1.0 \mu\text{m}$ mimo, że w rzeczywistości wielkość ta stanowiła górną granicę wymiarów ziaren).

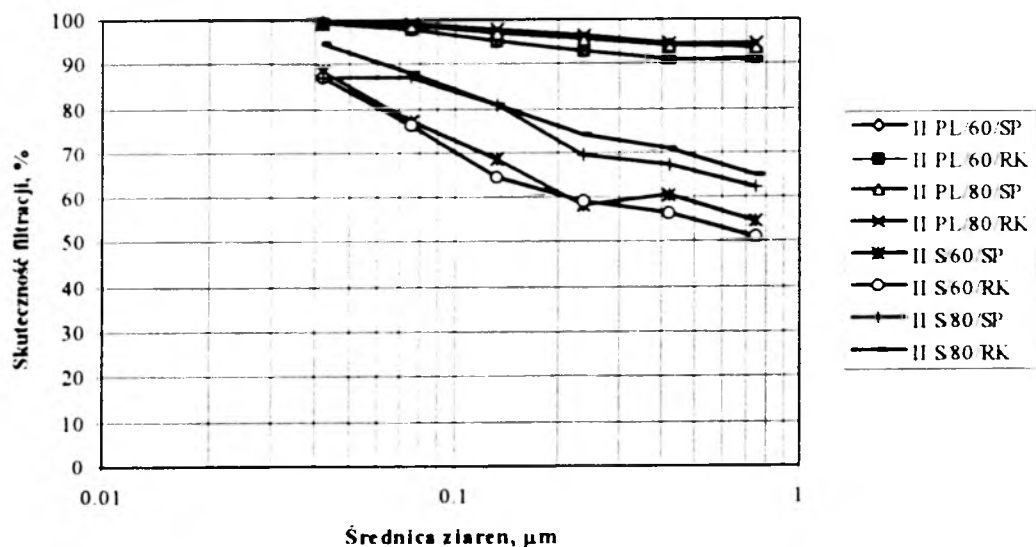
Tabela 4.12. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przez i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku dla próbki I PL/60/SP

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	5258	85	98.38342	1.61658
0.075	36527	531	98.54628	1.45372
0.133	21028	711	96.61879	3.38121
0.237	8360	421	94.96412	5.03588
0.422	2847	202	92.90481	7.09519
0.75	742	49	93.39623	6.60377

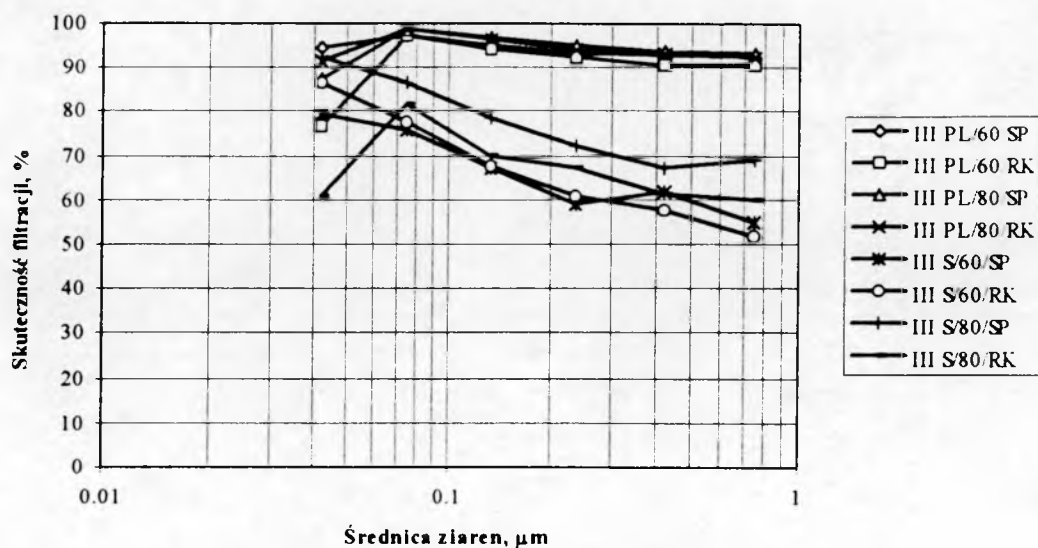
Poniżej zamieszczono graficzne porównanie otrzymanych wyników numerycznej skuteczności filtracji, grupując włókniny ze względu na ich cechy charakterystyczne (np. wykonane z włókien polskich o gramaturze 60 g/m^2 , wykonane z włókien polskich o gramaturze 80 g/m^2 itd.) (Rys. 4.10÷4.20).



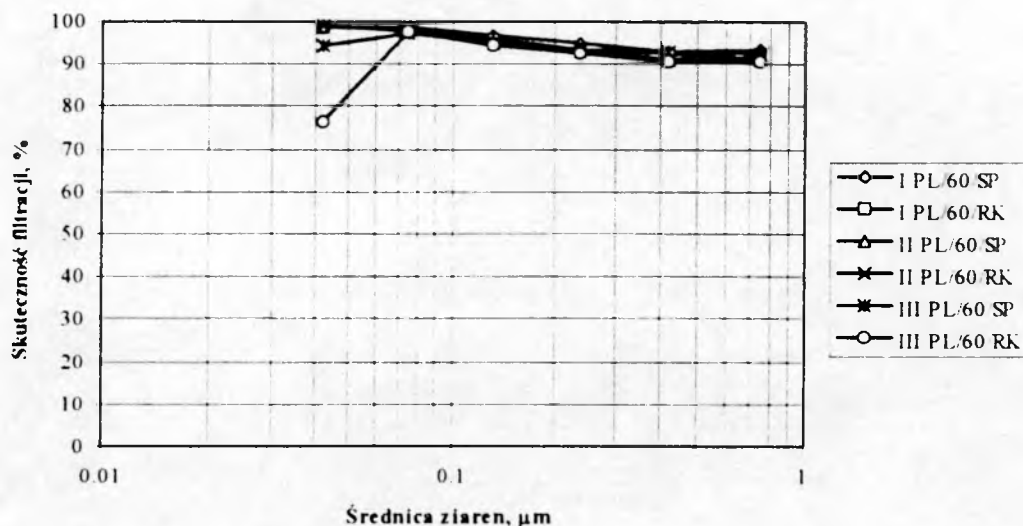
Rysunek 4.10. Porównanie numerycznej skuteczności filtracji włókien filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych z dodatkiem 5% bielonych włókien celulozowych sosnowych (ozn. I)



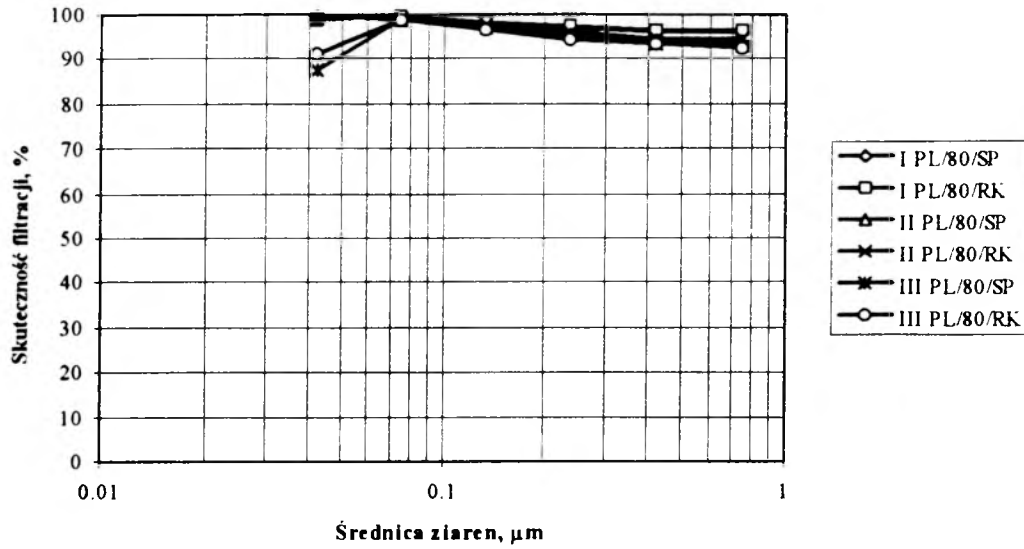
Rysunek 4.11. Porównanie numerycznej skuteczności filtracji włókien filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy (ozn. II)



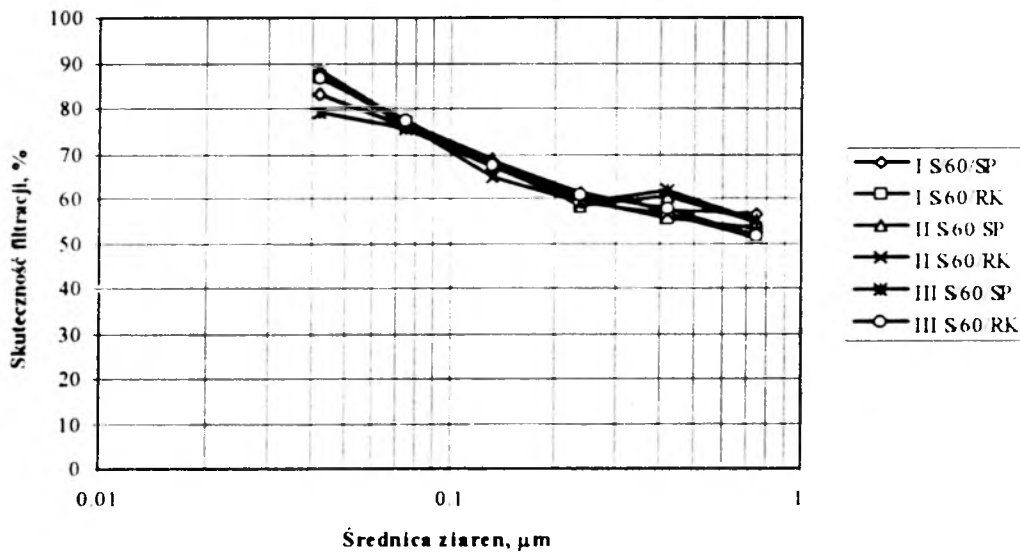
Rysunek 4.12. Porównanie numerycznej skuteczności filtracji włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy i 1% Ipowodu P (ozn. III)



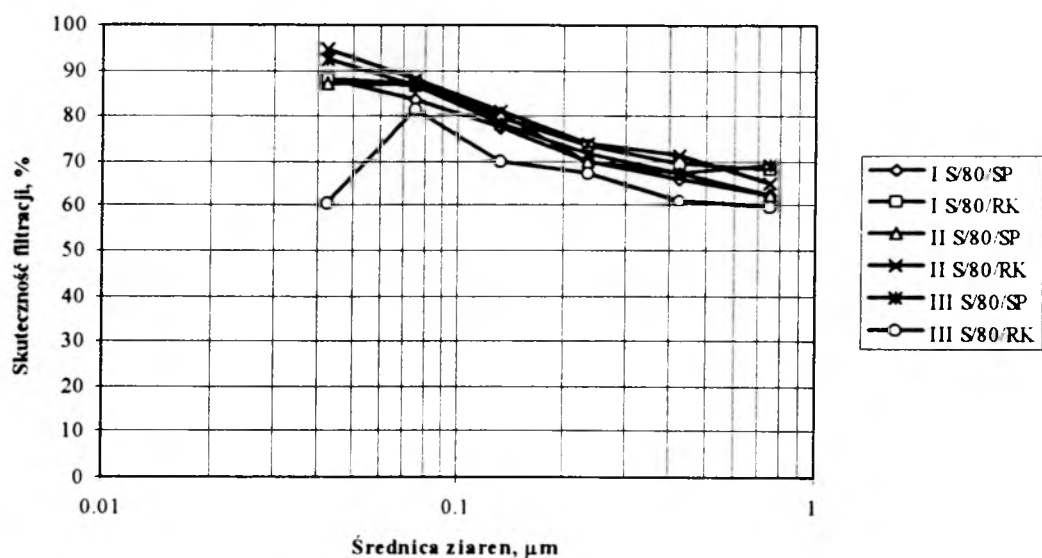
Rysunek 4.13. Porównanie numerycznej skuteczności filtracji włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych "PL" o gramaturze 60 g/m²



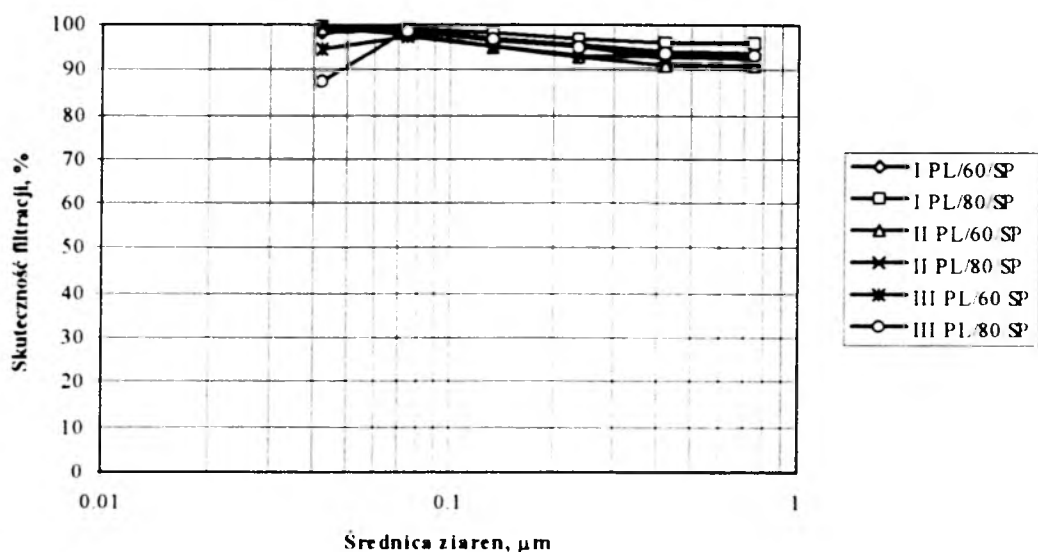
Rysunek 4.14. Porównanie numerycznej skuteczności filtracji włókien filtracyjnych wykonanych z włókien "PL" o gramaturze 80 g/m²



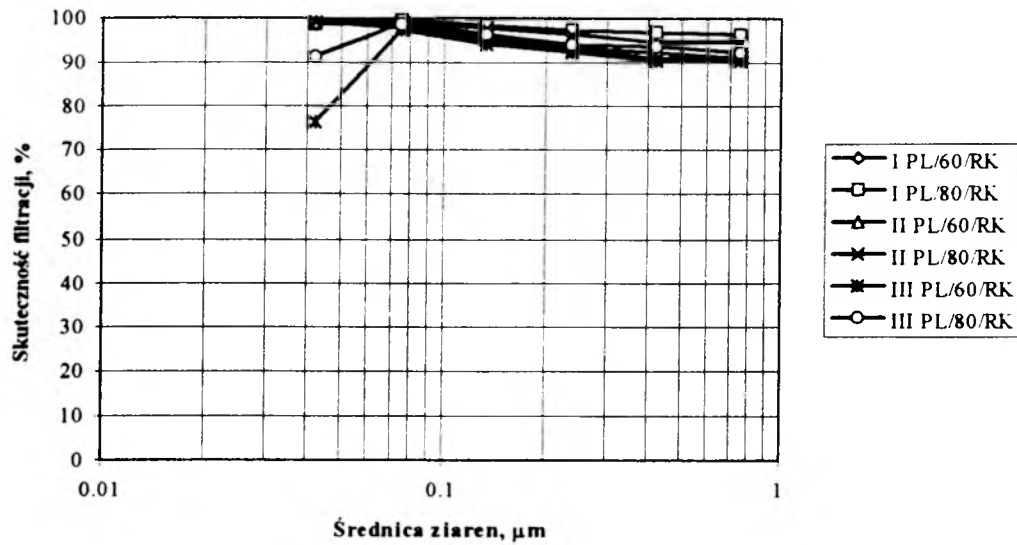
Rysunek 4.15. Porównanie numerycznej skuteczności filtracji włókien filtracyjnych wykonanych z włókien "S" o gramaturze 60 g/m²



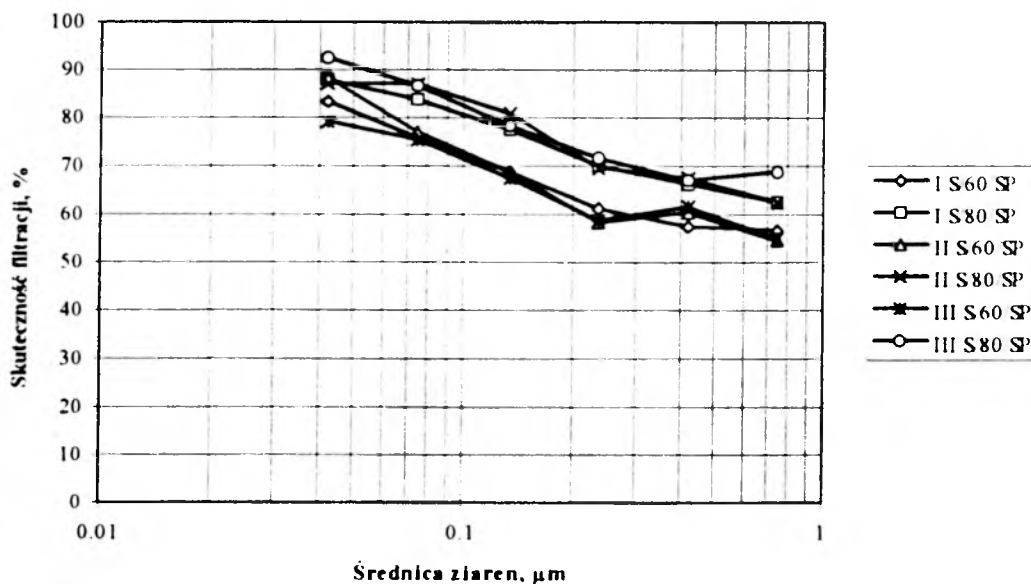
Rysunek 4.16. Porównanie numerycznej skuteczności filtracji włókien filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych "S" o gramaturze 80 g/m^2



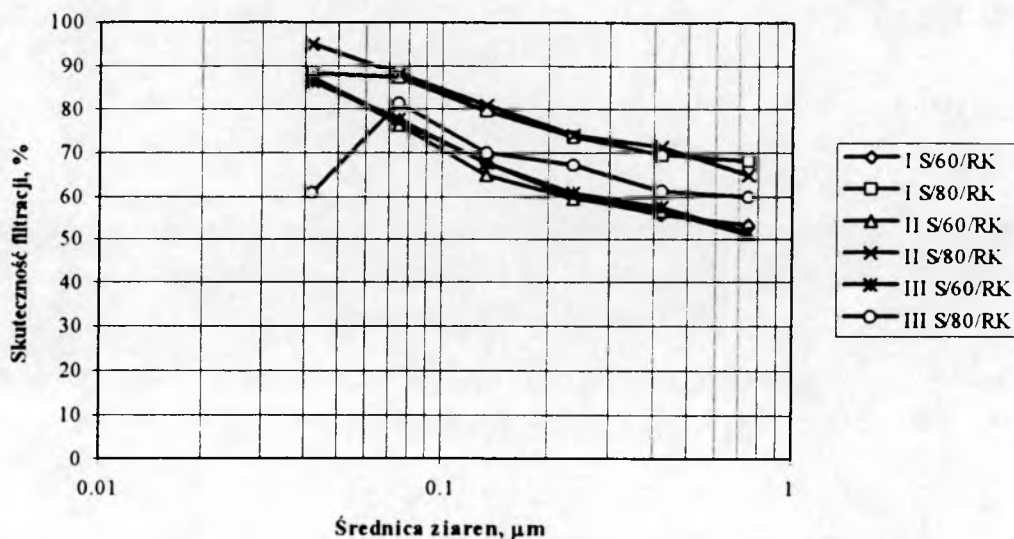
Rysunek 4.17. Porównanie numerycznej skuteczności filtracji włókien filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych "PL" zagęszczonych w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej (ozn. "SP")



Rysunek 4.18. Porównanie numerycznej skuteczności filtracji włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych "PL" zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha (ozn. "RK")



Rysunek 4.19. Porównanie numerycznej skuteczności filtracji włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych "S" zagęszczonych w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej (ozn. "SP")



Rysunek 4.20. Porównanie numerycznej skuteczności filtracji włókien filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych "S" zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha (ozn. "RK")

Analizując otrzymane dla wszystkich włókien wyniki przedziałowych współczynników skuteczności filtracji określanych metodą chlorku sodu, stwierdzono występowanie ich największych wartości dla ziaren o zastępczej średnicy wynoszącej $0.0422 \mu\text{m}$ (70.8% wyników) i $0.075 \mu\text{m}$ (25% wyników), a najmniejszych dla $0.75 \mu\text{m}$ (66.7% wyników) i dla $0.422 \mu\text{m}$ (20.8% wyników).

Wysze wartości skuteczności filtracji otrzymano dla włókien wykonanych z polskich włókien szklanych o średniej średnicy $1.142 \mu\text{m}$ (symbol PL), niż dla włókien z włókien szwedzkich o średniej średnicy $2.7698 \mu\text{m}$ (symbol S). Przystępując do pomiarów spodziewano się uzyskać równie wysokie wartości skuteczności filtracji dla obu typów włókien. Jednak włókna szwedzkie w rzeczywistości miały dużą większą średnią wartość średnicy niż podawana przez producenta ($1.15 \mu\text{m}$). Jednocześnie miały dużo większy rozrzut wartości średnic. Oba te fakty wpłynęły na większą niejednorodność struktury włókien i włókniny, niż w przypadku włókien polskich. W konsekwencji doprowadziło to do uzyskania niższych wartości skuteczności filtracji dla włókien szwedzkich.

Włókniny o większej gramaturze, tj. 80 g/m^2 , charakteryzowały się większą skutecznością od włókien o gramaturze 60 g/m^2 .

Włókniny wykonane z włókien szklanych szwedzkich lub o ich przeważającym udziale w materiale, suszone w warunkach swobodnych w suszarce powietrznej przewiewowej w temperaturze 105°C (symbol SP) miały niższe wartości przedziałowych współczynników skuteczności filtracji niż włókniny suszone w warunkach zagęszczonych w suszarce Rapid-Koetha (symbol RK). W przypadku

włóknin z włókien szklanych polskich nie udało się zaobserwować podobnej zależności.

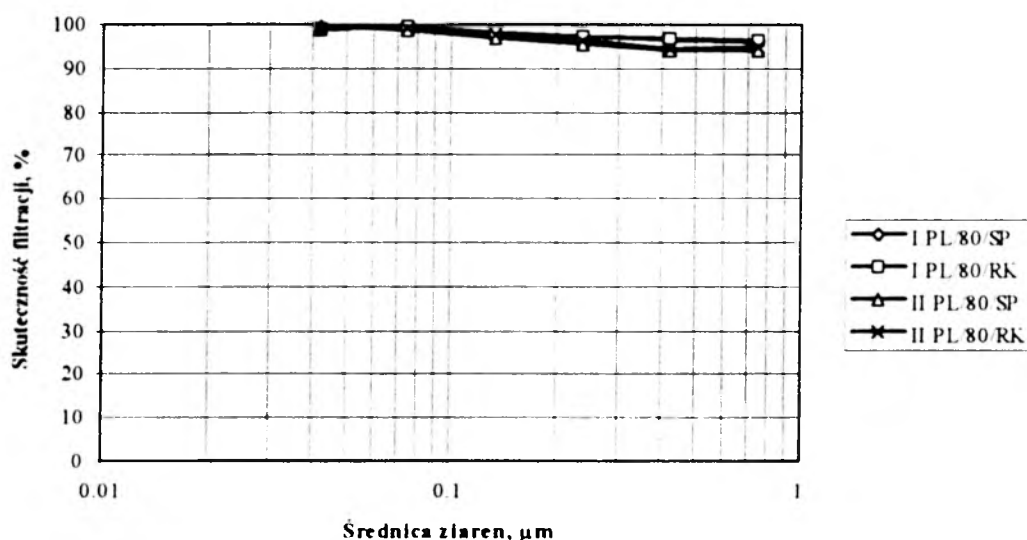
Biorąc pod uwagę wpływ zastosowanych dodatków na skuteczność filtracji, stwierdzono, że najmniejszymi wartościami przedziałowego współczynnika skuteczności filtracji charakteryzuje się materiał filtracyjny oznaczony symbolem III, wykonany z dodatkiem substancji deflokulującej, tj. 2% karboksymetylocelulozy i z dodatkiem substancji flokulującej - 1% Ipowodu P.

Natomiast dodanie niewielkiej ilości (5%) grubszych włókien celulozowych (oznaczenie: I) nie pogorszyło zdolności włóknin do zatrzymania pyłów.

Najwyższe wartości numerycznej przedziałowej skuteczności filtracji, tj. powyżej 99% uzyskano dla następujących włóknin filtracyjnych (w nawiasach podano geometryczną zastępczą średnicę ziaren i uzyskaną dla niej skuteczność):

- I PL/80/SP (0.0422 μm ÷ 99.54067%),
- I PL/80/RK (0.0750 μm ÷ 99.34117%),
- II PL/80/SP (0.0422 μm ÷ 99.70214%),
- II PL/80/RK (0.0422 μm ÷ 99.23509%,
0.0750 μm ÷ 99.02501%).

Na Rysunku 4.21 przedstawiono przebieg krzywych numerycznej skuteczności filtracji dla w/w włóknin.



Rysunek 4.21. Numeryczna skuteczność filtracji najlepszych włóknin filtracyjnych

4.5. Określenie całkowitej skuteczności filtracji testem mgły olejowej

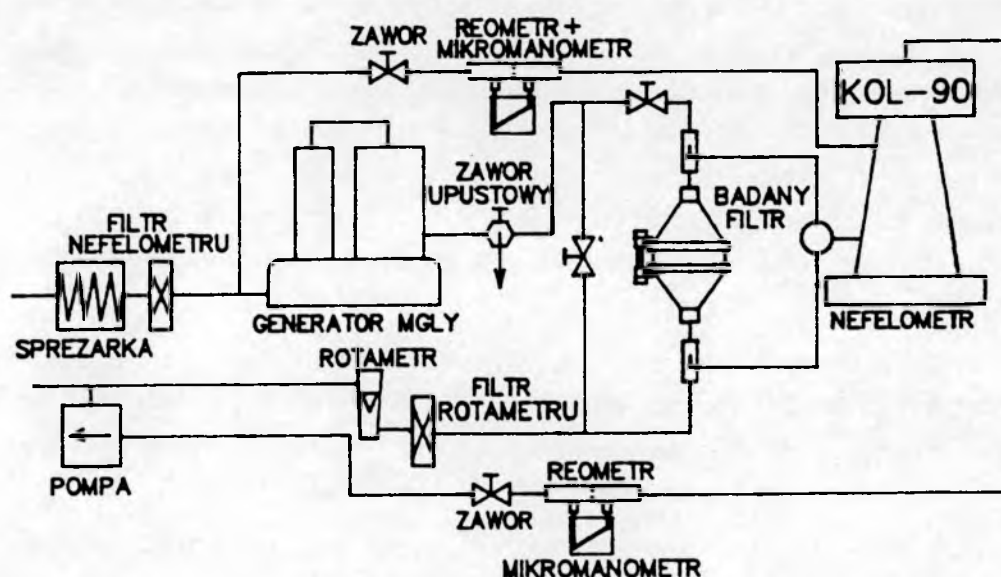
4.5.1. Metodyka i stanowisko pomiarowe

W latach 1993 i 1994 w Wojskowym Instytucie Chemii i Radiometrii w Warszawie - Rembertowie przeprowadzono pomiary całkowitej skuteczności filtracji i straty ciśnienia testem mgły olejowej. Określenie tą metodą całkowitej skuteczności filtracji

wykonano dla takiej samej prędkości napływu aerozolu, jak podczas pomiarów przedziałowej skuteczności filtracji testem chlorku sodu, tzn. dla 3 cm/s.

Wyniki otrzymane podczas badań testem mgły olejowej posłużyły do przeprowadzenia oceny jakości włóknin filtracyjnych (Rozdział 7.4.2).

Na Rysunku 4.22 przedstawiono schemat stanowiska, na którym wykonano badania testem mgły olejowej [50].



Rysunek 4.22. Schemat stanowiska badawczego testem mgły olejowej [50]

Aerozol testowy uzyskano poprzez rozpylenie podgrzanego oleju w generatorze. Stężenie mgły olejowej wynosiło 10 mg/m^3 , średnia średnica cząstek powstałego w ten sposób aerozolu monodispersyjnego określana z pomiaru defektu polaryzacji wynosiła $0.3 \mu\text{m}$, prędkość napływu powietrza $u=3 \text{ cm/s}$. Mgła olejowa z generatora, po ustabilizowaniu się jej parametrów była kierowana na badaną próbkę umieszczoną w uchwycie pomiarowym. Pomiar stężenia "przed" i "za" badaną próbką wykonano przy użyciu nefelometru KOL-90. Zastosowana metoda jest metodą pośrednią polegającą na pomiarze intensywności rozproszenia światła przez przepływający aerozol [7]. Powierzchnia robocza próbki wynosiła 28.2 cm^2 . Kolejne pomiary przeskoku i oporu przepływu wykonano w równych odstępach czasu (tj. co 10 minut) przez 1 godzinę. Na podstawie określonych podczas pomiarów wartości przedziałowego współczynnika przeskoku określono wartość przedziałowej numerycznej skuteczności filtracji.

4.5.2. Porównanie metodyki pomiarów: zastosowanej i zalecanej przez normy

Zgodnie z BN-88/8962-05 [10] przeprowadzanie pomiarów testem mgły oleju parafinowego jest zalecane do oceny filtrów aerozoli koloidalnych klasy Q, R, S. Także w projekcie nowej normy dotyczącej filtrów powietrza i ich klas [73] ta metoda badawcza jest zalecana do badań filtrów klasy Q, R, S. Zgodnie z tymi

normami podczas pomiarów stosuje się jako aerozol testowy mgłą technicznie czystego oleju parafinowego o gęstości 0.853 g/cm^3 . Wymiary ziaren nie powinny przekraczać $1 \mu\text{m}$, a większość ziaren powinna zawierać się w przedziale $0.3 \div 0.5 \mu\text{m}$. Stężenie aerozolu w powietrzu doprowadzonym do filtru powinno wynosić $10 \text{ mg/m}^3 \pm 10\%$. Żadna z tych norm nie przedstawia schematu stanowiska pomiarowego, ani opisu stosowanych w nim urządzeń. A zatem sposób prowadzenia tych badań nie jest w Polsce do końca znormalizowany.

Taka sama metoda badawcza jest zalecana przez normę niemiecką DIN 24 184 (1990) do badań filtrów wysokoskutecznych [38]. W normie tej opisano konstrukcję i parametry pracy generatora mgły olejowej oraz przedstawiono jedynie założenia dotyczące stanowiska badawczego [29]. Zgodnie z DIN 24 184 [38] aerozolem testowym jest mgła oleju parafinowego, której średnice nie przekraczają $1 \mu\text{m}$ i w większości mieszczą się w zakresie $0.3 \div 0.5 \mu\text{m}$. Badania należy prowadzić przy stężeniu mgły wynoszącym 10 mg/m^3 . W razie potrzeby stężenie można zwiększyć do 80 mg/m^3 .

Wymieniane w normach polskich i niemieckiej parametry oleju parafinowego dotyczą jedynie jego gęstości i ma ona taką samą zalecaną wartość. Natomiast parametry wytworzonej mgły olejowej dotyczą średnic ziaren oraz stężenia mgły i również są one porównywalne w przypadku norm polskich i niemieckiej.

Natomiast w powstającej normie europejskiej dotyczącej badania filtrów testem mgły olejowej wymienione zostaną, poza gęstością, także i inne zalecane parametry oleju parafinowego [32]:

- gęstość 843 kg/m^3 ,
- temperatura topnienia 259 K ,
- temperatura zapłonu 453 K ,
- lepkość dynamiczna $0.026 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

W niniejszej pracy skorzystano z istniejącego w WICHiR stanowiska badawczego, przygotowanego do przeprowadzania badań całkowitej skuteczności filtracji i straty ciśnienia przy wykorzystaniu oleju turbinowego T30 o parametrach podanych za GOST 32-74 (dane, w przedstawionej poniżej postaci, otrzymano w WICHiR):

- gęstość w temperaturze $+20^\circ\text{C}$ około 850 kg/m^3 ,
- lepkość dynamiczna $0.028 \div 0.032 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
- liczba kwasowa poniżej 0.02 mg KOH/g ,
- stabilność p -utleniająca - pozostałość po utlenieniu poniżej 0.1% masy popiołu,
- popiół poniżej 0.005% masy,
- liczba kwasowa po utlenieniu poniżej 0.35 mg KOH/g ,
- liczba demulgacji poniżej 5 ,
- zawartość zasad i kwasów brak,
- temperatura zapłonu powyżej 180°C (tygiel odkryty),
- temperatura krzepnięcia poniżej -10°C ,
- próba sodowa poniżej 2.0 ,
- w temperaturze 0°C przezroczysty,

- działanie korozji - miedź 3 h w 100°C,
- barwa -c.n.t. poniżej 2.5
- olej stabilny, bez dodatków
- olej produkcji rosyjskiej, używany w turbinach gazowych, hydraulicznych.

W normie BN-85/9542-14 [9] zalecana się stosowanie oleju turbinowego TU-32 do określania nieselektywnych defektów strukturalnych elementów filtropochłaniających i filtrów wchodzących w skład sprzętu ochrony dróg oddechowych. Jego parametry zostały podane w normie PN-84/C-96059 [60].

Natomiast w normie PN-EN 143: 1996 [66], zastępującej stosowaną dotychczas PN-92/Z-02014/03, dotyczącej metod badań filtrów przeznaczonych do ochrony dróg oddechowych podane zostały następujące fizyczne właściwości oleju parafinowego służącego do przeprowadzania badań testem mgły olejowej:

- gęstość w temperaturze 20°C 846 kg/m³
- lepkość dynamiczna w temperaturze 20°C 0.026÷0.031 Pa·s.

Porównanie właściwości oleju wymienionych w omawianych normach oraz zalecane i zastosowane w pomiarach charakterystyki wytworzonej mgły olejowej zamieszczono w Tabelach 4.13, 4.14.

Tabela 4.13. Porównanie parametrów oleju stosowanego podczas testu mgły olejowej

Parametr oleju	Jedn.	BN-88/8962-05	prPN (zamiast BN-88/8962-05)	prEN ¹⁾	PN-EN 143 (styczeń 1996)	PN-84/C-96059	GOST 32-74 ²⁾
Gatunek oleju	-	parafinowy	parafinowy	parafinowy	parafinowy	turbinowy TU-32	turbinowy T30
Gęstość	kg/m ³	853	853	843	846	860 ³⁾	850
Lepkość dynamiczna	Pa·s	brak danych	brak danych	0.026	0.026 ÷ 0.031	0.025 ÷ 0.030	0.028 ÷ 0.032
Temp. zapłonu	K	brak danych	brak danych	453	brak danych	483	453

¹⁾ - parametry oleju na podstawie [32].

²⁾ - parametry oleju otrzymano w WChiR.

³⁾ - w normie PN-84/C-96059 [60] brak danych dotyczących gęstości oleju; wartość cytowana za [75].

Porównując właściwości oleju parafinowego zalecanego w wymienionych normach do przeprowadzania testu mgły olejowej z właściwościami oleju zastosowanego w trakcie pomiarów zauważyć można, że są one zbliżone. To samo można stwierdzić o parametrach powstałej mgły olejowej. Można zatem przyjąć, że wykonując pomiary z wykorzystaniem mgły oleju turbinowego nie powinno się uzyskać wyników różnych od tych, jakie by otrzymano dla mgły oleju parafinowego.

Tabela 4.14. Porównanie parametrów mgły olejowej

Parametr mgły olejowej	Jedn.	BN-88/8962-05	prPN (zamiast BN-88/8962-05)	DIN 24 184	PN-EN 143 (styczeń 1996)	PN-92/Z-02014/03	Pomiary wykonane w toku badań
Stężenie	mg/m ³	10±10%	10±10%	10	20±5	20±5	10
Max. wymiar ziaren	µm	1	1	1	1.7	1.7	brak danych
Wymiary większości ziaren	µm	0.3÷0.5	0.3÷0.5	0.3÷0.5	średnia średnica 0.4	średnia średnica 0.4	średnia średnica 0.3

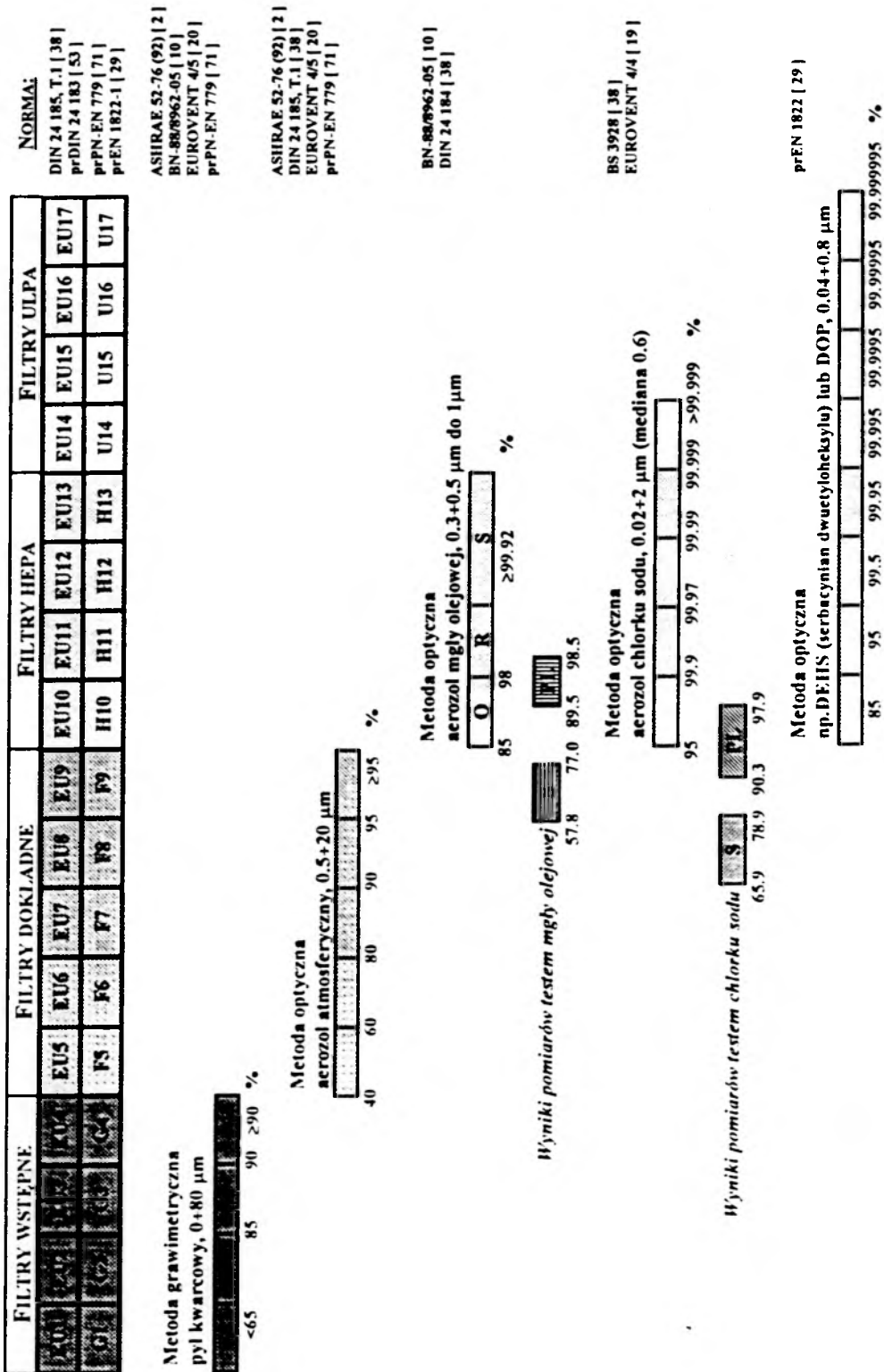
4.5.3. Klasyfikacja włókien w oparciu o wartości skuteczności całkowitej

W Tabeli 4.15 przedstawiono wartości skuteczności całkowitej uzyskane podczas pomiarów testem mgły olejowej określając na ich podstawie klasy filtrów, a także zamieszczono wartości średnie skuteczności filtracji określone na podstawie pomiarów testem chlorku sodu.

Na Rysunku 4.23 przedstawiono klasyfikację filtrów powietrza według norm polskich i zagranicznych wraz z właściwymi dla poszczególnych grup filtrów metodami badawczymi. Naniesiono także zakres wartości skuteczności filtracji otrzymany podczas testu mgłą olejową i chlorkiem sodu, próbując w ten sposób zaklasyfikować włókniny do konkretnych klas filtrów. W przypadku testu mgłą olejową przeprowadzonego zgodnie z normami obowiązującymi podczas badań włókien filtracyjnych, filtry zostały sklasyfikowane prawidłowo. W przypadku testu chlorkiem sodu, wykonanego niezupełnie zgodnie z normami dotyczącymi badań filtrów dla potrzeb klimatyzacji, natomiast zgodnie z normami dla filtrów do sprzętu ochrony osobistej, wykorzystano aerozol o wymiarach cząstek mniejszych niż zalecane. Można się spodziewać, że podczas przebadania tych samych filtrów z wykorzystaniem aerozolu odpowiedniego dla badania filtrów dla klimatyzacji uzyskanoby wyższe klasy filtrów. Jednak, mimo tych zastrzeżeń, zaznaczono, w celach porównawczych i informacyjnych, wartości całkowitej skuteczności filtracji określone testem chlorku sodu.

Tabela 4.15. Wartości całkowitej skuteczności filtracji określonej testem mgły olejowej i chlorku sodu oraz odpowiadające im klasy filtrów powietrza

Lp.	Symbol włókniny	Całkowita skuteczność filtracji (test mgły olejowej) %	Klasa filtru (w oparciu o test mgły olejowej)	Całkowita skuteczność filtracji (test chlorku sodu) %	Klasa filtru (w oparciu o test chlorku sodu)
1	I PL/60/SP	97.4	Q	95.8073	EU10
2	I PL/60/RK	95.5	Q	94.8267	poniżej dolnej granicy klasy EU10
3	I PL/80/SP	98.0	R	97.7080	EU10
4	I PL/80/RK	98.5	R	97.7709	EU10
5	I S/60/SP	63.6	poniżej dolnej granicy klasy Q	75.4328	poniżej dolnej granicy klasy EU10
6	I S/60/RK	60.3	poniżej dolnej granicy klasy Q	66.6844	poniżej dolnej granicy klasy EU10
7	I S/80/SP	68.8	poniżej dolnej granicy klasy Q	74.5721	poniżej dolnej granicy klasy EU10
8	I S/80/RK	77.0	poniżej dolnej granicy klasy Q	77.6677	poniżej dolnej granicy klasy EU10
9	II PL/60/SP	96.28	R	96.9928	EU10
10	II PL/60/RK	95.98	Q	94.5588	poniżej dolnej granicy klasy EU10
11	II PL/80/SP	98.04	R	97.9161	EU10
12	II PL/80/RK	97.94	Q	96.9069	EU10
13	II S/60/SP	64.4	poniżej dolnej granicy klasy Q	67.9321	poniżej dolnej granicy klasy EU10
14	II S/60/RK	70.0	poniżej dolnej granicy klasy Q	65.8765	poniżej dolnej granicy klasy EU10
15	II S/80/SP	67.3	poniżej dolnej granicy klasy Q	75.6980	poniżej dolnej granicy klasy EU10
16	II S/80/RK	68.7	poniżej dolnej granicy klasy Q	78.9293	poniżej dolnej granicy klasy EU10
17	III PL/60/SP	95.6	Q	94.2396	poniżej dolnej granicy klasy EU10
18	III PL/60/RK	96.22	Q	90.2616	poniżej dolnej granicy klasy EU10
19	III PL/80/SP	94.74	Q	94.0683	poniżej dolnej granicy klasy EU10
20	III PL/80/RK	89.5	Q	94.4157	poniżej dolnej granicy klasy EU10
21	III S/60/SP	57.8	poniżej dolnej granicy klasy Q	66.2996	poniżej dolnej granicy klasy EU10
22	III S/60/RK	58.6	poniżej dolnej granicy klasy Q	66.9284	poniżej dolnej granicy klasy EU10
23	III S/80/SP	69.8	poniżej dolnej granicy klasy Q	77.6114	poniżej dolnej granicy klasy EU10
24	III S/80/RK	67.5	poniżej dolnej granicy klasy Q	66.7090	poniżej dolnej granicy klasy EU10



Rysunek 4.23. Klasyfikacja filtrów powietrza według norm polskich i zagranicznych

4.6. Określenie straty ciśnienia

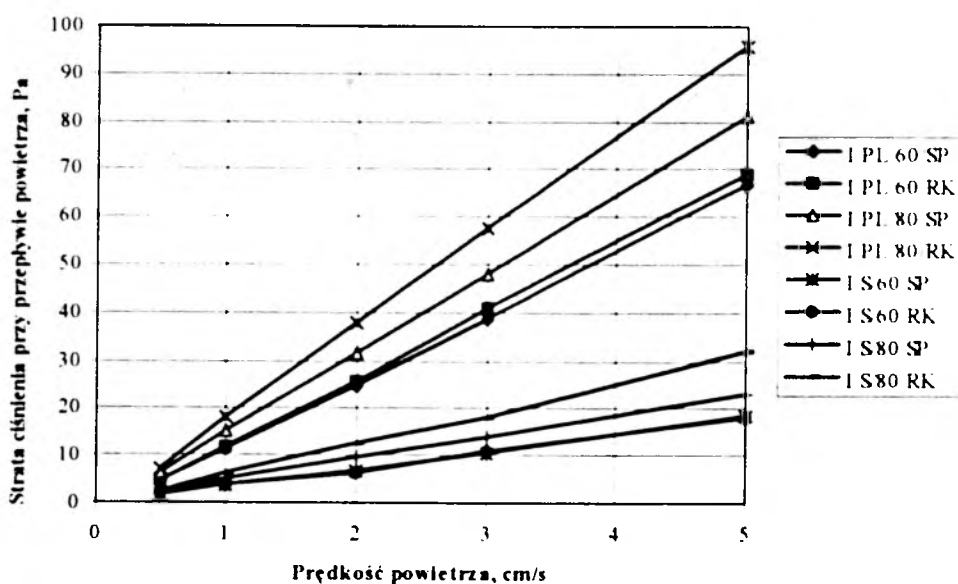
4.6.1. Stanowisko badawcze i metodyka pomiarowa straty ciśnienia przy przepływie czystego powietrza

Pomiary straty ciśnienia przy przepływie czystego powietrza przez włókniny filtracyjne wykonane zostały w Wojskowym Instytucie Chemii i Radiometrii w Rembertowie w latach 1993 i 1994. Przeprowadzono je dla takiej samej prędkości napływającego powietrza, dla której określono skuteczność filtracji, tj. 3 cm/s, oraz dla prędkości od niej niższych i wyższych, tj. dla: 0.5 cm/s, 1 cm/s, 2 cm/s, 5 cm/s. Badania te wykonano na tym samym stanowisku, które służyło do określenia przedziałowej skuteczności filtracji metodą chlorku sodu (Rozdział 4.4.1.3, Rysunek 4.7), podłączając sondy do pomiaru straty ciśnienia podczas przepływu czystego powietrza.

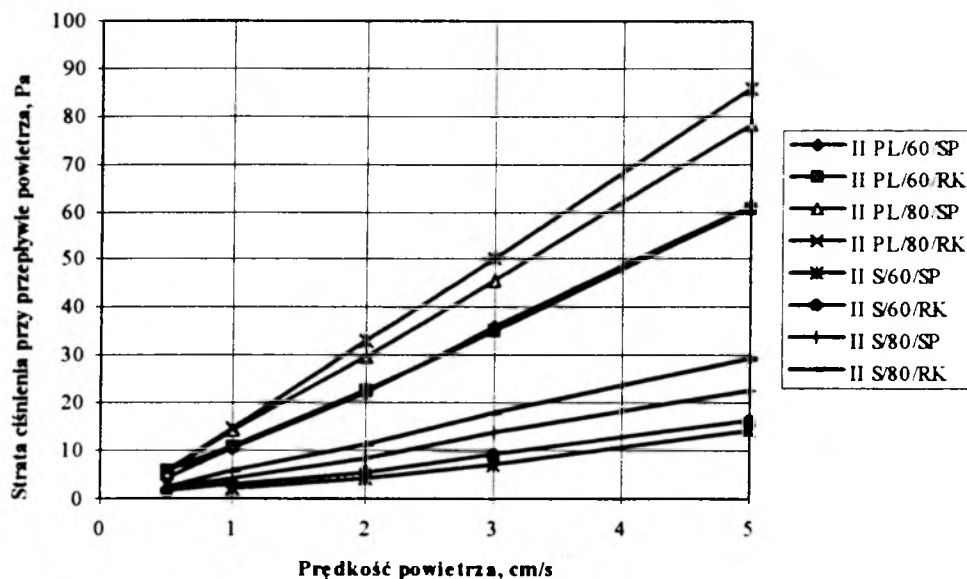
Wykonanie pomiarów straty ciśnienia powietrza było istotnym elementem przeprowadzanych badań. Opór przepływu jest ważnym parametrem eksploatacyjnym materiałów filtracyjnych, służącym także do oceny jakości wykonanych z nich filtrów. Znajomość rzeczywistej wartości oporu przepływu była także niezbędna w procesie oceny skuteczności oczyszczania powietrza za pomocą przedstawionych wcześniej matematycznych modeli procesów filtracji.

4.6.1.1. Porównanie charakterystyk straty ciśnienia

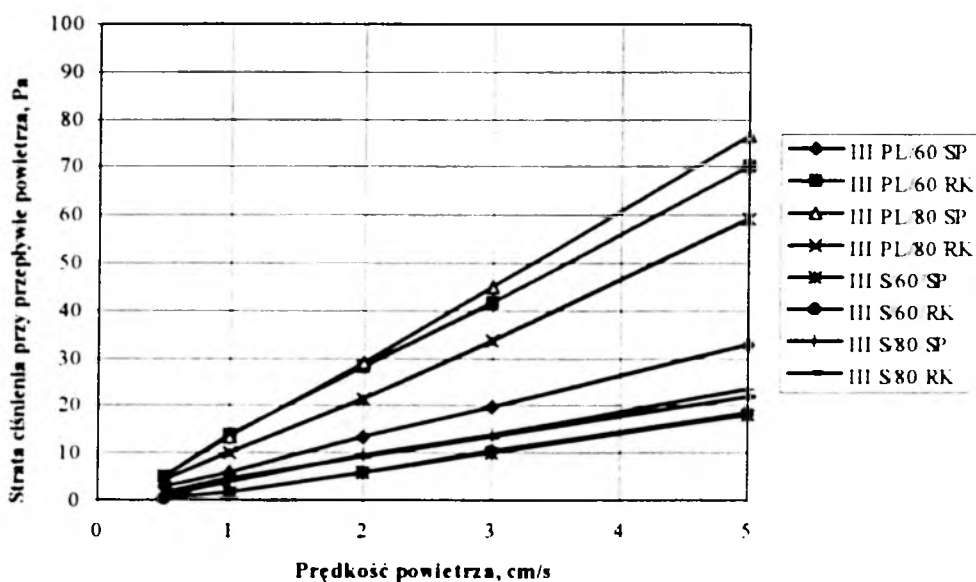
Poniżej zamieszczono porównanie charakterystyk straty ciśnienia przebadanych włókien filtracyjnych (Rysunki 4.24÷4.34).



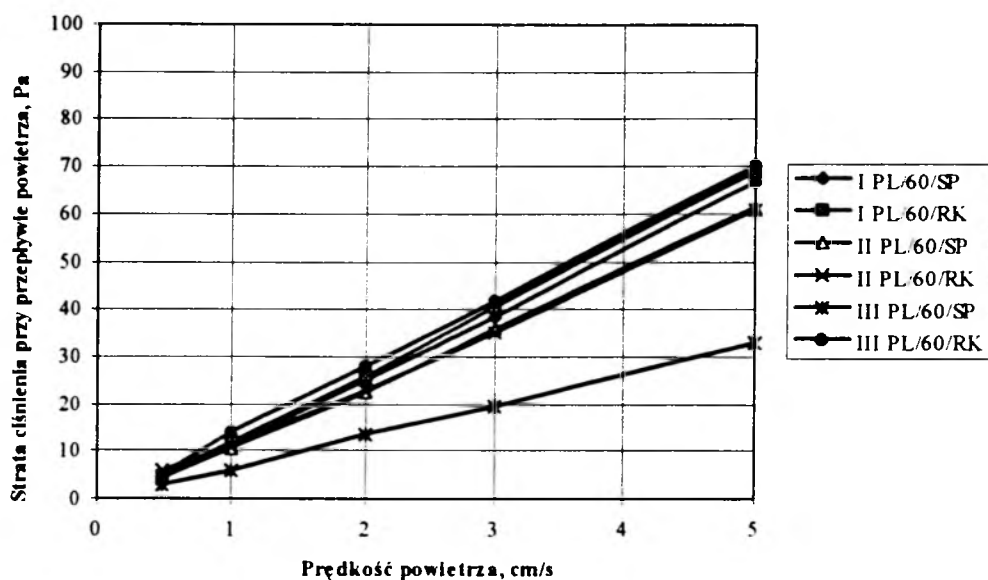
Rysunek 4.24. Porównanie charakterystyk straty ciśnienia dla włókien filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych z dodatkiem 5% bielonych włókien celulozowych sosnowych (ozn. I)



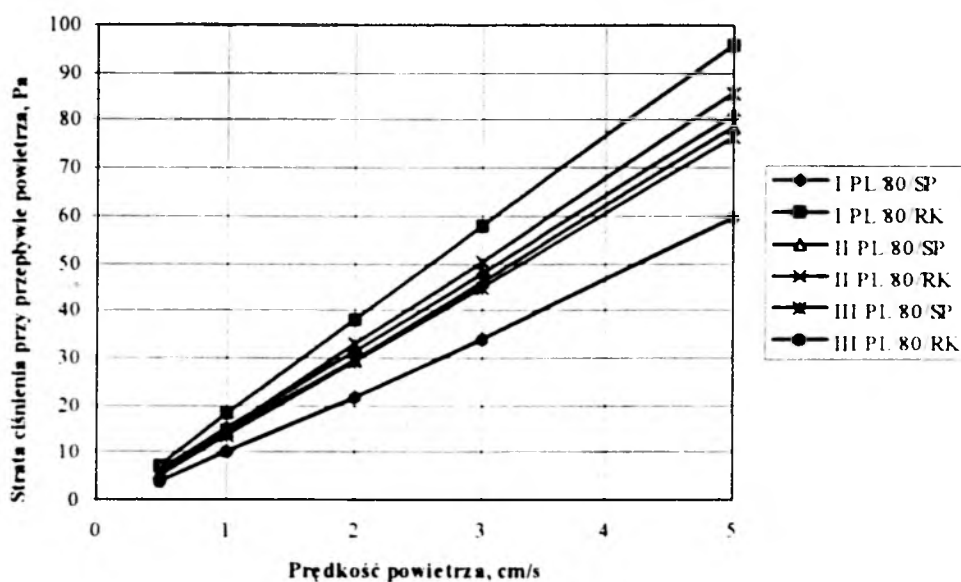
Rysunek 4.25. Porównanie charakterystyk straty ciśnienia dla włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy (ozn. II)



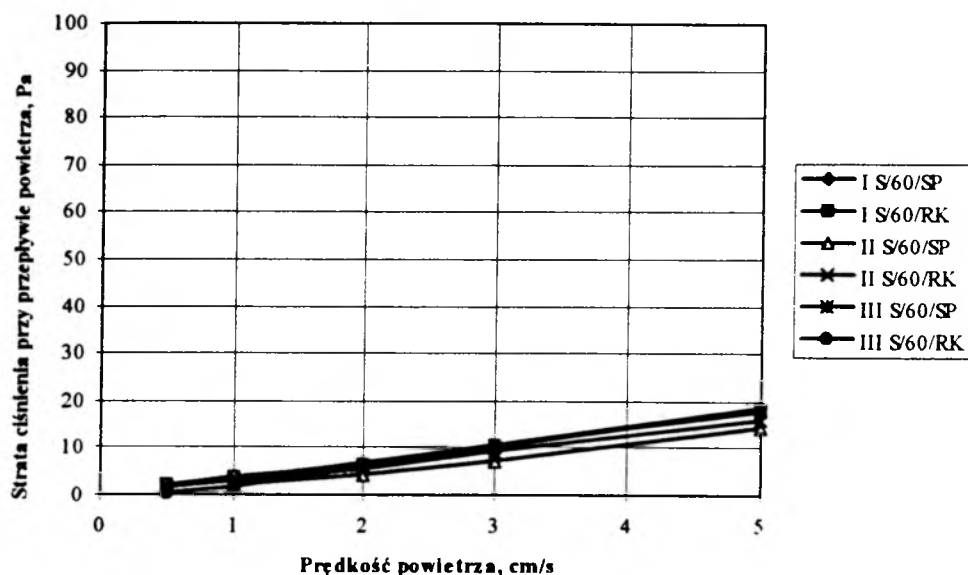
Rysunek 4.26. Porównanie charakterystyk straty ciśnienia dla włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy i 1% Ipowodu P (ozn. III)



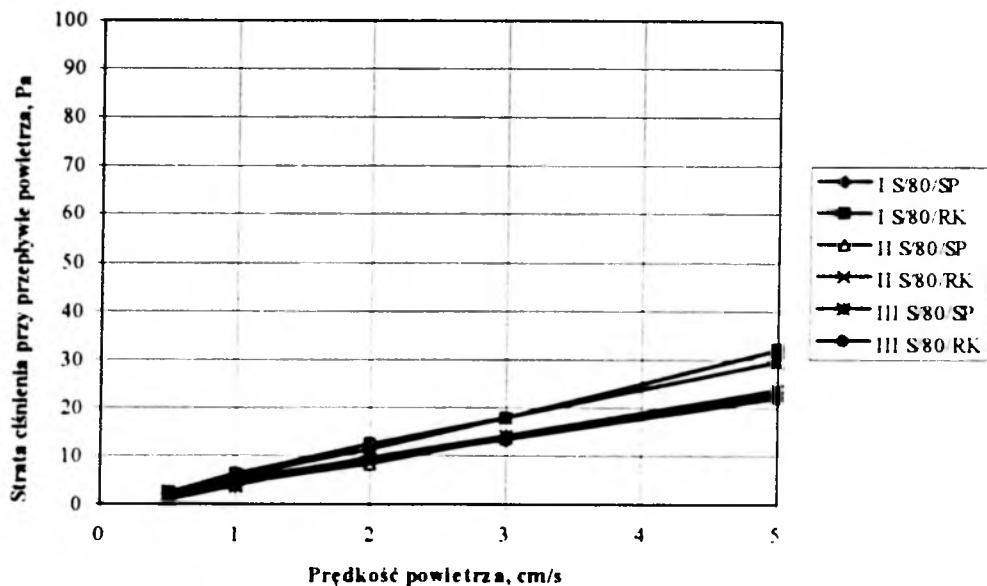
Rysunek 4.27. Porównanie charakterystyk straty ciśnienia dla włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych "PL" o gramaturze 60 g/m²



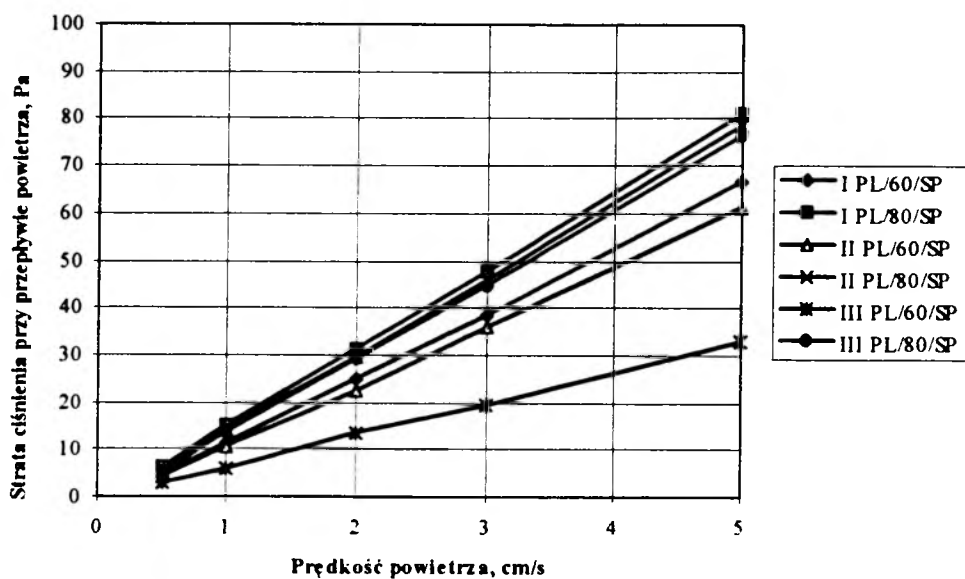
Rysunek 4.28. Porównanie charakterystyk straty ciśnienia dla włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien "PL" o gramaturze 80 g/m²



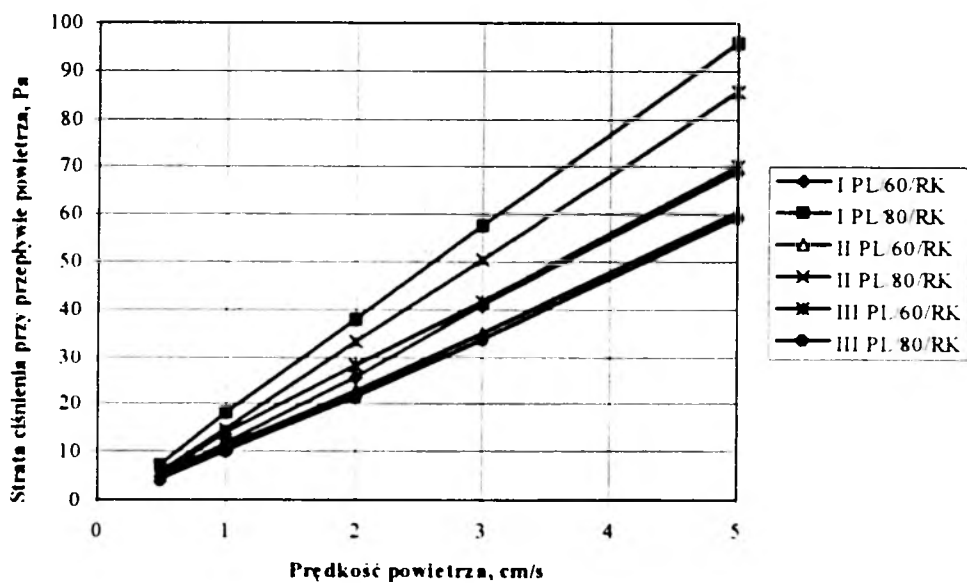
Rysunek 4.29. Porównanie charakterystyk straty ciśnienia dla włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych "S" o gramaturze 60 g/m²



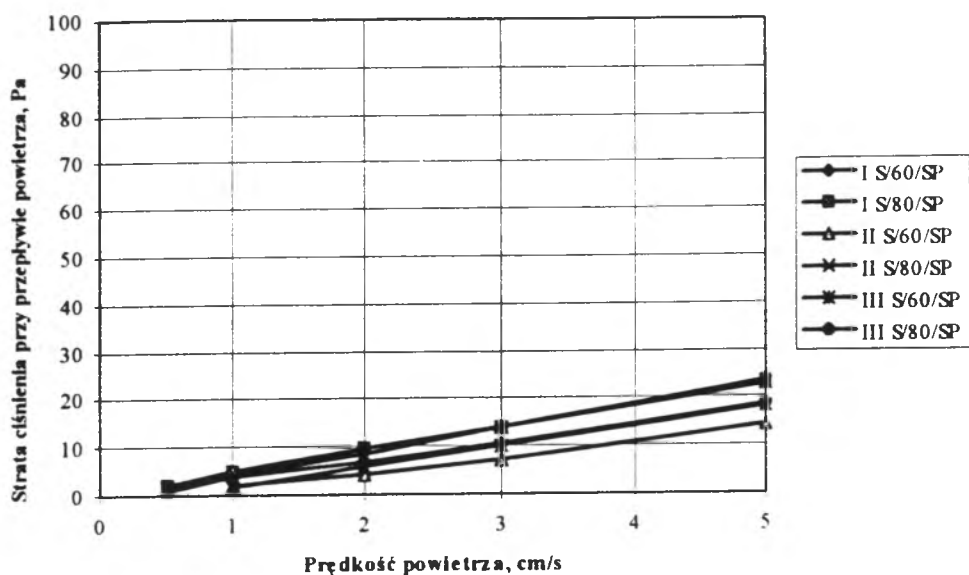
Rysunek 4.30. Porównanie charakterystyk straty ciśnienia dla włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych "S" o gramaturze 80 g/m²



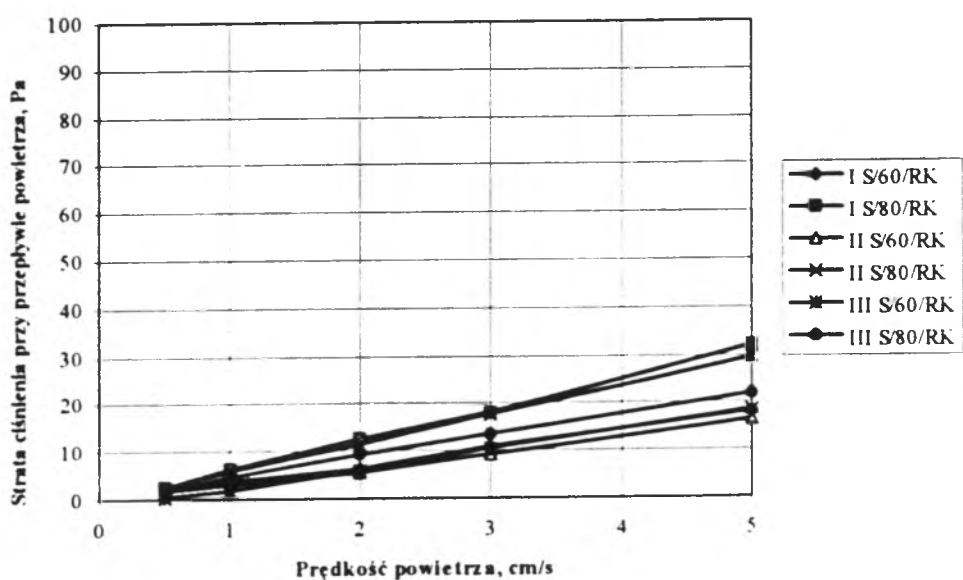
Rysunek 4.31. Porównanie charakterystyk straty ciśnienia dla włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych "PL" zagęszczonych w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej (ozn. "SP")



Rysunek 4.32. Porównanie charakterystyk straty ciśnienia dla włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych "PL" zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha (ozn. "RK")



Rysunek 4.33. Porównanie charakterystyk straty ciśnienia dla włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych "S" zagęszczonych w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej (ozn. "SP")



Rysunek 4.34. Porównanie charakterystyk straty ciśnienia dla włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien "S" zagęszczonych w suszarce aparatu Rapid-Koetha (ozn. "RK")

Porównując charakterystyki straty ciśnienia dla włóknin filtracyjnych wykonanych z włókien szklanych z dodatkiem 5% bielonych włókien celulozowych sosnowych (oznaczenie: I) (Rys. 4.24) można zauważyć zdecydowanie niższe wartości oporu przepływu dla próbek wykonanych z włókien szwedzkich niż dla tych wykonanych z

włókien polskich. Taka sama zależność (tj. mniejsze wartości oporu przepływu) dla włókien z włókien szwedzkich występuje w przypadku grup włókien oznaczonych symbolem II (z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy) (Rys. 4.25) i III (z dodatkiem 2% karboksymetylocelulozy i 1% Ipowodu P) (Rys. 4.26).

Wśród włókien wykonanych z polskich włókien szklanych o gramaturze 60 g/m² (Rys. 4.27) najlepsze wyniki (tj. mniejsze wartości straty ciśnienia dla tych samych prędkości napływu powietrza) uzyskano dla próbek zagęszczonych w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej (SP).

W przypadku włókien "PL" o gramaturze 80 g/m² (Rys. 4.28) najlepszą charakterystykę straty ciśnienia miała włóknina III PL/80/RK, a następnie włókniny suszone w suszarce powietrznej (SP).

W obu przypadkach nie zauważono wpływu zastosowanych dodatków na zwiększenie lub zmniejszenie wartości oporów przepływu powietrza. Stwierdzono natomiast, że zmniejszenie gramatury włókniny powoduje obniżenie wartości straty ciśnienia dla tych samych prędkości napływu powietrza.

Otrzymane podczas pomiarów wielkości oporów przepływu dla włókien "S" miały zdecydowanie mniejszy rozrzut wartości niż te otrzymane dla włókien "PL" (Rys. 4.29, Rys. 4.30). Ale także w tym przypadku niższymi wartościami straty ciśnienia charakteryzowały się próbki o niższej gramaturze.

Można zauważyć, że tak jak w przypadku włókien "PL", również włókniny "S" zagęszczone w warunkach swobodnych ("SP") miały lepsze charakterystyki straty ciśnienia. Wyjątek stanowi próbka oznaczona II S/80/RK, której charakterystyka pokrywała się z charakterystykami otrzymanymi dla wszystkich próbek "SP" (Rys. 4.31, Rys. 4.33).

W przypadku włókien "PL", zarówno zagęszczonych w warunkach swobodnych "SP", jak i zagęszczonych w suszarce "RK", mniejsze wartości oporów przepływu powietrza miały próbki o mniejszej gramaturze, poza jednym wyjątkiem jakim była próbka III PL/80/RK. Jej charakterystyka pokrywała się z linią uzyskaną dla próbki II PL/60/RK. Obie miały najmniejsze wartości straty ciśnienia wśród włókien oznaczonych symbolem "RK" (Rys. 4.32). Taka sama zależność występowała w przypadku włókien wykonanych ze szwedzkich włókien szklanych "S" (tzn. "SP" lepsze od "RK") (Rys. 4.33, Rys. 4.34).

Podsumowując można stwierdzić, że lepsze charakterystyki straty ciśnienia przy przepływie powietrza miały włókniny:

1. wykonane z włókien szklanych szwedzkich "S",
2. o mniejszej gramaturze (wynoszącej 60 g/m²),
3. zagęszczane w warunkach swobodnych w przewiewowej suszarce powietrznej.

Ad. 1. Włókna szklane szwedzkie "S" zastosowane do wykonania włókien filtracyjnych były mniej jednorodne pod względem wielkości średnic niż włókna polskie "PL".

Ponad 57% włókien polskich miało średnice zawierające się w przedziale $0.4 \div 1.2 \mu\text{m}$. W przypadku włókien szwedzkich nie było tak wyraźnie wyodrębnionego przedziału wymiarowego średnic. Można zauważyć 4 przedziały wymiarowe zawierające ponad 10% zmierzonych średnic włókien szwedzkich. Były to przedziały: $1.2 \div 1.6 \mu\text{m}$, $1.6 \div 2.0 \mu\text{m}$, $2.4 \div 2.8 \mu\text{m}$, $3.6 \div 4.0 \mu\text{m}$ (Rozdział 4.3.2).

Na podstawie analizy charakterystyk straty ciśnienia w powiązaniu z zastosowanymi włóknami szklanymi, można stwierdzić wpływ niejednorodności włókniny wykonanej z włókien szklanych na zmniejszenie wartości oporów przepływu powietrza w porównaniu z wartościami uzyskanymi dla struktur bardziej jednorodnych ("PL").

Ad. 2, 3: Otrzymanie lepszych charakterystyk straty ciśnienia dla włóknin o mniejszej gramaturze i o strukturze pulchniejszej o lepiej rozdzielonych włóknach wydaje się oczywiste i nie powinno budzić kontrowersji.

Przedstawione na Rysunku 4.29 charakterystyki straty ciśnienia dla włóknin wykonanych z włókien szwedzkich o gramaturze 60 g/m^2 miały najniższe wartości oporu przepływu wśród wszystkich przebadanych materiałów.

Liniowy charakter wszystkich zależności straty ciśnienia od prędkości powietrza potwierdził założenie o jego laminarnym przepływie.

4.6.2. Stanowisko badawcze i metodyka pomiaru straty ciśnienia przy przepływie mgły olejowej

W Rozdziale 4.5 omówiono metodykę przeprowadzania pomiarów testem mgły olejowej oraz przedstawiono schemat stanowiska (Rysunek 4.22). Otrzymane wyniki pomiarów były niezbędne do przeprowadzenia porównania włóknin, w oparciu o tzw. kryterium dobroci filtra, znajdującego się w Rozdziale 7.4.2.

4.7. Ocena wpływu oddziaływania ładunku elektrostatycznego

Na charakter ruchu ziaren pyłu w sąsiedztwie elementów filtracyjnych, a w efekcie na prawdopodobieństwo ich osadzania na włóknach, wpływać mogą, oprócz innych mechanizmów filtracyjnych, także siły elektrostatycznego oddziaływania zarówno między samymi ziarnami, jak i między ziarnami a elementami filtracyjnymi [35]. Występowanie sił elektrostatycznych może w znaczny sposób wpłynąć na końcowy efekt procesu filtracji aerozolu podwyższając jego skuteczność (Rozdział 3.3.5).

Ze względu na ograniczone możliwości, dla potrzeb niniejszej pracy zbadano jedynie ładunek elektrostatyczny znajdujący się na włókninach. Z braku technicznych możliwości przeprowadzenia pomiarów nie uwzględniono w badaniach stanu elektrycznego ziaren aerozolu testowego.

Korzystając z puszki Faradaya znajdującej się na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej w 1995 roku określono wielkości ładunku elektrostatycznego, jakimi charakteryzowały się próbki włóknin filtracyjnych wykorzystywane dla potrzeb niniejszej pracy.

Dla wszystkich próbek ładunek elektrostatyczny zawierał się w zakresie $-0.001 \div -0.003 \mu\text{C}$ (dokładność pomiaru $\pm 0.001 \mu\text{C}$).

Podawana w literaturze [1], [27], [35] wielkość ładunku elektrostatycznego elektretowych materiałów filtracyjnych oznaczana jako λ_w [C/m] odniesiona jest do jednostkowej długości włókna, z którego jest wytworzony materiał. λ_w dla rzeczywistych włókien elektretowych zależy od technologii ich wytwarzania.

I tak liniowa gęstość ładunku elektrostatycznego może przyjąć następujące wartości [27]:

- dla włókniny z włókien elektretowych uzyskanej techniką przędzenia:
 $\lambda_w = 6 \cdot 10^{-11} \text{C/m}$,
- dla włókniny z elektretowych włókien wełnianych pokrytych warstwą żywicy:
 $\lambda_w = 1 \cdot 10^{-10} \text{C/m}$

W celu porównania otrzymanych wyników z danymi literaturowymi dotyczącymi materiałów posiadających istotny dla procesu zatrzymania cząstek ładunek elektrostatyczny, poniżej określono wartość jego liniowej gęstości dla badanych dla potrzeb niniejszej pracy włókien.

Długość włókien w materiale filtracyjnym obliczono z zależności [37]:

$$L_F = \frac{\alpha \cdot H}{\pi \cdot a_w^2} \quad (4.4)$$

$$L_C = L_F \cdot F \quad (4.5)$$

gdzie:

- a_w promień włókna, m
- F powierzchnia materiału filtracyjnego, m^2
- H grubość materiału filtracyjnego, m
- L_C całkowita długość włókien w próbce, m
- L_F długość włókien w materiale filtracyjnym na jednostkę jego powierzchni, m/m^2
- α gęstość upakowania, -

Natomiast wielkość ładunku elektrostatycznego odniesioną do jednostkowej długości włókna określono z zależności:

$$Q_L = \frac{Q}{L_C} \quad (4.6)$$

gdzie:

- L_C całkowita długość włókien w próbce, m
- Q ładunek elektrostatyczny, C
- Q_L ładunek elektrostatyczny odniesiony do jednostkowej długości włókna, C/m

Obliczone na podstawie powyższych wzorów wielkości ładunku elektrostatycznego przyjmują wartości $10^{-13} \div 10^{-12}$ C/m. Wartości niższe uzyskano dla próbek

wykonanych z cieńszych włókien polskich, wartości wyższe dla próbek z włókien szwedzkich.

Porównując otrzymane wartości ładunku elektrostatycznego odniesionego do 1 m długości włókna z danymi podawanymi w [27], [35] dla materiałów elektretowych można stwierdzić, że badane włókniny raczej nie należą do tej właśnie grupy materiałów filtracyjnych. Charakteryzują się one bowiem mniejszą wielkością ładunku od tej podawanej dla typowych elektretów.

Podczas analizy wykresów teoretycznych i rzeczywistych skuteczności filtracji (Rozdział 5.2 oraz Załącznik 1) zauważono zwiększenie wartości skuteczności filtracji w warunkach pomiarowych w stosunku do przebiegu krzywych uzyskanych w oparciu o wybrane modele matematyczne. Można to wyjaśnić występowaniem podczas eksperymentów sił elektrostatycznych nie uwzględnionych w rozważaniach teoretycznych. Siły te mogły pojawić się, jeśli ziarna aerozolu posiadały pewien ładunek elektrostatyczny i zatrzymywały się na słabo naładowanym lub obojętnym materiale filtracyjnym. Jednak, jak stwierdzono wcześniej, ze względów technicznych nie zostały przebadane wielkości ładunku, jaki mogły posiadać ziarna.

Dodatkowym argumentem, który by mógł przemawiać za możliwością pominięcia w rozważaniach teoretycznych wpływu zjawiska elektrostatycznego na końcowy efekt oczyszczania powietrza, są informacje zawarte w [17], a dotyczące wyników badań m.in. papierów filtracyjnych wykonanych z włókien polskich U-10. Pomiary te przeprowadzono w Instytucie Celulozowo-Papierniczym w Łodzi m.in. pod kątem występowania ładunku na powierzchni materiałów filtracyjnych. Zarówno metodyka formowania tych włókien, jak i zastosowane włókna szklane U-10, były takie same jak te wykorzystane dla potrzeb niniejszej pracy. W [17] stwierdzono, że dodanie żywicy kationowej Ipowod P spowodowało neutralizację ładunku elektrostatycznego na powierzchni mikrowłókien szklanych, w wyniku czego zmalała ruchliwość elektroforetyczna. Punkt neutralności pojawił się przy domieszce około 0.5% tej żywicy, a dalsze jej dodawanie powodowało powolny wzrost elektrododatniego ładunku na powierzchni włókna szklanego.

Przy produkcji omawianych w niniejszej pracy próbek oznaczonych symbolem III również dodano żywicę kationową Ipowod P w ilości 1% masy włókien szklanych. Należało zatem się spodziewać, że grupa włókien oznaczona symbolem III będzie miała najniższe ujemne wartości ładunku elektrostatycznego lub niewielki ładunek dodatni. Jednak z przeprowadzonych pomiarów wynikało, że niezależnie od zastosowanych (lub nie) podczas produkcji rodzajów włókien i dodatków, uzyskano bardzo do siebie zbliżone ujemne wartości ładunku elektrostatycznego w granicach $(-0.001 \div -0.003) \mu\text{C} \pm 0.001$. A zatem było prawdopodobne, że Ipowod P dodany do włókien grupy III nie wpłynął na zmniejszenie elektroujemnego ładunku lub inne zastosowane dodatki również obniżają wielkość ładunku elektrostatycznego. Ze względów technicznych nie przeprowadzono badań porównawczych w Instytucie Celulozowo-Papierniczym w Łodzi, zatem w przypadku włókien oznaczonych jako I i II trudno stwierdzić, co wpłynęło na wielkość ładunku porównywalną z tą uzyskaną

dla III grupy włókien. Choć w przypadku I grupy włókien nawet niewielka (5%) zawartość włókien celulozowych mogła wpłynąć na obniżenie wielkości ładunku, ponieważ charakteryzują się one niską zdolnością do ładowania elektrostatycznego [80].

Opierając się na uzyskanych informacjach można natomiast stwierdzić, że dodany do II grupy włókien związek anionowy CMC powinien powodować lekkie ładowanie ujemne włókien, co potwierdziło się podczas pomiarów z wykorzystaniem puszki Faradaya.

Podsumowując powyższe rozważania można stwierdzić, że niezależnie od rodzajów włókien i domieszek zastosowanych podczas formowania włókien, uzyskano niewielkie ujemne wielkości ładunku elektrostatycznego występującego na powierzchni tych materiałów, mniejsze od ładunku występującego w przypadku włókien elektretowych. Można więc przyjąć, że pominięcie w rozważaniach teoretycznych wpływu występowania zjawiska elektrostatycznego na skuteczność filtracji nie powodowało istotnego błędu. Szczególnie, że w [35] stwierdzono, że zwłaszcza przy słabym oddziaływaniu elektrostatycznym elementów filtracyjnych trudno jest analitycznie określić prawdopodobieństwo elektrostatycznego osadzania ziaren na powierzchni włókien.

Niemniej jednak w przyszłości, podczas kolejnych badań, powinno się uwzględnić wpływ sił elektrostatycznych na skuteczność osadzania cząstek na włóknach także w przypadku niskich wartości ładunków elektrostatycznych, a nie tylko w przypadku włókien elektretowych. W wyniku ich oddziaływania nawet niewielkie zwiększenie skuteczności filtracji w obszarze cząstek submikronowych, najbardziej przenikających przez włókninę, pozwala na lepszą ochronę zdrowia ludzi czy jakości przeprowadzanego procesu produkcyjnego. W Rozdziale 3.3.5 znajdują się dodatkowe informacje dotyczące występującego w elektretach zjawiska elektrostatycznego wykorzystywanego do zwiększenia skuteczności filtracji przy jednoczesnym spadku straty ciśnienia.

5. ANALIZA PORÓWNAWCZA TEORETYCZNYCH I RZECZYWISTYCH WARTOŚCI NUMERYCZNEJ PRZEDZIAŁOWEJ SKUTECZNOŚCI FILTRACJI

5.1. Ocena wpływu oddziaływania poszczególnych mechanizmów filtracyjnych w wybranym zakresie pomiarowym

Poniżej przedstawiono analizę oddziaływania podstawowych mechanizmów filtracyjnych, przeprowadzoną w oparciu o zasady kierujące procesem filtracji.

Autorzy badań dotyczących osadzania cząstek w filtrze włóknistym wykazali, że dominującym mechanizmem filtracyjnym dla submikronowych cząstek jest dyfuzja brownowska [37]. Zjawisko dyfuzji występuje w przypadku cząstek o średnicach do 1 μm . A zatem można stwierdzić, że w przeprowadzanych eksperymentach

dominującym mechanizmem filtracyjnym powinno być zjawisko dyfuzji molekularnej, co nie wyklucza możliwości występowania innych, oprócz dyfuzji, zjawisk.

Oprócz dyfuzji na osadzanie ziaren wpływa, choć w zdecydowanie mniejszym stopniu, występowanie bezwładnościowego zjawiska zatrzymania cząstek na włóknach. Jak podano w [81] mechanizm ten ma jednak niewielkie znaczenie w przypadku cząstek o średnicach mniejszych od 1 μm (nawet w zakresie prędkości do 1 m/s) i jest praktycznie pomijalny dla cząstek $\leq 0.2 \mu\text{m}$. Natomiast według [44] graniczną wielkością ziaren, powyżej której zjawisko to ma nieznaczny wpływ na skuteczność filtracji jest średnica cząstek wynosząca 1.4 μm . Jako kolejne kryterium oceny wpływu tego zjawiska na osadzanie ziaren podaje się wartość krytyczną liczby Stokesa. W przypadku, gdy $St_k < St_{kKR}$ zakłada się, że nie występuje zjawisko osadzania cząstek w wyniku bezwładności [35], [81], [74]. Jest to założenie prawdziwe jedynie w przypadku występowania tylko i wyłącznie mechanizmu inercyjnego. Jednocześnie w opisie modelu wachlarzowego autorzy stwierdzili, że przy $St_k < 0.2$ mechanizm bezwładnościowy nie ma wpływu na przeskok najbardziej przenikających cząstek [37]. Ze względu na wskazywane przez różnych autorów różne graniczne wartości liczby Stokesa (Rozdział 3.3.2) trudno z całym przekonaniem oprzeć rozważania na przedstawianych w literaturze danych [35], [37], [74]. Gdyby jednak przyjąć jako wartość krytyczną liczby Stokesa wartość średnią podawaną w cytowanych pracach, tzn. wartość $St_{kKR} = 0.20$, można wówczas w przybliżeniu określić graniczne średnice cząstek, powyżej których nie powinno się brać pod uwagę wpływu zjawiska bezwładnościowego na całkowitą skuteczność filtracji (Tabela 5.1).

Tabela 5.1. Graniczne wartości średnic cząstek, powyżej których występuje zjawisko bezwładności (dla $St_{kKR} = 0.2$ i $u = 3 \text{ cm/s}$)

Symbol włókniny	Graniczna średnica cząstek, μm
I PL/60/SP... I PL/80/RK	1.25
I S/60/SP... I S/80/RK	1.65
II PL/60/SP... II PL/80/RK	0.85
II S/60/SP... II S/80/RK	1.35
III PL/60/SP... III PL/80/RK	0.85
III S/60/SP... III S/80/RK	1.35

Biorąc pod uwagę wartość krytyczną liczby Stokesa i odpowiadające jej graniczne wartości średnic cząstek można zauważyć, że z uwagi na wykorzystany w badaniach aerozol o średnicach $\leq 1 \mu\text{m}$ (maksymalny wymiar cząstek w ostatnim kanale wymiarowym licznika cząstek aerozolu, wielkość średnia średnic dla tego kanału: 0.75 μm) zjawisko bezwładnościowego zatrzymania ziaren w większości przypadków (bez włóknin jednoskładnikowych wykonanych tylko z polskiego włókna szklanego) nie powinno mieć znaczącego wpływu na wartość sumarycznego współczynnika osadzania cząstek wynikającą z oddziaływania wszystkich mechanizmów filtracyjnych. Należy jednak pamiętać o tym, że efekt poślizgu ($Kn \neq 0$) może spowodować podwyższenie depozycji cząstek na włóknach w wyniku zjawiska bezwładności [37]. Podczas przeprowadzania pomiarów liczba Knudsen

przyjmowała wartości z przedziału $0.047 \div 0.114$, a więc faktycznie takie zjawisko mogło sporadycznie wystąpić.

Zgodnie z danymi zawartymi w Tabeli 3.1 (Rozdział 3.1.4) w przypadku podanych wartości liczby Knudsena występuje nieciągłość przepływu spowodowana występowaniem poślizgu cząstek na powierzchni włókien. Ponieważ prawo Stokesa oraz inne zależności określające opory ruchu ziarna opracowano przy założeniu, że gaz jest ośrodkiem ciągłym, niezbędne jest wprowadzenie poprawek uwzględniających "ślizganie się" ziaren między cząsteczkami gazu i na powierzchni włókien, a także wynikające z tego zwiększenie rzeczywistych prędkości ich ruchu. Prowadzi to do wzrostu wartości współczynnika osadzania w wyniku jednoczesnego oddziaływania zjawiska zaczepienia i bezwładności η_{RSik} . Zjawisko poślizgu zostało uwzględnione w omawianych modelach przez uwzględnienie współczynnika Cunninghama, a w modelach Stieczkiny, Kirsza i Fuksa dodatkowo przez wprowadzenie do obliczeń liczby Knudsen.

Kolejnym zjawiskiem filtracyjnym brany pod uwagę przy określaniu sumarycznego współczynnika osadzania cząstek jest mechanizm zaczepienia. Wpływ tego zjawiska na wielkość skuteczności filtracji rośnie wraz ze wzrostem wymiarów cząstek, a maleje ze wzrostem średnicy włókien [22]. Jego występowanie zauważa się w przypadku bardzo drobnych ziaren. Według [44] zjawisko zaczepienia należy brać pod uwagę dla ziaren o średnicach $0.07 \div 3.5 \mu\text{m}$. Obok zjawiska dyfuzji molekularnej będzie ono miało istotny wpływ na całkowitą skuteczność filtracji określaną podczas pomiarów omawianych w niniejszej pracy.

Następny mechanizm filtracyjny - osadzanie grawitacyjne - można rozważać w przypadku ziaren o średnicy większej od 1 mm i przy niewielkich prędkościach przepływu ($<5 \text{ cm/s}$). Dla zastosowanych w badaniach ziaren submikronowych zjawisko to nie ma wpływu na skuteczność ich osadzania, a więc można pominąć je w rozważaniach.

Wpływ zjawiska osadzania w wyniku występowania sił elektrostatycznych na całkowitą skuteczność osadzania ziaren opisano w Rozdziałach 3.3.5 i 4.7.

Podsumowując powyższe rozważania, można stwierdzić, że najbardziej istotnymi mechanizmami filtracyjnymi, które mogły wpłynąć na wartość skuteczności filtracji i jej zmienność podczas pomiarów były: dyfuzja molekularna oraz zaczepienie. Potwierdziło to opinię przedstawioną w [37], stwierdzającą, że są to dwa najważniejsze zjawiska występujące podczas filtracji wysokoskutecznej. Natomiast zjawisko osadzania bezwładnościowego, jeśli już pojawiło się, nie powinno wywrzeć dużego wpływu na przebieg procesu oczyszczania powietrza. Z całą pewnością nie można jednak stwierdzić, że podczas pomiarów zjawisko to nie miało miejsca.

W toku badań, z powodów technicznych, nie przeprowadzono pomiarów dotyczących oceny wielkości ładunku, jaki mógł pojawić się na cząstkach. Określono natomiast wartość ładunku elektrostatycznego występującego w materiałach filtracyjnych. Na tej podstawie można stwierdzić, że badane włókniny nie należały do grupy materiałów elektretowych. A więc, gdyby założyć, że cząstki również nie posiadały ładunku elektrostatycznego, można uznać, że nie pojawiłoby się zjawisko

osadzania elektrostatycznego. Trzeba jednak wziąć pod uwagę, że gdyby tak powzięte arbitralnie założenie nie było zgodne z prawdą, mogłoby to wyjaśnić pewne różnice występujące pomiędzy analizą teoretyczną, podczas przeprowadzania której pominięto zjawisko elektrostatyczne, a wartościami rzeczywistymi skuteczności filtracji.

5.2. Ocena zgodności wyników badań z wartościami obliczonymi analitycznie dla wybranych modeli

Wykresy przedstawiające zarówno teoretyczne, jak i rzeczywiste wartości skuteczności oraz przeskołu frakcyjnego sporządzono dla wszystkich omawianych w Rozdziale 4.2.3 włóknin filtracyjnych.

Na podstawie sześciu modeli matematycznych filtracji powietrza (przedstawionych i omówionych w Rozdziale 3.4.2) sporządzono matryce obliczeniowe (Microsoft EXCEL 5.0) pozwalające na określenie teoretycznej wartości skuteczności filtracji i współczynnika przeskołu dla poszczególnych frakcji aerozolu. Przeprowadzone w ten sposób obliczenia skonfrontowano z wynikami przeprowadzonych eksperymentów mających na celu określenie ich rzeczywistej wartości (opisanych w Rozdziale 4.4).

Do przeprowadzenia analizy porównawczej wybrano:

1. model matematyczny Daviesa,
2. model matematyczny Friedlandera - Whitbyego,
3. model matematyczny Torgensona,
4. model matematyczny Fuksa - Stieczkiny - Kirsza (równoległy),
5. model matematyczny Kirsza - Stieczkiny (wachlarzowy) bez uwzględnienia niejednorodności budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (model monodispersyjny),
6. model matematyczny Kirsza - Stieczkiny (wachlarzowy) z uwzględnieniem niejednorodności budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (model polidispersyjny),
7. rzeczywistą wartość numerycznej przedziałowej skuteczności filtracji lub numerycznego frakcyjnego przeskołu ziaren.

Na wykresach zastosowano cyfrowe oznaczenie krzywych zgodne z powyższym wykazem.

Pomiary wykonano dla zakresu średnic o dolnej i górnej granicy wymiarowej wynoszącej $0.0316 \div 1 \mu\text{m}$. Ze względu na podawanie przez licznik ilości ziaren w odniesieniu do kanałów pomiarowych, zdefiniowanych przez średnią średnicę geometryczną, w pracy używa się jako zakresu wymiarowego przedziału $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$, pamiętając jednak, że w rzeczywistości maksymalnym wymiarem ziaren był $1 \mu\text{m}$.

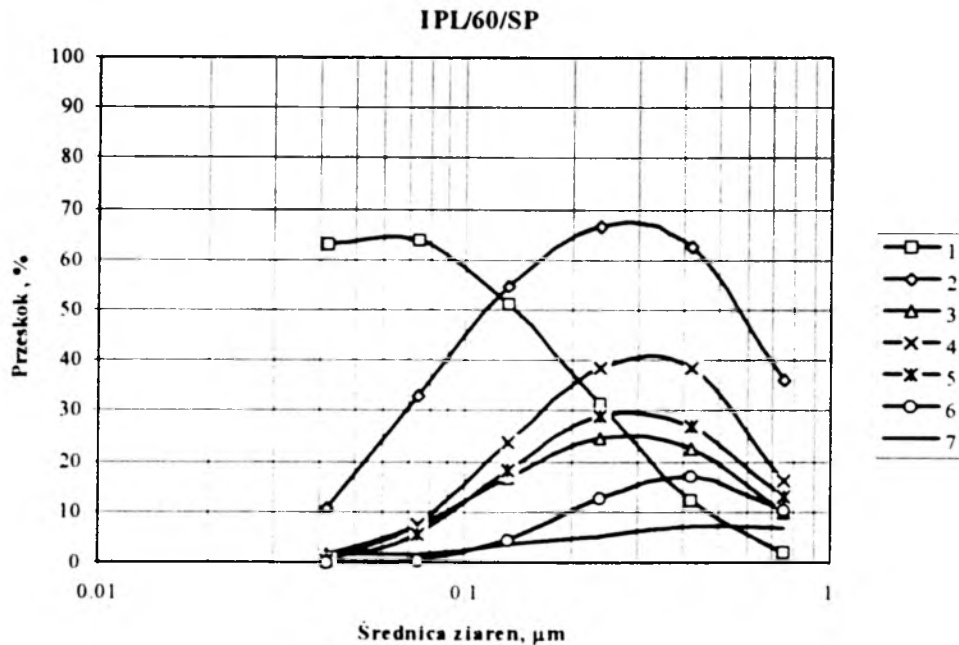
Oprócz przedstawienia wyników teoretycznych i rzeczywistych dla zakresu wymiarowego ziaren, dla którego przeprowadzono pomiary, tj. $(0.0316) 0.0422 \div 0.75 (1) \mu\text{m}$, wykonano również wykresy dla poszerzonego zakresu wielkości

średnic ziaren (0.0316) $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$. Wykresy te pozwoliły na zorientowanie się, jaki mógłby być kształt charakterystyki filtracyjnej, gdyby przeprowadzono dodatkowe badania laboratoryjne. Mają one charakter jedynie teoretyczny, ponieważ zakres badań ograniczony był do ziaren submikronowych (o średnicach mniejszych od $1 \mu\text{m}$). Jednak interesujący jest fakt całkowitej zgodności różnych modeli w zakresie średnic większych od $2 \mu\text{m}$ i mniejszych od $0.02 \mu\text{m}$ (wyjąwszy model Daviesa).

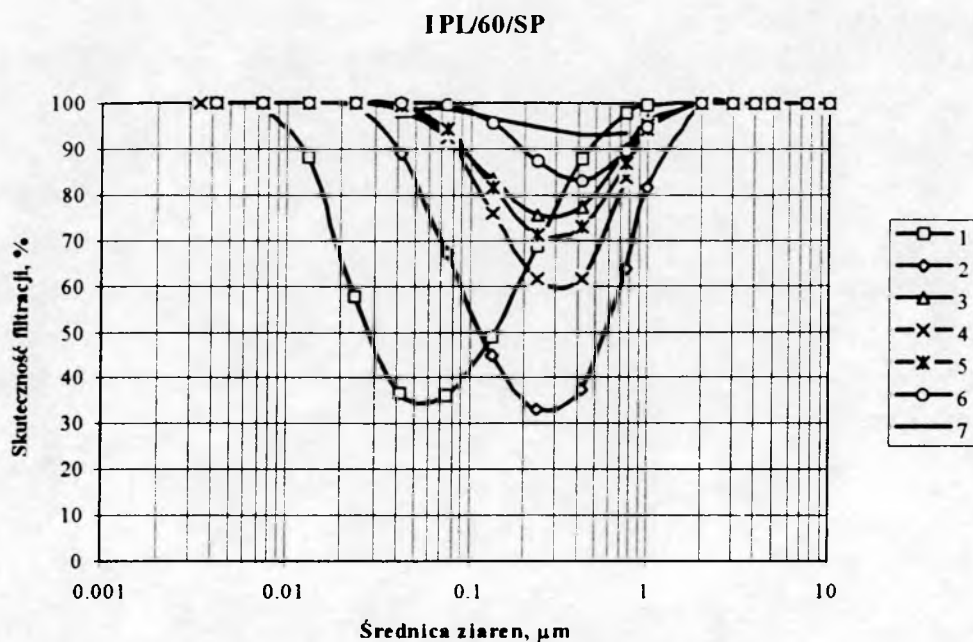
Na wykresach o zakresie wymiarowym ziaren $0.0422 \div 0.75 (1) \mu\text{m}$ przedstawiono krzywe numerycznego frakcyjnego przeskoku. Natomiast na wykresach o zakresie wymiarowym ziaren $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$ znajdują się krzywe numerycznej przedziałowej skuteczności filtracji.

Zestawienie wykresów dla wszystkich włókien znajduje się w Załączniku 1.

Na Rysunkach 5.1 i 5.2 zamieszczono przykładowe wykresy dla włókniny I PL/60/SP.



Rysunek 5.1. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 (1) \mu\text{m}$



Rysunek 5.2. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach 0.0042÷10 µm

Analizując charakterystyki przedstawiające skuteczność filtracji w funkcji średnicy cząstek aerozolu, a wykonane w oparciu o wybrane modele matematyczne oraz wyniki przeprowadzonych eksperymentów, można stwierdzić, że:

- w przypadku włóknin wykonanych z włókien szklanych z 5% dodatkiem włókien celulozowych (oznaczenie: I) eksperymentalnie określona skuteczność jest wyższa od wielkości wynikających z analizy modeli matematycznych. Na wykresach najbliższej tej krzywej znajduje się linia stworzona w oparciu o model wachlarzowy polidispersyjny. Następnie, kolejno, coraz dalej od charakterystyki pomiarowej leżą wykresy skuteczności uzyskane na podstawie
 - ◆ modelu Torgensona (z wyjątkiem próbki I PL/80/RK, dla której, jeśli chodzi o usytuowanie względem krzywej pomiarowej, na trzecim miejscu należy wymienić model wachlarzowy monodispersyjny, a dopiero na czwartym - model Torgensona),
 - ◆ modelu wachlarzowego monodispersyjnego (z wyjątkiem włókniny I PL/80/RK - wyjaśnienie j.w.),
 - ◆ modelu równoległego Fuksa-Stieczkiny-Kirsza,
 - ◆ modelu Friedlandera-Whitbyego,
 - ◆ modelu Daviesa.

Zauważono, że przebieg krzywej uzyskanej na podstawie modelu Daviesa najbardziej odbiega od charakteru pozostałych linii. Wynika to z przesunięcia obszaru największej przenikalności w stronę mniejszych wymiarów cząstek (0.004÷0.005 µm) dla modelu Daviesa w porównaniu z pozostałymi modelami.

Dla modelu wachlarzowego polidispersyjnego obszar ten występuje dla cząstek o średnicy $0.4 \mu\text{m}$, a dla pozostałych modeli dla cząstek $0.3 \div 0.4 \mu\text{m}$.

Charakterystyka skuteczności filtracji stworzona w oparciu o wyniki pomiarów w zakresie średnic cząstek, dla którego przeprowadzono badania, w całym swoim przebiegu, jest krzywą malejącą. Ze względu na ograniczenie zakresu cząstek stosowanego aerozolu do $1 \mu\text{m}$ (maksymalny wymiar cząstek w ostatnim kanale wymiarowym licznika cząstek o średniej wartości średnicy $0.75 \mu\text{m}$) jedynie można stwierdzić, że obszar największej przenikalności będzie występował dla cząstek większych od $0.75 (1) \mu\text{m}$. Nie można zatem dokładnie określić wielkości średnic ziaren, ale z całą pewnością można zauważyć, że obszar ten będzie przesunięty w kierunku ziaren o większych średnicach w porównaniu ze wszystkimi omawianymi modelami teoretycznymi.

Fakt, że najbliższa charakterystyce pomiarowej jest krzywa uzyskana dla modelu wachlarzowego, najbardziej według jego twórców zbliżonego do rzeczywistych warunków osadzania cząstek w filtrze (co zostało wcześniej omówione), nie powinien budzić wątpliwości. Szczególnie w przypadku omawianej grupy włókien dwuskładnikowych, model wachlarzowy, z poprawką opisującą polidispersyjność włókien, rzeczywiście powinien najlepiej przybliżać charakterystykę pomiarową.

Uzyskanie wyższych skuteczności filtracji w warunkach rzeczywistych w porównaniu z wielkościami otrzymanymi w oparciu o modele matematyczne może być związane z nieuwzględnieniem w opisie takich zjawisk jak mechanizm elektrostatyczny czy siły oddziaływania międzycząsteczkowego.

- w przypadku włókien jednoskładnikowych z włókien szklanych z dodatkiem 2% substancji deflokulującej - karboksymetylocelulozy (oznaczenie: II) najwyższe wartości skuteczności przyjmują
 - ◆ dla próbek wykonanych z włókien polskich (oznaczenie: PL) charakterystyki skuteczności otrzymane w oparciu o modele: wachlarzowy polidispersyjny i Torgensona oraz wielkości rzeczywiste (wszystkie trzy są do siebie bardzo zbliżone),
 - ◆ dla próbek wykonanych z włókien szwedzkich (oznaczenie: S) najwyższą skutecznością charakteryzują się krzywe pomiarowe. Następne w kolejności to linie otrzymane na podstawie modelu Torgensona i wachlarzowego polidispersyjnego.

Pozostałe charakterystyki występują w następującej kolejności:

- ◆ model Friedlandera-Whitbyego,
- ◆ model wachlarzowy monodispersyjny,
- ◆ model równoległy Fursa-Stieczkiny-Kirsza,
- ◆ model Daviesa.

Obszary przenikalności cząstek są takie same jak dla włókien oznaczonych jako I, zarówno w przypadku krzywych teoretycznych, jak i krzywej pomiarowej.

- w przypadku włókien jednoskładnikowych z włókien szklanych z dodatkiem 2% substancji deflokulującej - karboksymetylocelulozy i 1% substancji flokulującej - Ipowodu P (oznaczenie: III):
 - ◆ dla próbek wykonanych z włókien polskich (z wyjątkiem próbki III PL/60/SP) bardzo blisko siebie znajdują się krzywe uzyskane na podstawie modeli: wachlarzowego polidispersyjnego oraz Torgensona, ale nie uzyskano najwyższych wartości skuteczności dla charakterystyki pomiarowej. Dla próbki III PL/60/SP najbliższy wartościom pomiarowym jest model Friedlandera-Whitbyego.
 - ◆ dla próbek wykonanych ze szklanych włókien szwedzkich najbliżej położone w stosunku do charakterystyki rzeczywistej są zarówno krzywe otrzymane według modelu wachlarzowego polidispersyjnego, jak i modelu Torgensona, chociaż żadna z nich nie znajduje się blisko niej.

Następnie, coraz dalej położone są od charakterystyk pomiarowych krzywe otrzymane według:

- ◆ modelu Friedlandera-Whitbyego (dla włókien "S"),
- ◆ modelu wachlarzowego monodispersyjnego (dla włókien "PL" i "S"),
- ◆ modelu równoległego Fuksa-Stieczkiny-Kirsza (dla włókien "PL" i "S"),
- ◆ modelu Daviesa.

Usytuowanie charakterystyki pomiarowej w stosunku do innych krzywych dla włókien "PL" jest podobne jak w przypadku II grupy próbek. Natomiast dla włókien "S" zawsze linią o najwyższych wartościach skuteczności filtracji jest krzywa pomiarowa.

Obszary przenikalności cząstek - jak dla włókien oznaczonych jako I i II.

Dla wszystkich próbek włókien jednoskładnikowych nie można jednoznacznie wskazać modelu najlepiej przybliżającego stan rzeczywisty. To, że dla połowy takich próbek najbliżej charakterystyki rzeczywistej znajduje się krzywa otrzymana na podstawie modelu wachlarzowego politropowego wynika prawdopodobnie z niejednorodności struktury włókien, która (jak z tego wynika) występuje również w przypadku zastosowania do wyprodukowania próbek włókien tylko jednego rodzaju włókien.

5.3. Ocena wiarygodności modeli na tle wyników badań

Analizując założenia modeli matematycznych oczekiwano, że największą wiarygodnością będzie charakteryzował się polidispersyjny model wachlarzowy, najbardziej zbliżający opis procesu filtracji do warunków rzeczywistych (m.in. uwzględniający skomplikowane strukturalnie włókniny, polidispersyjny aerozol).

Na podstawie przeprowadzonej analizy uzyskanych wykresów skuteczności filtracji otrzymanych zarówno na podstawie rozważań teoretycznych, jak i danych eksperymentalnych można stwierdzić, że:

- dla większości włókien modelami najlepiej przybliżającymi stan rzeczywisty są:

- ◆ model wachlarzowy polidispersyjny,
- ◆ model Torgensona,
- jedynie dla niektórych włókien charakterystyki otrzymane w oparciu o w/w modele prawie pokrywają się z charakterystyką pomiarową (próbki grupy II PL, III PL oprócz III PL/60/SP),
- w znacznej większości przypadków charakterystyki pomiarowe prezentują wyższe wartości skuteczności filtracji niż krzywe teoretyczne,
- dla próbek wykonanych z włókien "PL" otrzymano położone bliżej siebie krzywe teoretyczne i rzeczywiste niż dla włókien z włókien szwedzkich "S".
- we wszystkich modelach (oprócz modelu Daviesa) zaobserwowano występowanie obszaru największej przenikalności dla tego samego zakresu wymiarowego cząstek ($0.3 \div 0.4 \mu\text{m}$), natomiast dla warunków rzeczywistych obszar ten był przesunięty w stronę większych wymiarów ziaren tj. średnic większych od $0.75 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m}$),

Przyczyny zaobserwowanych rozbieżności mogą wynikać z:

- charakteryzowania się włókien szwedzkich większą średnicą, co spowodowało zapewne uzyskanie gorszych wartości skuteczności filtracji dla wykonanych z nich włókien,
- dużej niejednorodności struktury włókien, z których wykonano próbki zarówno jedno- jak i dwuskładnikowe,
- niejednorodnej budowy włókien,
- pominięcia w opisie teoretycznym mechanizmów, których występowanie mogło wpłynąć na polepszenia zdolności filtracyjnych włókien. Są to m.in.:
 - ◆ zjawisko elektrostatyczne,
 - ◆ zjawisko przyciągania międzycząsteczkowego.

W wyniku przeprowadzonych rozważań nie można jednoznacznie określić, który z omawianych modeli mógłby być uniwersalny i poprawnie opisując przebieg teoretycznej skuteczności filtracji wszystkich włókien, jednocześnie zbliżyć ją do krzywej otrzymanej w wyniku przeprowadzonych pomiarów.

Podczas analizy wyników zaobserwowano pewną zgodność dotyczącą występowania minimalnych wartości skuteczności filtracji dla zbliżonego zakresu wymiarowego ziaren pyłu zarówno w rozważaniach teoretycznych, jak i podczas rozpatrywania warunków rzeczywistych. Nie zauważono natomiast występowania takiej samej wartości skuteczności filtracji dla różnych średnic włókien i różnego sposobu formowania włókien.

Sytuacja ta sugeruje konieczność poszukiwania innego sposobu opisu procesu filtracji powietrza, tak aby przy jego pomocy uzyskać wysoką zgodność pomiędzy nowym modelem a danymi eksperymentalnymi.

6. OPIS PROCESU FILTRACJI W UJĘCIU PROBABILISTYCZNYM

6.1. *Zastosowanie liniowej regresji wieloparametrowej do opisu procesu filtracji*

W Rozdziale 3.4.3 przedstawiono zasadność wykorzystania w pracy modelu hybrydowego, wiążącego podstawową wiedzę o procesie filtracji z wynikami przeprowadzonych pomiarów skuteczności filtracji. Do opisu procesu filtracji powietrza przez mikrowłókniste materiały filtracyjne zastosowano jedną z metod modelowania hybrydowego, tj. liniową regresję wieloparametrową.

Analiza metodą regresji liniowej wieloparametrowej pozwoli sformułować zależność matematyczną umożliwiającą przewidywania numerycznej skuteczności filtracji powietrza w zależności od wartości jaką przyjmą pozostałe charakterystyczne wielkości. W wyniku zastosowania modelu tej klasy możliwe będzie znalezienie korelacji pomiędzy obserwowanymi wartościami numerycznej przedziałowej skuteczności a zmiennymi, które mogą wpłynąć na ich poziom. Zmienne te będą charakteryzować parametry strukturalne włókien i włóknin oraz pyłu, wprowadzając do modelu elementy deterministyczne. Model powstały w wyniku zastosowania regresji powinien określić, które z wprowadzanych zmiennych są lub nie są w stanie wyjaśnić zmienność skuteczności filtracji. Powinien także odpowiedzieć na pytanie, która ze zmiennych wpłynie najbardziej na poziom obserwowanych wartości skuteczności oraz pozwoli przewidywać ich poziom. Dopasowując parametry regresji do istniejącego zbioru wyników pomiarowych będzie można uzyskać pewne samosprawdzenie jego wiarygodności przez znalezienie wielkości przedziałów ufności wokół przewidywanych wartości oraz przez określenie współczynnika korelacji wielorakiej oceniającego występowanie słabej lub silnej zależności pomiędzy wartościami numerycznej przedziałowej skuteczności filtracji przewidywanymi przez powstały model a danymi pomiarowymi.

Modele powstałe w oparciu o regresję liniową, niewątpliwie użyteczne, mają swoje wady [77]. A mianowicie:

- zakres ich przewidywania jest ograniczony,
- w celu uzyskania wiarygodności, przy rozszerzeniu zbioru danych pomiarowych, konieczne jest ponowne przeliczenie współczynników regresji i sprawdzenie ich istotności,
- nie wolno rozszerzać obszaru stosowalności uzyskanych wyników poza zakres, dla którego została przeprowadzona analiza,
- nie wolno generalizować otrzymanych zależności matematycznych.

Mimo wymienionych wad, uznano, że model ten stanowi dobre podejście do rozpatrywanego procesu skuteczności filtracji, służąc do poszukiwania korelacji pomiędzy obserwowanymi wartościami numerycznej przedziałowej skuteczności filtracji, a wybranymi zmiennymi objaśniającymi. Selekcji zmiennych dokonano na

podstawie analizy niektórych istniejących hybrydowych modeli skuteczności filtracji. Modele te uwzględniają parametry przedstawione w Tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Parametry stosowane w hybrydowych modelach skuteczności filtracji

Parametr	Oznaczenie	Autor modelu
średnica ziaren pyłu	d_p	Nowicki M [51], Ptak [74].
gęstość pyłu	ρ_p	Ptak [74]
średnica włókna	d_w	Clarenburg [11], Nowicki M. [51], Ptak [74], Wirski [85]
długość wszystkich włókien	L_c	Clarenburg [11]
grubość materiału	H	Blasewitz [81], Nowicki M [51], Ptak [74], Wirski [85]
gęstość upakowania włóknin	α	Blasewitz [81], Clarenburg [11], Nowicki M [51], Ptak [74], Wirski [85]
prędkość filtracji	u	Blasewitz [81], Ptak [74], Wirski [85]

Dla porównania, w Tabeli 6.2 wskazano, w których deterministycznych modelach matematycznych (omówionych w Rozdziale 3.4.2), ich autorzy wykorzystali do opisu procesu poszczególne parametry włókien, włóknin i pyłu oraz prędkość i straty ciśnienia powietrza [15], [37], [39], [81].

Tabela 6.2. Parametry stosowane w deterministycznych modelach skuteczności filtracji

Parametr	Oznaczenie	Autor modelu
średnica pyłu	d_p	Davies, Friedlander-Whitby, Torgenson, Fuks i in., Kirsz i in.
średnica włókna	d_w	Davies, Friedlander-Whitby, Torgenson, Fuks i in., Kirsz i in.
gęstość włókien	ρ_w	Friedlander-Whitby
rozproszenie średnic włókien	δ	Kirsz i in.
grubość materiału	H	Davies, Friedlander-Whitby, Torgenson, Fuks i in., Kirsz i in.
gęstość upakowania włóknin	α	Davies, Friedlander-Whitby, Torgenson, Fuks i in., Kirsz i in.
masa powierzch. włóknin	M_p	Friedlander-Whitby
współczynnik niejednorodności materiału	ϵ	Fuks i in., Kirsz i in.
strata ciśnienia	Δp	Davies, Friedlander-Whitby, Torgenson, Fuks i in., Kirsz i in.
prędkość filtracji	u	Davies, Friedlander-Whitby, Torgenson, Fuks i in., Kirsz i in.

Można zauważyć, że w modelach deterministycznych występuje większa ilość parametrów strukturalnych niż w modelach hybrydowych. Oprócz nich do obliczeń wykorzystano wielkość straty ciśnienia powietrza.

Po przeanalizowaniu, uznano poniżej podany wybór zmiennych jako podstawę dla dokonanego w pracy opisu procesu filtracji. Charakteryzują one zarówno materiał filtracyjny, jak i wielkości oraz ilości ziaren zatrzymanych i przepuszczonych podczas procesu filtracji.

W zastosowanym modelu regresji jako zmienną zależną przyjęto numeryczną skuteczność filtracji powietrza η (%).

Natomiast zmienne niezależne stanowią średnice ziaren oraz parametry strukturalne badanych włókien filtracyjnych:

d_p	średnica ziaren, μm
d_w	średnica włókien, μm
H	grubość warstwy filtracyjnej, mm
ρ_w	gęstość włókien, kg/m^3
M_p	masa powierzchniowa włókniny (gramatura), kg/m^2
α	gęstość upakowania włókniny, -

Jak stwierdzono wcześniej, proponowane rozwiązanie oparte jest na założeniu niezmienności w czasie rozważanych parametrów, co jest słuszne dla filtracji ustalonej występującej w początkowym okresie procesu i rozpatrywanej w niniejszej pracy.

6.2. Analiza danych za pomocą pakietu statystycznego SPSS/PC+

6.2.1. Możliwości wykorzystania pakietu SPSS/PC+

W celu opisu procesu filtracji metodą regresji wieloparametrowej wykorzystano odpowiednią procedurę znajdującą się w pakiecie statystycznym SPSS/PC+ [48]. Zgodnie z powszechną opinią [48], [86] pakiet statystyczny SPSS/PC+ należy do grupy najlepszych i najczęściej stosowanych zestawów programów przeznaczonych do analizy statystycznej. Jest on szeroko rozpowszechniony w ośrodkach akademickich, instytutach badawczych zarówno o profilu ekonomicznym, socjologicznym i medycznym, jak i technicznym, przemysłowym itp.

SPSS jest pakietem uniwersalnym składającym się z wielu modułów, wśród których można wymienić [25]:

- moduł BASE wykonujący wszelkie operacje obróbki, selekcji i graficznej prezentacji danych, zawierający podstawowe procedury statystyczne takie jak: rozkłady częstości, tablice krzyżowe, statystyki opisowe, prostą analizę wariancji, współczynniki korelacji, analizę regresji,
- moduł PROFESSIONAL STATISTICS zawierający takie procedury jak: analiza skupień, analiza czynnikowa, skalowanie wielowymiarowe, analiza rzetelności testów, analiza regresji metodą najmniejszych kwadratów,
- moduł ADVANCED STATISTICS obejmujący zaawansowane procedury statystyczne takie jak: regresja log-liniowa, regresja Coxa, regresja nieliniowa, wielowymiarowa analiza wariancji, analiza probit, analiza przeżycia,
- moduł TRENDS zawierający zestaw technik analizy szeregów czasowych.

Poszukując najlepszego sposobu opisu rozpatrywanego zjawiska filtracji powietrza skorzystano z zawartego w pakiecie SPSS/PC+ modułu Advanced Statistics 4.0 for DOS umożliwiającego przeprowadzenie analizy statystycznej metodą regresji liniowej wieloparametrowej.

6.2.2. Modelowanie procesu filtracji metodą regresji liniowej wieloparametrowej

Podczas modelowania procesu filtracji powietrza za pomocą regresji liniowej wieloparametrowej podstawową zmienną (zwaną zależną lub objaśnianą) była przedziałowa numeryczna skuteczność filtracji powietrza (podawana w %) oznaczana we wszystkich zależnościach matematycznych przez symbol η .

Wartości przyjmowane przez zmienną zależną wyjaśniane były za pomocą jej związku z wieloma innymi zmiennymi niezależnymi (objaśniającymi).

Zmiennymi niezależnym, wybranymi w oparciu o znajomość procesu filtracji, były średnice ziaren aerozolu oraz parametry strukturalne badanych włókien filtracyjnych:

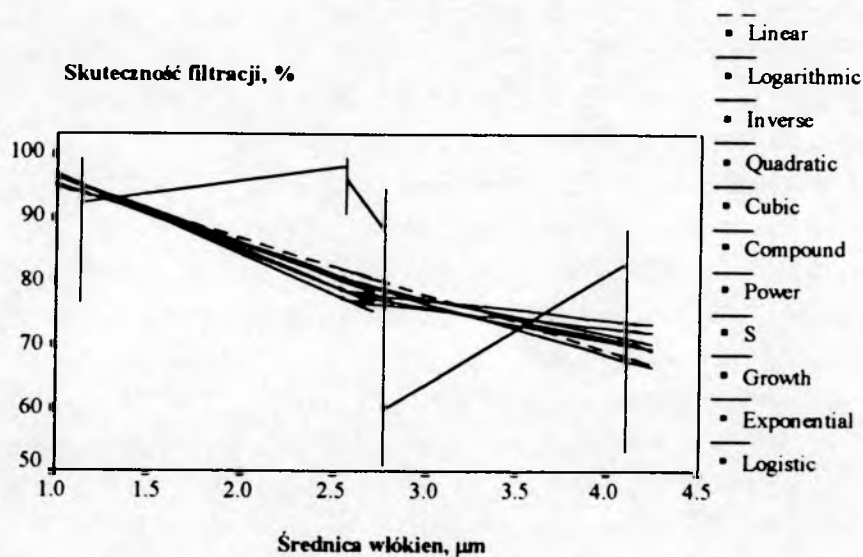
d_p	średnica ziaren, μm
d_w	średnica włókien, μm
H	grubość warstwy filtracyjnej, mm
ρ_w	gęstość włókien, kg/m^3
M_p	masa powierzchniowa włókniny (gramatura), kg/m^2
α	gęstość upakowania włókniny, -

Dla zmiennej zależnej (η) zebrano $n=144$ obserwacji, tzn. analizowano wartości przedziałowej numerycznej skuteczności filtracji wszystkich materiałów filtracyjnych wykonanych dla potrzeb pracy doktorskiej (tj. 24) o danych parametrach strukturalnych dla 6 wielkości średnic ziaren aerozolu. Ilość obserwacji ($n=144$) pozwoliła na stworzenie wiarygodnego modelu procesu filtracji. Analizowane dane zawarte są w Załączniku 1 oraz w Rozdziale 4.3.3.

Analizę regresji wykonano stosując metodę regresji krokowej. Metoda ta polegała na badaniu zmiennej zależnej w zależności od jednej zmiennej niezależnej, najlepiej wyjaśniającej zmiany zmiennej zależnej, potem od dwóch, trzech, aż do sześciu. Dokładniejszy opis tej metody zawarty jest w Załączniku 2.

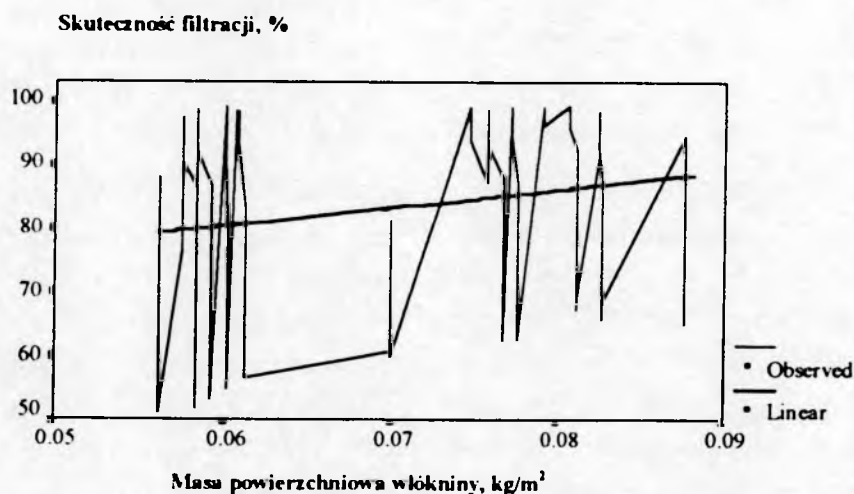
W przypadku takich zmiennych niezależnych jak grubość włókniny filtracyjnej (H), gęstość włókien (ρ_w), stosując dopasowanie liniowe nie uzyskano zadawalających wyników (obserwowane współczynniki istotności miały zbyt wysokie wartości). Z tego właśnie powodu zdecydowano się zastąpić zależności liniowe funkcjami krzywoliniowymi. Po przeprowadzonych porównaniach wielu możliwych dopasowań zastosowano funkcję wykładniczą w przypadku zmiennej H i funkcję logarymiczną dla zmiennej ρ_w . Aby móc nadal stosować metodę liniowej regresji wielorakiej zmieniono nieliniowe funkcje regresji na liniowe, podstawiając zamiast H zmienną $H^* = \exp(H)$, a zamiast zmiennej ρ_w zmienną $\rho_w^* = \ln(\rho_w)$. Zależność zmiennej zależnej od pozostałych zmiennych niezależnych opisano przy pomocy funkcji liniowych, nie wprowadzając żadnych zmian w ich zapisie.

Poniżej zamieszczono wykresy pokazujące końcowe dopasowanie funkcji dla poszczególnych zmiennych niezależnych (Rysunki 6.2÷6.6). Natomiast na Rysunku 6.1 przedstawione są próby dopasowania różnych funkcji dla zmiennej d_w , tj. dla średnicy włókien. Wykresy te uzyskano korzystając z programu SPSS.

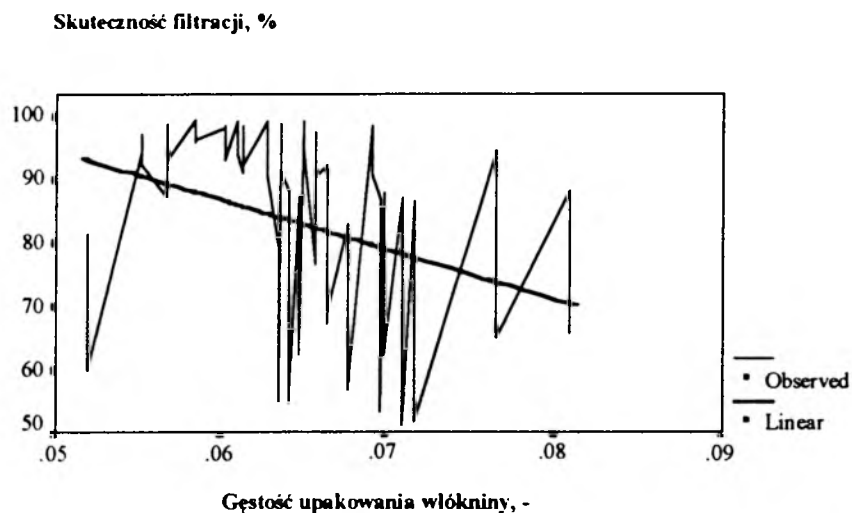


Rysunek 6.1. Dopasowanie funkcji dla średnicy włókien

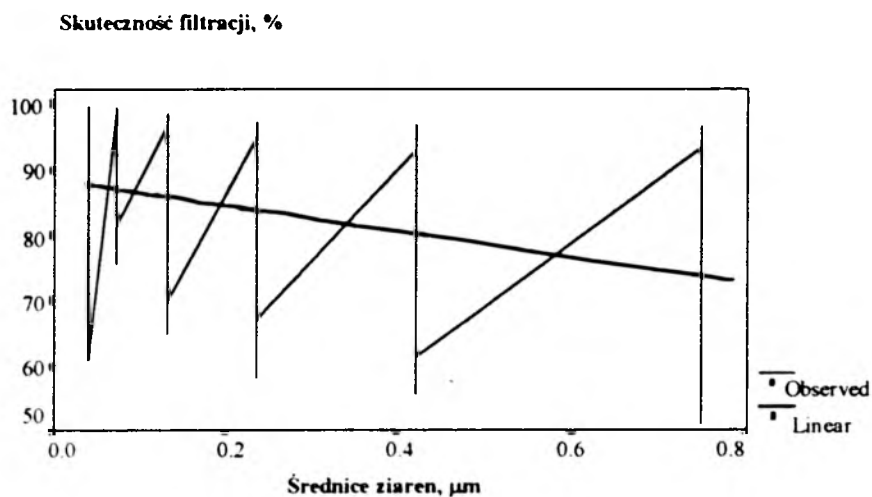
Na podstawie Rysunku 6.1 można stwierdzić, że w rozważanym przedziale wymiarowym średnic włókien każda z proponowanych funkcji mogłaby być rozważana i zastosowana w modelu regresji. Z tego właśnie powodu zdecydowano się na najprostszą z nich, tj. funkcję liniową.



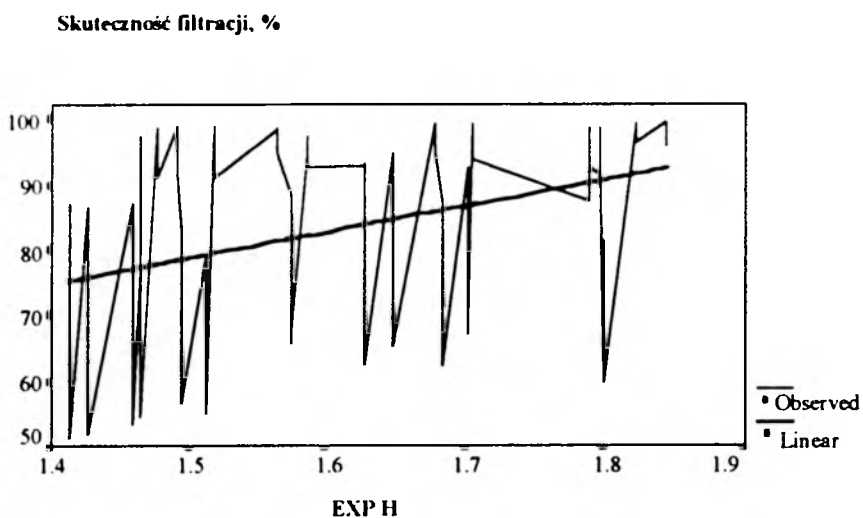
Rysunek 6.2. Dopasowanie funkcji dla masy powierzchniowej włókniny



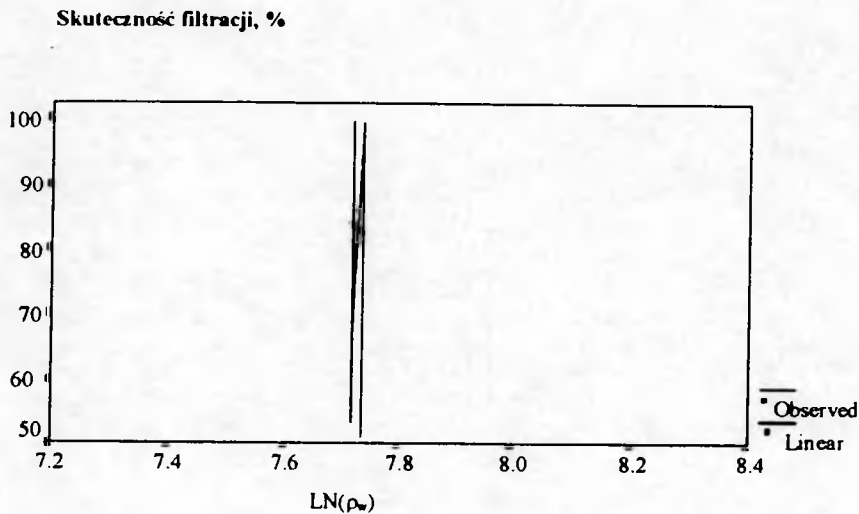
Rysunek 6.3. Dopasowanie funkcji dla gęstości upakowania włókny



Rysunek 6.4. Dopasowanie funkcji dla średnic ziaren



Rysunek 6.5. Dopasowanie funkcji dla grubości włókny



Rysunek 6.6. Dopasowanie funkcji dla gęstości włókien

6.2.3. Ocena analizy statystycznej

Oryginalny wydruk komputerowy uzyskany podczas przeprowadzania analizy metodą liniowej regresji wielorakiej przy pomocy pakietu SPSS/PC+ Advanced Statistics 4.0 for DOS oraz analizę otrzymanych wyników zawarto w Załączniku 2.

Podczas I części obliczeń, przy pomocy pakietu SPSS/PC+, wykonano analizę współzależności między parami zmiennych. Do analizy współzależności wykorzystano współczynniki korelacji liniowej. Uzyskano macierz korelacji pomiędzy zmienną zależną (η) a każdą zmienną niezależną, a także pomiędzy poszczególnymi parami zmiennych niezależnych. Analizując otrzymaną macierz korelacji można zauważyć silne skorelowanie zmiennej niezależnej α ze zmiennymi d_w i $\exp H$, zmiennej $\exp H$ z M_p oraz zmiennej $\ln(\rho_w)$ z d_w . Silna korelacja pomiędzy tymi zmiennymi nie powinna budzić zdziwienia. Jest oczywiste, że musi występować związek pomiędzy średnicą włókna d_w a jego gęstością ρ_w oraz pomiędzy grubością warstwy filtracyjnej H a masą powierzchniową włókniny (gramaturą) M_p . Związek pomiędzy współczynnikiem α , czyli gęstością upakowania włókniny, a zmiennymi d_w i $\exp H$ może być wyjaśniony przez definicję tego współczynnika. Gęstość upakowania włókniny filtracyjnej jest to bowiem stosunek objętości włókien zawartych w filtrze do objętości materiału [58].

Należy spodziewać się, że ze względu na występującą korelację omawiane zmienne nie będą mogły wejść do równania regresji wielorakiej. Dodanie tych zmiennych do równania regresji prawdopodobnie nie poprawiłoby stopnia wyjaśniania zmiennej zależnej (skuteczności filtracji) przez zmienne niezależne.

Natomiast zmienna zależna - tj. skuteczność filtracji - powinna zostać wyjaśniona przez takie zmienne niezależne jak:

d_w - średnica włókien,

ρ_w - gęstość włókien,

d_p - średnica ziaren,

M_p - masa powierzchniowa włókniny (gramatura).

Ponizej omówiono wyniki analizy danych metodą regresji krokowej.

I KROK OBLICZEŃ

W pierwszym kroku obliczeń do równania regresji wprowadzona została zmienna niezależna d_w .

Dla otrzymanego równania regresji (zawierającego jedynie jedną zmienną objaśniającą) współczynnik korelacji wyniósł $R=0.60858$.

Na podstawie znajomości wartości skorygowanego współczynnika determinacji R^2 można stwierdzić, że zmienność zmiennej zależnej η wyjaśniona była w około 36.6% przez zmiany zmiennej niezależnej d_w ($R^2=0.36594$).

Otrzymano równanie regresji w postaci:

$$\eta = -8.70122d_w + 104.04685 \quad (6.1)$$

Standaryzowany współczynnik regresji (Beta) dla d_w wyniósł -0.60858 . Oznaczało to, że wzrost wielkości średnicy włókien o jedną jednostkę ($1 \mu\text{m}$) spowoduje spadek skuteczności filtracji o 0.60858 jednostki (%).

II KROK OBLICZEŃ

W drugim kroku obliczeniowym wprowadzono do analizy kolejną zmienną objaśniającą $\ln(\rho_w)$.

Wprowadzenie jej spowodowało wzrost wyjaśniania zmienności przedziałowej skuteczności filtracji. Wartość skorygowanego współczynnika determinacji wynosiła 0.66818 , czyli zmienność η została wyjaśniona w około 66.8%.

Dla otrzymanego równania regresji (zawierającego dwie zmienne objaśniające) współczynnik korelacji wyniósł $R=0.82026$.

Mozna zauważyć, że wraz z dodaniem do równania regresji kolejnej zmiennej objaśniającej wzrósł stopień wyjaśniania zmiennej objaśnianej oraz wartość współczynnika korelacji.

Otrzymano równanie regresji w postaci:

$$\eta = -15.08241d_w - 1256.76353 \ln(\rho_w) + 9834.78565 \quad (6.2)$$

Standaryzowany współczynnik regresji Beta dla d_w wyniósł -1.05490 . Oznaczało to, że wzrost wielkości średnicy włókien o jedną jednostkę ($1 \mu\text{m}$) spowoduje spadek skuteczności filtracji o 1.05490 jednostki (%), pod warunkiem, że druga zmienna niezależna będzie miała stałe wartości.

Natomiast współczynnik Beta dla $\ln(\rho_w)$ wyniósł -0.70827 . Oznaczało to, że wzrost wielkości $\ln(\rho_w)$ o jedną jednostkę spowoduje spadek skuteczności filtracji o 0.70827 jednostki (%), przy zachowaniu warunku niezmienności pierwszej zmiennej niezależnej.

III KROK OBLICZEŃ

W trzecim kroku obliczeniowym wprowadzono do analizy zmienną objaśniającą d_p .

Wprowadzenie jej spowodowało wzrost wyjaśniania zmienności przedziałowej skuteczności filtracji. Wartość skorygowanego współczynnika determinacji wynosiła 0.77685, czyli zmienność η została wyjaśniona w około 77.7%.

Dla otrzymanego równania regresji (zawierającego trzy zmienne objaśniające) współczynnik korelacji wynosił $R=0.88404$.

Otrzymane równanie regresji przyjmuje postać:

$$\eta = -15.08241d_w - 1256.76353 \ln(\rho_w) - 19.75741d_p + 9840.24923 \quad (6.3)$$

Standaryzowany współczynnik regresji Beta dla d_w wynosił -1.05490. Oznaczało to, że wzrost wielkości średnicy włókien o jedną jednostkę (1 μm) spowoduje spadek skuteczności filtracji o 1.05490 jednostki (%), pod warunkiem, że pozostałe zmienne niezależne będą miały stałe wartości.

Natomiast współczynnik Beta dla $\ln(\rho_w)$ wynosił -0.70827. Oznaczało to, że wzrost wielkości $\ln(\rho_w)$ o jedną jednostkę spowoduje spadek skuteczności filtracji o 0.70827 jednostki (%), przy zachowaniu warunku niezmienności pozostałych zmiennych niezależnych. Były to takie same wartości współczynnika Beta, jakie otrzymano w drugim kroku obliczeniowym.

Współczynnik Beta dla d_p wynosił -0.32971. Oznaczało to, że wzrost wielkości d_p o jedną jednostkę (1 μm) spowoduje spadek skuteczności filtracji o 0.32971 jednostki (%), przy zachowaniu warunku niezmienności pozostałych zmiennych niezależnych.

IV KROK OBLICZEŃ

W czwartym kroku obliczeniowym wprowadzono do analizy zmienną objaśniającą M_p .

Wprowadzenie jej spowodowało wzrost wyjaśniania zmienności przedziałowej skuteczności filtracji. Wartość skorygowanego współczynnika determinacji wynosiła 0.81881, czyli zmienność η została wyjaśniona w około 81.9%.

Dla otrzymanego równania regresji (zawierającego cztery zmienne objaśniające) współczynnik korelacji wynosi $R=0.90768$.

Otrzymano równanie regresji w postaci:

$$\eta = -15.10665d_w - 1227.09610 \ln(\rho_w) - 19.75741d_p + 291.20608M_p + 9590.89593 \quad (6.4)$$

Standaryzowany współczynnik regresji Beta dla d_w wynosił -1.05659. Oznaczało to, że wzrost wielkości średnicy włókien o jedną jednostkę (1 μm) spowoduje spadek skuteczności filtracji o 1.05659 jednostki (%), pod warunkiem, że pozostałe zmienne niezależne będą miały stałe wartości.

Natomiast współczynnik Beta dla $\ln(\rho_w)$ wynosił -0.69155. Oznaczało to, że wzrost wielkości $\ln(\rho_w)$ o jedną jednostkę spowoduje spadek skuteczności filtracji o 0.69155 jednostki (%), przy zachowaniu warunku niezmienności pozostałych zmiennych niezależnych.

Współczynnik Beta dla d_p wynosił -0.32971. Oznaczało to, że wzrost wielkości d_p o jedną jednostkę (1 μm) spowoduje spadek skuteczności filtracji o 0.32971 jednostki

(%), przy zachowaniu warunku niezmienności pozostałych zmiennych niezależnych. Była to taka sama wartość współczynnika Beta, jaką otrzymano w trzecim kroku obliczeniowym dla zmiennej d_p .

Współczynnik Beta dla M_p wynosił +0.20655. Oznaczało to, że wzrost wielkości M_p o jedną jednostkę (kg/m^2) spowoduje wzrost skuteczności filtracji o 0.20655 jednostki (%), przy zachowaniu warunku niezmienności pozostałych zmiennych niezależnych.

Statystyka opisowa zmiennych niezależnych, które w czwartym kroku obliczeń nie weszły do równania regresji obejmowała zmienne: $\exp H$ oraz α .

Zatem zmienne niezależne $\exp H$ oraz α nie odgrywały istotnej roli w modelu regresji liniowej i nie mogą być włączone do równania regresji. Zostało to wcześniej zasygnalizowane przy omawianiu macierzy korelacji. Zauważono bowiem silne skorelowanie pary zmiennych niezależnych: α ze zmiennymi d_w i $\exp H$, zmiennej $\exp H$ z M_p oraz zmiennej $\ln(\rho_w)$ z d_w .

Mimo skorelowania $\ln(\rho_w)$ z d_w obie te zmienne zostały uwzględnione w równaniu regresji. Ich wzajemne skorelowanie nie wpłynęło zatem istotnie na ostateczny wynik. Natomiast zmienne α oraz $\exp H$ nie miały liczącego się wpływu na zmienną zależną, ponieważ występujące przy nich parametry regresji nieistotnie różniły się od zera. Wskazywał na to wynik zastosowanego w czwartym kroku obliczeniowym testu istotności t Studenta podczas analizy zmiennych nie wchodzących do równania regresji.

Poniżej, w Tabeli 6.3, przedstawiono przedziały ufności dla poszczególnych współczynników regresji

Tabela 6.3. Przedziały ufności dla współczynników regresji i wyrazu wolnego równania regresji w ostatnim kroku obliczeń

Zmienne niezależne i wyraz wolny	Współczynniki regresji	Średni błąd standardowy	Przedział ufności	
			dolna granica	górną granica
d_w	-15.10665	0.65546	-16.40446	-13.80884
$\ln(\rho_w)$	-1227.09610	81.50623	-1388.47850	-1065.71370
d_p	-19.75741	2.13306	-23.98087	-15.53395
M_p	291.20608	50.37482	191.46394	390.94822
wyraz wolny	9590.89593	631.30279	8340.9164	10840.8750

Podane w Tabeli 6.3 przedziały ufności z prawdopodobieństwem 0.95 pokrywają nieznaną wartość współczynników regresji liniowej

6.2.4. Charakterystyka proponowanego modelu filtracji powietrza

W wyniku analizy metodą krokowej regresji liniowej wielorakiej otrzymano zależność opisującą związek pomiędzy wartością numerycznej przedziałowej skuteczności filtracji (η - %) a wartościami:

- średnicy włókien szklanych (d_w - μm),
- gęstości włókien (ρ_w - kg/m^3),
- średnicy ziaren (d_p - μm)

- masy powierzchniowej włókniny (M_p - kg/m^2):

$$\eta = -15.10665d_w - 1227.09610 \cdot \ln(\rho_w) - 19.75741d_p + 291.20608M_p + 9590.89593 \quad [\%] \quad (6.5)$$

Współczynnik regresji wielokrotnej dla tego równania wynosił: $R=0.90768$.

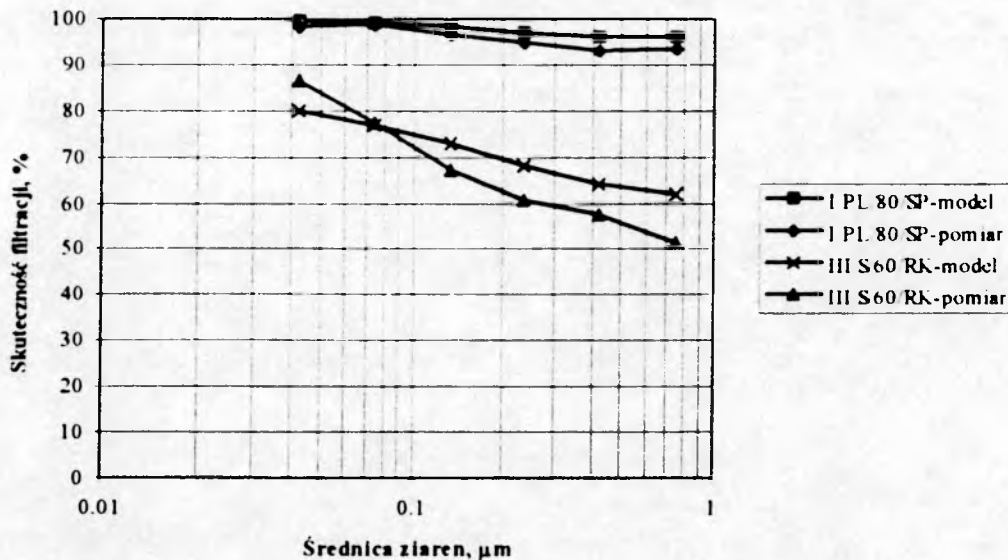
Zmienność przedziałowej numerycznej skuteczności filtracji była w 81.9% wyjaśniana przez zmienne niezależne, o czym świadczyła wartość zestandaryzowanego współczynnika korelacji (Adjusted R Square) podana w czwartym (ostatnim) kroku obliczeniowym.

Otrzymane równanie opisuje przedziałową numeryczną skuteczność filtracji włóknistych materiałów filtracyjnych o wysoce nieuporządkowanej strukturze, wykonanych metodą papierniczą z mikrowłókien szklanych przy prędkości napływu powietrza wynoszącej 3 cm/s. Zależność dotyczy procesu filtracji ustalonej.

Jest ona prawdziwa dla zakresów wartości parametrów strukturalnych włókniny i średnic ziaren podanych w Tabeli 6.4.

Tabela 6.4. Graniczne wartości zmiennych niezależnych zawartych w równaniu regresji

Lp.	Wielkość	Jednostka	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
1	d_w	μm	1.1420	4.1070
2	ρ_w	kg/m^3	2250.0	2290.0
3	d_p	μm	0.0316	1.0
4	M_p	kg/m^2	0.0562	0.0877



Rysunek 6.7. Porównanie charakterystyki filtra uzyskanej w oparciu o zaproponowany model procesu filtracji oraz rzeczywistej dla włókien I PL/80/SP i III S/60/RK

Na Rysunku 6.7 porównano charakterystyki filtra: uzyskane w oparciu o zaproponowany model procesu filtracji oraz rzeczywiste, określone dla

przykładowych włókien: I PL/80/SP i III S/60/RK. Bliskie usytuowanie obu linii na wykresie potwierdza, że podjęta próba opisu probabilistycznego procesu filtracji jest dobrym podejściem do rozpatrywanego zagadnienia i dobrym punktem wyjścia do dalszych poszukiwań, np. w oparciu o powstały model, optymalnych parametrów strukturalnych włókniny.

W pracy, do stworzenia modelu matematycznego procesu filtracji powietrza, wykorzystano statystykę stosowaną wiążącą abstrakcyjne modele probabilistyczne z danymi rzeczywiście zgromadzonymi na podstawie przeprowadzonych obserwacji.

Z natury zjawiska probabilistycznego wynika, że powtarzając ciąg n prób, w wyniku powinno się otrzymać zbiór na ogół różnych wartości układów n liczb. Każda rozsądna reguła uzyskiwania oszacowań parametru na podstawie każdego ciągu danych (np. reguła, która mówi o ocenie parametru na podstawie średniej z próby) powinna w konsekwencji dać różne estymacje wartości parametrów modelu. Nie należy więc oczekiwać, że na podstawie jakiegoś skończonego ciągu otrzyma się dokładne wartości parametru modelu, ponieważ dane same w sobie są wytworem losowości, która charakteryzuje zjawisko [3].

Różnica pomiędzy modelem a rzeczywistością, wyglądająca na sprzeczność, może być po prostu wynikiem pojawienia się wśród danych wartości z tytułu zajścia rzadkich, ale nie niemożliwych, zdarzeń. Z drugiej strony, może również istnieć wiele innych modeli odznaczających się (z większym lub mniejszym prawdopodobieństwem) zdolnością do opisu zbioru zaobserwowanych danych, uznanymi jako zgodne z prognozami stosowanego modelu. A więc występuje niepewność co do prawdziwości proponowanego modelu matematycznego. Wynikać ona może z powziętych arbitralnie założeń dotyczących wybranego modelu. A zatem mogą istnieć dwa lub więcej racjonalnych modeli, które możnaby rozważyć i porównać rozporządzając różnymi regułami wyboru estymatorów parametrów. Także wnioski z testu istotności zależą od umownego wyboru akceptowalnych prawdopodobieństw błędu. W konsekwencji wykonywana analiza powinna być kwalifikowana i przeprowadzana w sposób odzwierciedlający możliwości popełnienia błędu przy jej dokonywaniu. Stosując modele stworzone z wykorzystaniem zasad statystyki należy zatem pamiętać o mogącej wynikać z wymienionych wyżej powodów możliwości popełnienia błędu w oszacowaniu szukanych wielkości, co nie umniejsza roli statystyki w dążeniu do przybliżania opisu rzeczywistości.

6.3. Zakres zastosowań zaproponowanego modelu procesu filtracji

Zastosowany sposób modelowania procesu filtracji powietrza (wykorzystanie liniowej regresji wieloparametrowej) pozwala na wytypowanie najbardziej istotnych parametrów włókien i włókien, które wywierają wpływ na zmienność skuteczności filtracji. Jednocześnie stwarza możliwość syntetycznego ujęcia wpływu najważniejszych, dla rozważanego zakresu danych, parametrów na przebieg procesu filtracji, bez konieczności wnikania w skomplikowaną naturę mechanizmów filtracyjnych, które zachodzą podczas oczyszczania powietrza.

Powstałe, w oparciu o model regresji wieloparametrowej, równanie opisujące proces filtracji powietrza może stać się podstawą do optymalizacji parametrów struktury włókniny filtracyjnej prowadzącej do projektowania filtrów o jak najwyższej skuteczności filtracji. Może znaleźć zastosowanie szczególnie w przypadku materiałów o bardzo skomplikowanej budowie, nie dającej się opisać w sposób analityczny (np. włókniny wytwarzane metodą papierniczą). Określenie na podstawie powstałego modelu takich parametrów jak średnica włókien, ich gęstość czy masa powierzchniowa włókniny mogłoby ułatwić lepsze dostosowanie materiału do konkretnych potrzeb.

Otrzymana zależność nie wyczerpuje wszystkich problemów związanych z projektowaniem i wytwarzaniem materiałów filtracyjnych. Jednak, ponieważ dotychczas brakowało rozważań dotyczących modelowania procesu filtracji ziaren submikronowych przez włókniny filtracyjne wykonane metodą papierniczą i występującej w takich warunkach oceny numerycznej przedziałowej skuteczności, praca ta będąc nowatorskim podejściem do tego zagadnienia, stanowi istotny wkład w rozwój techniki filtracyjnej.

7. KIERUNKI DOSKONALENIA STRUKTURY I WŁAŚCIWOŚCI WYSOKOSKUTECZNYCH MATERIAŁÓW FILTRACYJNYCH

7.1. Zadania wysokoskutecznych filtrów w realizacji wymaganej klasy czystości pomieszczenia

Wysokoskuteczne filtry powietrza zatrzymując najdrobniejsze frakcje pyłu są jednym z najważniejszych elementów systemu umożliwiającego dotrzymanie wymaganej czystości powietrza w pomieszczeniach czystych. W oparciu o klasyfikację pomieszczeń czystych przedstawioną w normach [21], [28] znane są wymagania dotyczące ilościowego stężenia ziaren o określonych wymiarach. Dobierając filtry powietrza dla potrzeb pomieszczeń czystych na podstawie charakterystyki określonej podczas badań laboratoryjnych, można mieć jedynie pewność, że z taką samą wysoką skutecznością zatrzymane zostaną pyły o identycznych właściwościach jak aerozol testowy. Brak jest natomiast pewności co do zachowania materiałów filtracyjnych w przypadku pyłów o innym uziarnieniu. Nie można zatem zagwarantować, że w rzeczywistych warunkach eksploatacji za filtrem nie pojawi się pył o innym rozkładzie ziarnowym niż oczekiwany na podstawie pomiarów laboratoryjnych. Podczas stosowania filtru o określonej laboratoryjnie skuteczności filtracji, możliwe jest otrzymanie za nim wymaganego rozkładu frakcyjnego cząstek, jedynie w przypadku odpowiedniego dostosowania stężenia pyłu przed filtrem. Takie podejście do rozważanego zagadnienia może zmienić stosowaną do tej pory, czasem po prostu w sposób rutynowy, metodę doboru filtrów i zmusić projektantów do całościowego spojrzenia na problem doboru układu filtracyjnego ze zwróceniem szczególnej uwagi na wielkość numerycznego stężenia za każdym stopniem filtracji. Realizację tego może ułatwić takie dostosowanie metod pomiarowych, aby możliwe było określanie

przedziałowej numerycznej skuteczności filtracji nie tylko dla filtrów HEPA, czy ULPA, ale także dla niższych klas filtrów. Ponieważ czynione są próby stworzenia takich norm, można mieć nadzieję, że w niedalekiej przyszłości, gdy za opracowaniem nowej metodyki, nadejdzie realizacja stanowisk pomiarowych, możliwe będzie projektowanie układów filtracyjnych faktycznie gwarantujących otrzymanie założonej ilości ziaren w powietrzu nawiewanym do sal czystych.

Jednocześnie niezbędna jest możliwość predykcji przebiegu procesów filtracyjnych w oparciu o wcześniej opracowane modele matematyczne, szczególnie dla nowoczesnych skomplikowanych strukturalnie włóknin. Modele, jak ten zaproponowany w niniejszej pracy, pozwolą na przewidywanie wielkości stężenia ziaren za filtrem, będące odpowiedzią układu na założone lub znane parametry wejściowe (rozkład pyłu przed filtrem) oraz parametry strukturalne materiałów. Na ich podstawie będzie także możliwe, przy narzuconej dopuszczalnej maksymalnej ilości ziaren w powietrzu nawiewanym do pomieszczenia, poszukiwanie optymalnych wielkości parametrów strukturalnych włóknin, gwarantujących prawidłowe przeprowadzanie procesu oczyszczania powietrza lub określenie takiego składu ziarnowego pyłu przed filtrem, aby stosując konkretny filtr powietrza zapewnić utrzymanie dopuszczalnych wartości stężenia numerycznego pyłu na wlocie powietrza do pomieszczenia.

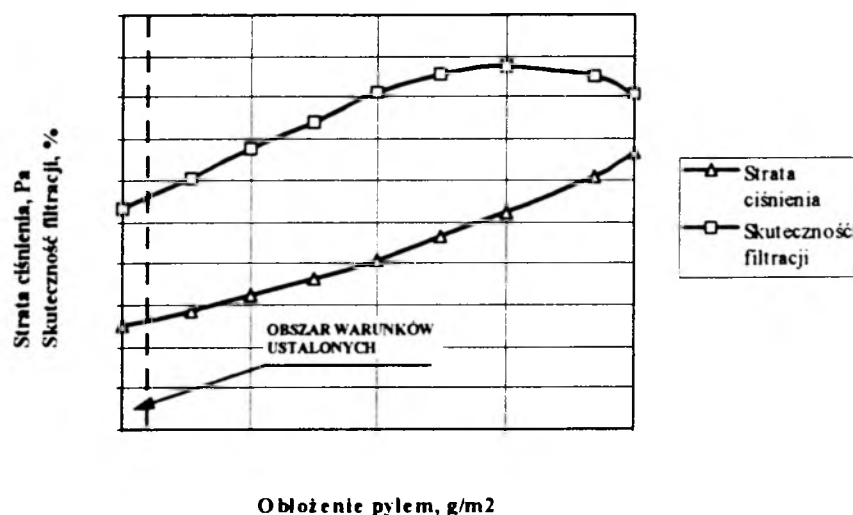
7.2. Wiarygodność oceny wielkości numerycznego stężenia pyłu w strumieniu powietrza opuszczającym warstwę filtracyjną

Ocena dotrzymania numerycznego stężenia zanieczyszczeń w pomieszczeniach czystych prowadzona jest w oparciu o wyniki pomiarowe badań kontrolnych z narzuconym przez normy 95% progiem ufności [21], [28]. Istnieje więc niewielki dopuszczalny obszar zmian warunków występujących w kontrolowanej przestrzeni. Z natury rzeczy, podczas eksploatacji, filtry powietrza zatrzymując coraz więcej cząstek, zmieniają swoje właściwości w wyniku narastania warstwy pyłu. Najgorsze warunki, pod względem wielkości skuteczności filtracji występują w początkowym okresie jego pracy, w tzw. warunkach ustalonych procesu oczyszczania powietrza (Rysunek 7.1).

Te najbardziej niekorzystne warunki były przedmiotem rozważań ze względu na wzrost wartości skuteczności filtracji przy jednoczesnym zwiększaniu się obłożenia materiału pyłem. W wyniku narastania warstwy pyłu zwiększa się zdolność włókniny do jego zatrzymania, aż do momentu przekroczenia wielkości jego dopuszczalnego obłożenia, kiedy to konieczna jest wymiana filtru.

Z kolei niepewność samego modelu (o założonych przedziałach ufności określonych z 95% prawdopodobieństwem dotrzymania wartości parametrów) wymaga uwzględnienia pewnego marginesu bezpieczeństwa. Aby zapewnić dotrzymanie wymaganej ilości ziaren za filtrem, powinno się z dużą ostrożnością i rezerwą rozważać występujący przed nim skład ziarnowy pyłu, tak aby nawet w najbardziej niekorzystnych warunkach nie przekroczyć dopuszczalnej wartości jego stężenia.

Rozważając warunki najbardziej niekorzystne z punktu widzenia zapewnienia jak najlepszego oczyszczania powietrza, należy uwzględnić występujące podczas procesu filtracji zjawisko selektywności, powodujące pojawienie się minimalnej wartości skuteczności filtracji. Wynika stąd konieczność ścisłego kontrolowania stężenia aerozolu przed filtrem, szczególnie w zakresie średnic ziaren $0.1 \div 1 \mu\text{m}$, będącym obszarem występowania zjawiska największej przenikalności ziaren (Rozdział 1, Rysunek 1.5).



Rysunek 7.1. Orientacyjny przebieg zmienności wielkości skuteczności filtracji i straty ciśnienia podczas eksploatacji filtru

7.3. Określenie przedziałowej skuteczności filtracji w oparciu o zaproponowany model

Od modeli matematycznych prowadzących do określenia numerycznej przedziałowej skuteczności filtracji oczekiwać należy wiarygodnej oceny obliczanej wielkości oraz mało kłopotliwej procedury obliczeniowej. Modele deterministyczne, rozważające szczegółowo poszczególne mechanizmy filtracji, opisują proces w sposób bardzo skomplikowany, nie zachęcający do ich stosowania. Wymagają bowiem znajomości nie tylko parametrów i właściwości materiału oraz pyłu, ale również wielu liczb podobieństwa oraz parametrów charakteryzujących ośrodki. Jednocześnie, jak to wynika z analizy przeprowadzonej w Rozdziale 5, wiele z nich nie może stanowić dostatecznie dokładnej podstawy do oszacowania wielkości skuteczności filtracji. Natomiast dostępne modele hybrydowe nie obejmują zagadnień związanych z filtracją submikronowych ziaren przez skomplikowane strukturalnie włókny. W świetle tych uwag, należy stwierdzić, że zaproponowany w pracy model uogólniający proces filtracji wysokoskutecznej przez zróżnicowane strukturalnie włókny wykonane metodą papierniczą, umożliwi obliczenie skuteczności w sposób znacznie prostszy i jednocześnie wiarygodny (o czym świadczy wysoka wartość współczynnika korelacji otrzymana podczas dopasowywania modelu do wielkości pomiarowych $R \approx 0.91$).

Przystępując do planowania eksperymentów, mając na celu (oprócz oceny przedziałowej skuteczności filtracji) ściślejsze zlokalizowanie położenia obszaru największej przenikalności dla włókien wykonanych metodą papierniczą z ultracienkich włókien szklanych, oparto się na danych literaturowych [22] wskazujących na występowanie tego obszaru w zakresie ziaren o średnicach $0.1 \div 1 \mu\text{m}$. Niestety, badania nie potwierdziły występowania tak zdefiniowanych granic zakresu. Zaobserwowano przesunięcie obszaru w kierunku większych średnic ziaren ($1 \mu\text{m}$), uzyskując w analizowanym obszarze wymiarową zależność liniową charakteryzującą się spadkiem wartości skuteczności filtracji wraz ze wzrostem wymiarów cząstek. A zatem konieczne byłoby przeprowadzenie w przyszłości badań rozszerzających zakres średnic ziaren do $2 \mu\text{m}$ dla jednoznacznego zidentyfikowania położenia obszaru o minimalnej skuteczności filtracji. Uzyskana zależność dostarcza jednak istotnych informacji o kierunku zmian wartości skuteczności filtracji w obszarze ziaren submikronowych i w tym zakresie spełnia swoje zadania.

7.4. *Możliwości doboru podstawowych parametrów struktur filtracyjnych*

7.4.1. *Algorytmy doboru parametrów*

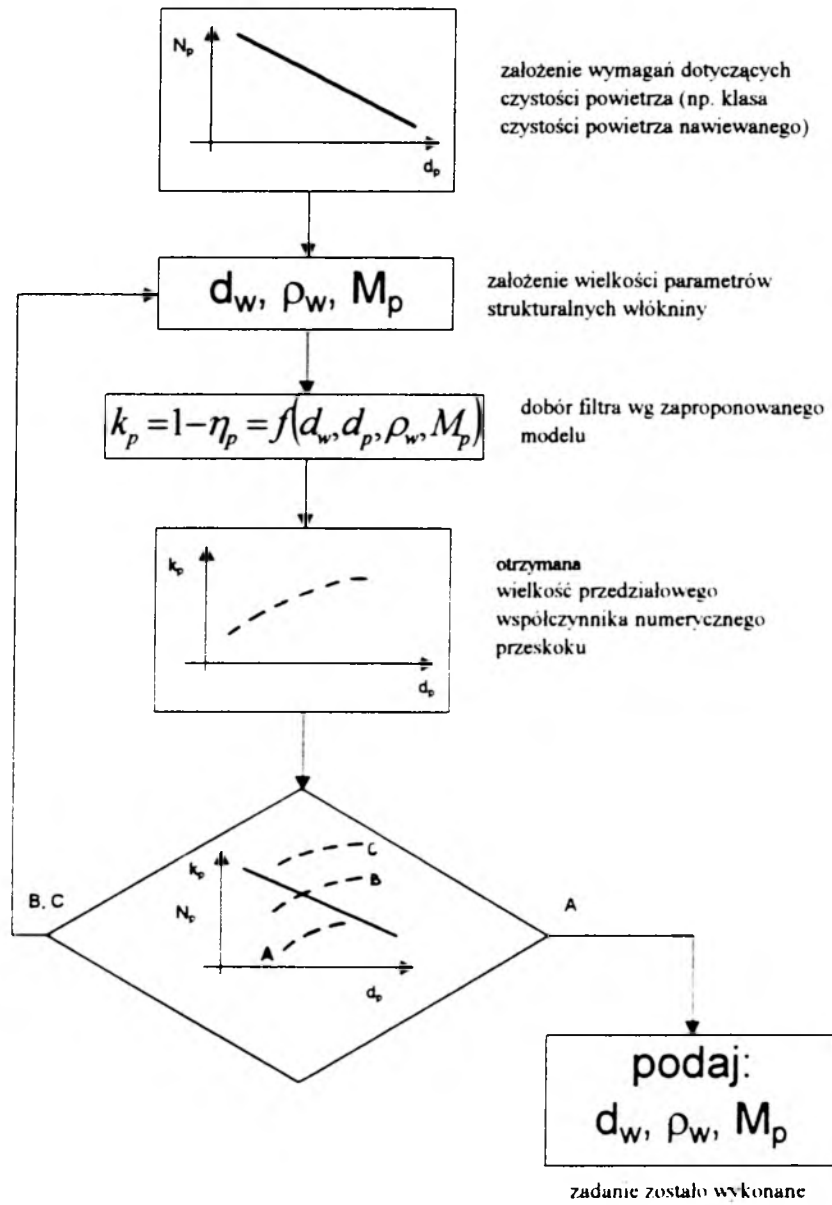
Zaproponowany model procesu filtracji pozwala dokonać doboru parametrów włókniny dla spełnienia celu nadrzędnego, jakim jest zapewnienie jak najwyższej skuteczności filtracji oraz dotrzymania wymagań dotyczących dopuszczalnego stężenia frakcyjnego ziaren w powietrzu nawiewanym do pomieszczenia. Poniżej przedstawiono wykonane w oparciu o model algorytmy doboru wielkości strukturalnych włókniny.

7.4.1.1. *Sprawdzenie prawidłowości doboru parametrów*

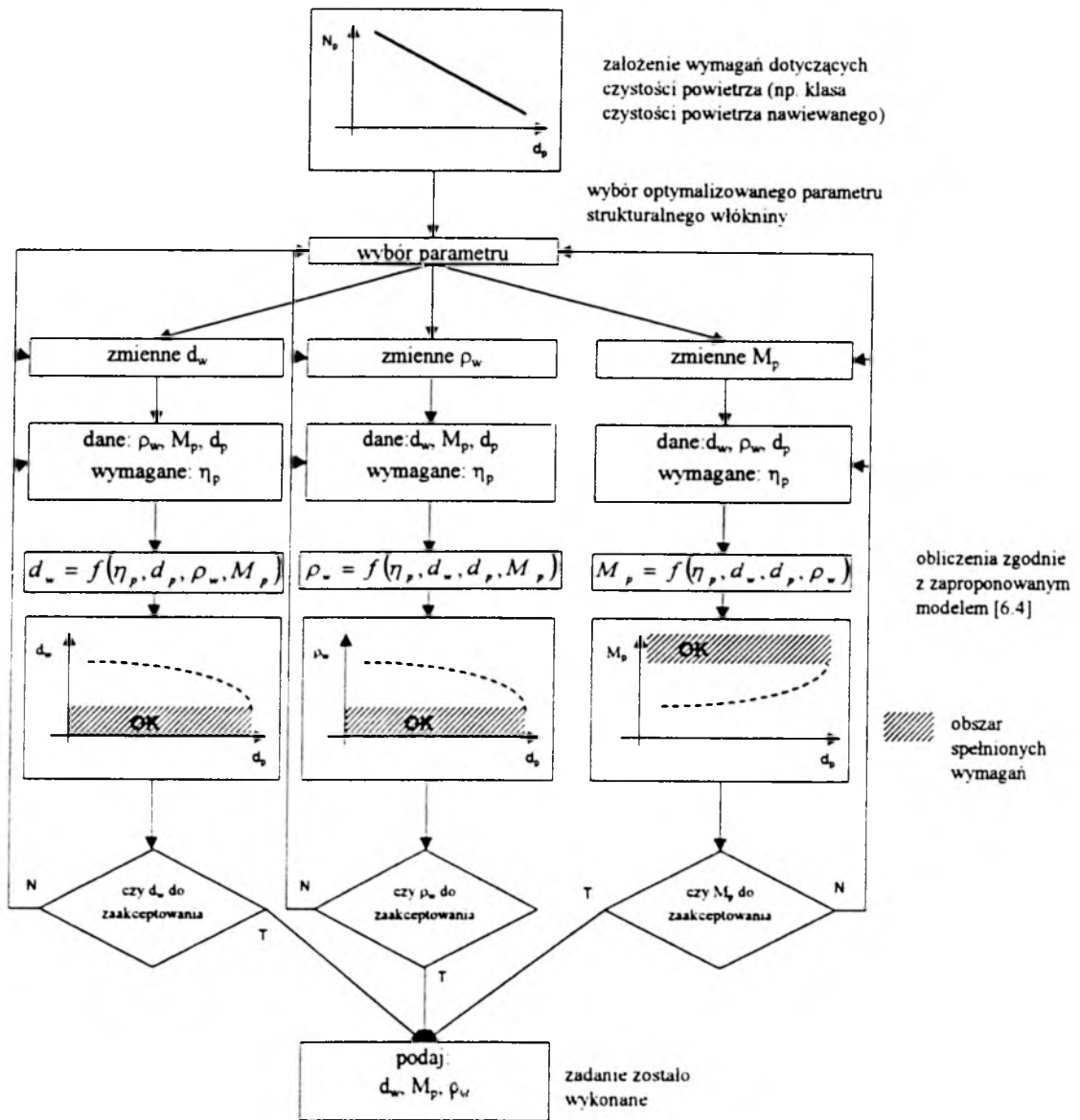
Na Rysunku 7.2 przedstawiony prosty algorytm służący do sprawdzenia, czy założone parametry spełniają wymagania dotyczące czystości powietrza nawiewanego do pomieszczenia.

7.4.1.2. *Dobór parametrów strukturalnych włókien*

W przypadku skorzystania z bardziej zaawansowanego algorytmu niż przedstawiony na Rysunku 7.2, można poszukiwać granicznych wielkości wybranego parametru dla stałych wartości dwóch pozostałych wielkości strukturalnych włókniny (Rysunek 7.3).



Rysunek 7.2. Algorytm sprawdzenia prawidłowości doboru włókniny filtracyjnej



Rysunek 7.3. Algorytm doboru parametrów strukturalnych włóknin

7.4.2. Kryterium dobroci filtra

Pojęcie "Kryterium dobroci filtra" wprowadził do techniki filtracyjnej Chen [30] [85]. Jest ono istotne w przypadku, gdy ocenie poddaje się materiał filtracyjny ze względu na wybrane parametry filtracyjne (bez ich podziału na cechy pierwszorzędne i drugorzędne, jak to jest w przypadku pomieszczeń czystych). Jako charakterystykę jakości materiału filtracyjnego bardzo często stosuje się zależność definiującą to kryterium:

$$K_D = \frac{-\log\left(\frac{k}{100}\right)}{\Delta p} = \frac{2 - \log k}{\Delta p} \quad (7.1)$$

gdzie:

K_D kryterium dobroci filtra, Pa^{-1}

k całkowity współczynnik przeskoku, %

Δp strata ciśnienia podczas przepływu powietrza przez filtr, Pa

Im wyższa jest wartość K_D , tym lepszymi parametrami charakteryzuje się materiał filtracyjny (niższa wartość współczynnika przeskoku k dla danego filtra przy danym oporze przepływu).

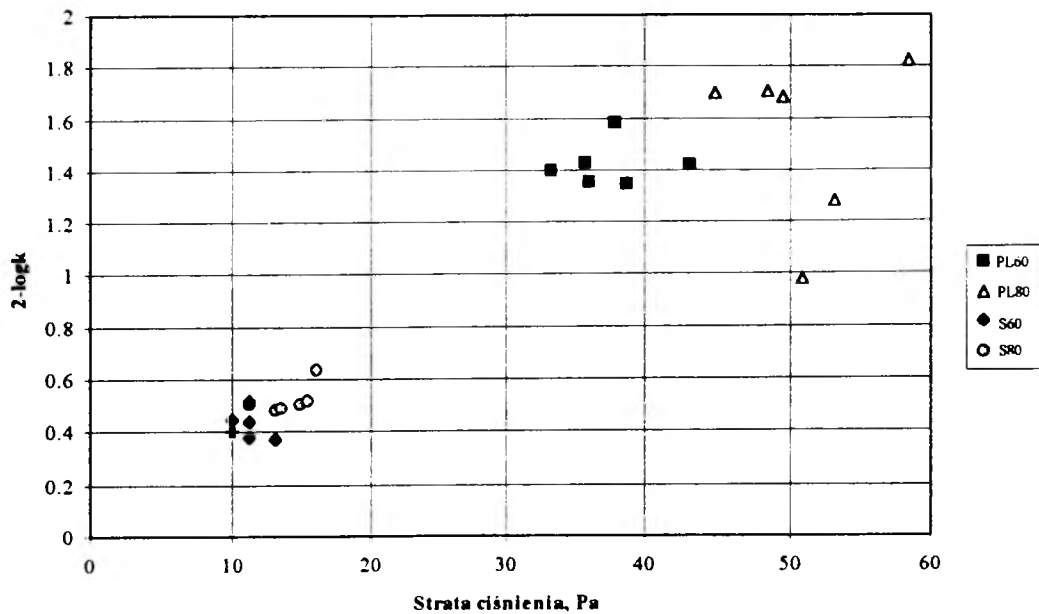
Podczas stosowania tego kryterium, stratę ciśnienia i całkowity współczynnik przeskoku określa się dla tej samej prędkości napływu powietrza na włókninę filtracyjną. Wskaźnik może być stosowany jedynie w przypadku, gdy zależność $-\log(k/100)$ od Δp wyrażona jest przez linię prostą [81].

Charakterystyki służące do sprawdzenia liniowości zależności $-\log(k/100)$ i Δp zostały wykonane w oparciu o wyniki pomiarów testem mgły olejowej (znajdują się w archiwum pracy). Dla wszystkich włókien zachowana jest liniowa zależność obu parametrów przy współczynniku korelacji $R \geq 0.9$. Ze względu na spełnienie warunku umożliwiającego stosowanie kryterium dobroci filtrów, można było określić jego wartość dla przebadanych włókien.

Jednocześnie zależność zastosowana dla określenia K_D została dobrze potwierdzona doświadczalnie dla włókien o różnych średnicach i materiałach o gęstości upakowania $\alpha = 0.001 \pm 0.2$ oraz dla aerozoli o cząstkach submikronowych [81].

Włókniny filtracyjne wykonane dla potrzeb niniejszej pracy mają wartości gęstości upakowania wynoszące $\alpha = 0.052 \pm 0.081$, a więc zawierają się w zalecanym zakresie α , a wymiary ziaren są mniejsze od $1 \mu\text{m}$.

Na Rysunku 7.4 przedstawiono zależność pomiędzy wartością $(2 - \log k)$ a stratą ciśnienia. Można zaobserwować grupowanie włókien o takiej samej gramaturze wykonanych z tego samego rodzaju włókien. Najlepszą wartością współczynnika dobroci charakteryzują się włókniny z grup PL80 i PL60.



Rysunek 7.4. Wartości kryterium dobroci dla materiałów filtracyjnych

Kryterium dobroci jest wskaźnikiem zdecydowanie użytkowym (handlowym) określającym optymalne połączenie parametrów włókniny (tj. wysoką skuteczność filtracji przy niskiej stracie ciśnienia). Z tego powodu np. włókniny o najniższej wartości współczynnika przesoku (PL60) nie będą charakteryzowały się wysoką wartością kryterium dobroci, gdyż powietrze przepływa przez nie z odpowiednio wyższą stratą ciśnienia.

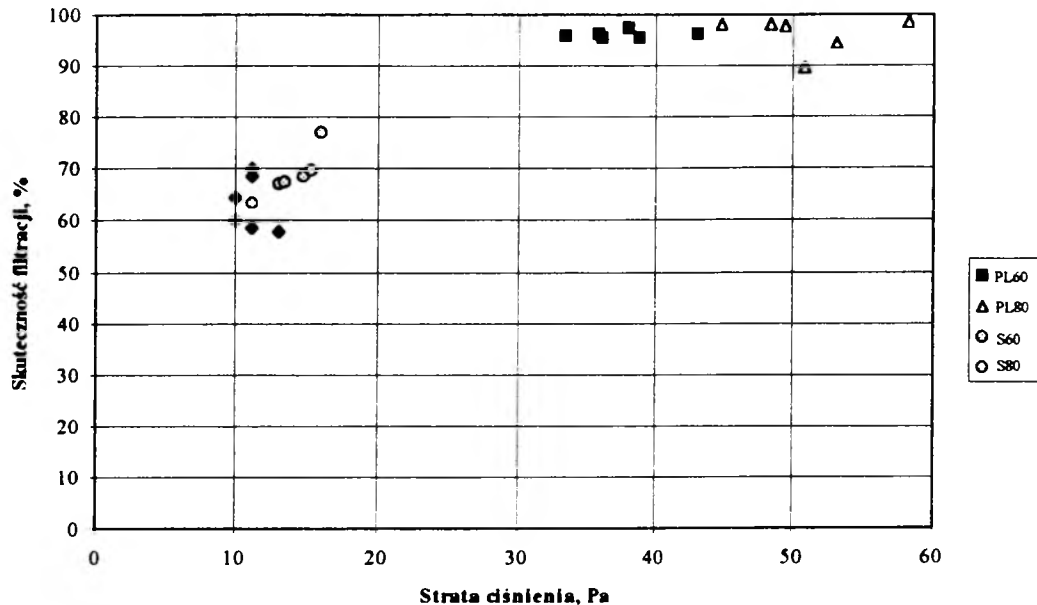
Kryterium dobroci dotyczy oceny jakości materiału filtracyjnego, a więc nie można w oparciu o jego wartość określić jakości przeprowadzanego procesu oczyszczania powietrza. Na jego podstawie można poszukiwać i oceniać charakterystyki włóknin przeznaczonych dla instalacji o niższych wymaganiach, dla których oba parametry filtracyjne są równorzędnie ważne. Jednak, ze względu na częste stosowanie kryterium dobroci do oceny materiałów filtracyjnych, zdecydowano się przedstawić w pracy jego wartości dla przebadanych włóknin.

7.4.3. Kryterium maksymalnej skuteczności filtracji

Najważniejszym parametrem w procesie filtracji powietrza dla potrzeb pomieszczeń o wymaganym wysokim poziomie czystości, jest skuteczność filtracji. Zapewnienie jej jak najwyższych wartości jest w tym przypadku nadrzędnym celem. Jednak wówczas, gdy są dostępne włókniny o jednakowej skuteczności, należy zwrócić uwagę również na dwa pozostałe wskaźniki filtracyjne (stratę ciśnienia i pyłochłonność).

Należy wówczas poszukiwać materiałów o niskich stratach ciśnienia i dużej pyłochłonności. Pozwoli to na dobór filtra nie powodującego większego (niż to jest potrzebne) wzrostu oporów przepływu powietrza przez instalację oraz na przedłużenie czasu jego eksploatacji.

Na Rysunku 7.5 przedstawiającym zależność pomiędzy skutecznością filtracji a stratą ciśnienia, można zauważyć, że faktycznie istnieje możliwość takiego wyboru, np. wśród włókien z grupy PL60.



Rysunek 7.5. Zależność skuteczności filtracji od straty ciśnienia

7.5. Kierunki poszukiwań nowych struktur filtracyjnych

Kierunki poszukiwań nowych włókien filtracyjnych powinny uwzględniać następujące zadania, dotyczące:

- przebiegu procesu filtracji:
 - ◊ ze względu na występowanie zjawiska selektywności filtra, na podstawie analizy mechanizmów filtracyjnych powinno się poszukiwać możliwości ich wykorzystania dla zmniejszenia lub przesunięcia obszaru największej przenikalności cząstek w kierunku wielkości ich średnic nie zagrażających np. przeprowadzanemu procesowi technologicznemu,
 - ◊ należy szukać dalszych możliwości lepszego wykorzystania cienkich i ultracienkich włókien do wytwarzania wysokoskutecznych oraz jednorodnych strukturalnie filtrów z wykorzystaniem technologii umożliwiających wyprodukowanie zwartych struktur poprawiających skuteczność filtracji,
- przedłużenia czasu pracy materiałów (zwiększenie pyłochłonności):
 - ◊ należy dążyć do poszukiwania włókien o zwiększonym dopuszczalnym obciążeniu pyłem, w konsekwencji czego będzie możliwe uzyskanie wymiernych zysków ekonomicznych w trakcie eksploatacji instalacji klimatyzacyjnej,
- zwiększenia wytrzymałości mechanicznej włókien:
 - ◊ powinno się doprowadzić do poprawienia właściwości wytrzymałościowych materiałów filtracyjnych w celu zmniejszenia niebezpieczeństwa pylenia materiału, mogącego doprowadzić do pogorszenia czystości powietrza za

filtrem, a także w celu uniknięcia lub zmniejszenia zagrożenia wynikającego z możliwości zniszczenia materiału w wyniku np. wystąpienia wyższej prędkości powietrza od wartości założonej przez producenta.

Na tle powyższych uwag trzeba podkreślić, że podstawowym dążeniem jest jednak poszukiwanie materiałów filtracyjnych, które w wiarygodny sposób pozwolą realizować spełnienie wymagań dotyczących wymaganej wysokiej czystości powietrza za filtrem. Jest to szczególnie istotne w przypadku pomieszczeń technologicznych np. w przemyśle mikroelektronicznym, gdzie priorytetowym wymaganiem jest zapewnienie ściśle kontrolowanej, bardzo niskiej, określanej w sposób numeryczny, koncentracji submikronowych ziaren w pomieszczeniu. A zatem nie można dopuścić, aby stosowanie materiałów filtracyjnych o nieuporządkowanej skomplikowanej strukturze wpłynęło na przypadkowy charakter ich pracy i pogorszyło, nawet chwilowo, poziom czystości powietrza nawiewanego do pomieszczenia. Wymaga to doskonalenia opisu matematycznego procesu filtracji, umożliwiającego przewidywanie skuteczności oczyszczania powietrza lub ułatwiającego podejmowanie decyzji dotyczących doboru parametrów włókien. Modelem uwzględniającym w swoich założeniach element niepewności, może stać się zaproponowany model probabilistyczny. Powinien on pozwalać na eliminowanie ryzyka zagrożeń spowodowanych losowym charakterem przebiegu procesu oraz niepowtarzalnym, przypadkowym ułożeniem włókien.

8. WNIOSKI

Zgodnie z wymaganiami współczesnej technologii przedstawionymi w Rozdziale 1, w pracy dążono do przedstawienia wiarygodnej metody opisu wartości przedziałowej numerycznej skuteczności filtracji submikronowych ziaren przez mikrowłókniste, złożone strukturalnie materiały filtracyjne wykonane metodą papierniczą oraz określenia wpływu jej parametrów strukturalnych na przebieg procesu oczyszczania powietrza. Ze względu na zaobserwowany brak jednoznacznej zgodności pomiędzy rzeczywistymi warunkami filtracji i założeniami modeli analitycznych, a w konsekwencji występujące różnice pomiędzy rzeczywistymi wielkościami skuteczności a wartościami uzyskanymi w wyniku predykcji, zdecydowano się na poszukiwanie innego sposobu opisu procesu oczyszczania powietrza. Coraz większy udział zmiennych losowo czynników wpływających na wynik procesu filtracji powietrza, uzasadniał próbę sformułowania jego opisu probabilistycznego. Zaproponowany model pozwala na przewidywanie wartości przedziałowej numerycznej skuteczności filtracji oraz pomaga poszukiwać optymalnych wielkości parametrów strukturalnych włókieniny. Model, pozwalając na analityczną ocenę przewidywanej minimalnej wartości współczynnika przeskoku, może ułatwić podejmowanie decyzji dotyczących doboru odpowiedniego filtra w celu zagwarantowania występowania mniejszej niż dopuszczalna ilości ziaren w powietrzu nawiewanym do pomieszczeń czystych. Dążąc do tego, aby w żadnych warunkach nie nastąpiło przekroczenie wartości granicznych stężenia ziaren, w pracy wszystkie

rozważania odniesione były do najniekorzystniejszych z punktu widzenia skuteczności filtracji warunków pracy filtra, tj. początkowej filtracji ustalonej.

Mając za zadanie ocenę numerycznej przedziałowej skuteczności, zdecydowano się na wykonanie dla potrzeb planowanych eksperymentów włóknin z ultracienkich i cienkich włókien szklanych. Wybór ich oparto na informacjach pochodzących od producentów i dotyczących średnic, wynoszących $1\ \mu\text{m}$ w przypadku włókien produkcji polskiej i $1.15\ \mu\text{m}$ dla włókien szwedzkich. Decydując się na wytworzenie metodą papierniczą włóknin z tak cienkich włókien, spodziewano się uzyskać bardzo wysokie wartości skuteczności filtracji. Jak jednak wykazały przeprowadzone pomiary, zamierzenie to nie w pełni zostało osiągnięte ze względu na niejednorodną budowę włókien prowadzącą do wyprodukowania struktur o niejednorodnej gęstości.

Podczas realizacji pracy możliwe było także sformułowanie przedstawionych poniżej następujących wniosków:

- przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły istnienie obszaru maksymalnej przenikalności cząstek; zaobserwowano jego przesunięcie w stronę większych średnic cząstek ($1\ \mu\text{m}$) w porównaniu z wynikami uzyskanymi na podstawie modeli matematycznych, jak i zakresem podawanym w literaturze ($0.1\div 1\ \mu\text{m}$) [22].
- zaobserwowano wystąpienie zgodności wielkości przedziałowej numerycznej skuteczności filtracji określonej w oparciu o modele matematyczne i wyniki eksperymentalne poza analizowanym zakresem wymiarowym cząstek. Potwierdziło to poprawność i celowość wyboru obszaru badań oraz jego ograniczenie do obszaru stwarzającego największe trudności w opisie matematycznym procesu filtracji.
- stwierdzono, że przez właściwy dobór parametrów strukturalnych włókniny można znacznie ograniczyć wartość przedziałowego numerycznego współczynnika przeskoku określanej z 95% progami ufności.
- powstały model pozwala w sposób łatwy i przejrzysty na drodze analitycznej przewidywać skuteczność filtracji i zlokalizować obszary najbardziej wrażliwe, o najniższej skuteczności filtracji.

Przedstawione powyżej zagadnienia są niewątpliwym osiągnięciem uzyskanym w pracy doktorskiej, która poszerza zakres wiedzy w dziedzinie techniki filtracyjnej. Istnieje jednak potrzeba przeprowadzania dalszych badań i analiz. Dotyczyć one powinny:

- rozszerzenia objętego analizą zakresu wymiarowego cząstek do $2\ \mu\text{m}$, tak aby móc dokładniej określić zachowanie materiału w obszarze jego największej przenikalności,
- poszukiwania jak najlepszych włóknin filtracyjnych o jak najwyższej skuteczności filtracji, uzyskując jednocześnie zwiększenie wytrzymałości mechanicznej i pyłochłonności,
- badań prowadzących do szerszego wykorzystania materiałów elektretowych.

Za bardzo ważny element uznać przy tym należy konieczność gromadzenia wniosków eksploatacyjnych z pomiarów rzeczywistych w pomieszczeniach. Fakt istnienia ujednocionej normy ISO [28], dotyczącej oprócz klasyfikacji pomieszczeń czystych, także przeprowadzanych w nich pomiarów kontrolnych, powinien sprzyjać tworzeniu wiarygodnej bazy danych, pozwalającej na kontrolowanie prawidłowości podejmowanych decyzji dotyczących wyboru zastosowanych filtrów.

OZNACZENIA

- A - współczynnik uwzględniający inercyjne zatrzymanie cząstek w granicznej warstwie dyfuzyjnej włókna, obliczony według wzoru (3.29), -
- Adjusted R Square - skorygowany współczynnik determinacji (oznaczalności)
- a_{efw} - promień efektywny włókna, m lub μm
- Analysis of Variance - analiza wariancji
- a_w - promień włókna, m lub μm
- $a_{w sr}$ - średni promień włókna, m lub μm
- b - wektor oszacowań parametrów (nieobciążony estymator wektora β)
- B - oszacowanie parametru równania regresji
- B - współczynnik uwzględniający wpływ efektu zaczepienia na osadzanie dyfuzyjne, określony na podstawie wykresu $B=f(M)$ (Rysunek 3.4) lub obliczony według wzoru (3.30), -
- Beta - zestandaryzowany współczynnik regresji dla poszczególnych zmiennych niezależnych
- Beta ln - standaryzowany współczynnik regresji w przypadku, gdyby rozważana zmienna niezależna weszła do równania w następnym kroku obliczeń
- b_i - i-ta składowa estymatora b
- C_D - współczynnik poprawkowy uwzględniający opór włókna określony dla rzeczywistych filtrów z zależności (3.24), -
- C_D''' - współczynnik czołowego oporu wyizolowanego włókna; wartość wyznacza się z wykresu $C_D'''=f(n)$ [81]
- CM - częstość mody
- Cu - liczba Cunninghama, -
- D - współczynnik dyfuzji cząstek, m^2/s
- D - średnica próbki włókniny filtracyjnej, m
- D - macierz współczynników korelacji zmiennych objaśniających i zmiennej objaśnianej
- d_{efw} - średnica efektywna włókna, m lub μm
- det - wyznacznik macierzy
- DF - ilość stopni swobody
- d_{ii} - i-ty diagonalny element macierzy $(X^T X)^{-1}$
- d_r - średnica ziaren, m lub μm
- D_{pi} - średnica zastępcza ziaren pyłu dla określonego przedziału wymiarowego cząstek, m lub μm
- d_w - średnia średnica włókna, m lub μm
- $d_{w rz}$ - rzeczywista średnica włókna, m lub μm
- $E(\dots)$ - wartość oczekiwana
- F - siła oporu hydrodynamicznego dla filtra rzeczywistego, dla $Kn \neq 0$ i włókien monodispersyjnych, -
- F - powierzchnia materiału filtracyjnego, m^2
- F - statystyka F-Snedecora
- F_1 - siła oporu hydrodynamicznego dla filtra rzeczywistego, dla $Kn \neq 0$ i włókien polidispersyjnych, -
- F_{ex} - siła oporu hydrodynamicznego włókna dla filtra rzeczywistego, wyznaczona na podstawie doświadczalnie określonego spadku ciśnienia (model równoległy), -
- F_o - teoretyczna siła oporu hydrodynamicznego w modelu równoległym filtra dla $Kn=0$ i włókien monodispersyjnych, -
- F_{o1} - teoretyczna siła oporu hydrodynamicznego w modelu równoległym filtra dla

F_{oi}^f	- $Kn=0$ i włókien polidispersyjnych, - - teoretyczna siła oporu hydrodynamicznego w modelu wachlarzowym filtra dla $Kn=0$ i włókien polidispersyjnych, -
F_o^f	- teoretyczna siła oporu hydrodynamicznego w modelu wachlarzowym filtra dla $Kn=0$ i włókien monodispersyjnych, -
Fr	- liczba Froude'a, -
F_t	- teoretyczna siła oporu hydrodynamicznego wyizolowanego włókna, oddziaływająca na jednostkę długości włókna w filtrze modelowym (model równoległy), -
g	- przyspieszenie ziemskie, m/s^2
G	- parametr osadzania grawitacyjnego, -
H	- grubość włókniny, m
H^*	- zmienna niezależna wprowadzona do równania regresji zamiast zmiennej H , $H^* = \exp(H)$
H_0	- hipoteza zerowa
H_1	- hipoteza alternatywna wobec hipotezy zerowej
I	- parametr określający mechanizm bezwładnościowy, -
I	- macierz jednostkowa stopnia n
k	- przedziałowy współczynnik przeskoku, %
k	- ilość szacowanych parametrów w danym równaniu
k_B	- stała Boltzmana, kJ/K
K_D	- kryterium dobroci filtra, Pa^{-1}
k_f	- wartość na osi rzędnych zależności $\Delta p_{ex}/u^2=f(u)$ wyznaczona z przecięcia się stycznej do krzywej poprowadzonej dla prędkości obliczeniowej z odciętą $u=0.01$ m/s , $Pa \cdot s^2/m^2$
k_h	- współczynnik hydrodynamiczny filtra (model równoległy Fuksa-Stieczkiny-Kirsza), -
k_H	- współczynnik oporu hydrodynamicznego nie uwzględniający niejednorodności budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (wachlarzowy model monodispersyjny). określony ze wzoru (3.51), -
k_{HI}	- współczynnik oporu hydrodynamicznego uwzględniający niejednorodność budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny (wachlarzowy model polidispersyjny). określony ze wzoru (3.57), -
k_i	- przedziałowy współczynnik przeskoku odniesiony do ziaren pyłu o średnicy zastępczej D_{pi} , -
KM	- krotność mody
Kn	- liczba Knudsen'a, -
L_c	- całkowita długość włókien w próbce, m
L_F	- długość włókien w materiale filtracyjnym na jednostkę jego powierzchni, m/m^2
M	- współczynnik obliczony według zależności (3.31), -
M	- masa próbki włókniny o średnicy D , kg
M	- wartość średnia
Me	- mediana
$Mean$	- wartość średnia kwadratów
$Square$	
Min	- obserwowany poziom istotności przy odrzuconych zmiennych niezależnych
$Toler$	
$Min.$	- element minimalny i maksymalny
Max	
Mod	- moda
M_p	- masa powierzchniowa włókniny, kg/m^2
$Multiple R$	- współczynnik korelacji wielorakiej
n	- współczynnik nachylenia stycznej do krzywej $\Delta p_{ex}/u^2=f(u)$ poprowadzonej dla prędkości obliczeniowej, $Pa \cdot s^2/m^2$

n	- ilość obserwacji
p	- ciśnienie, Pa
P	- macierz współczynników korelacji całkowitej
P{...}	- miara probabilistyczna (prawdopodobieństwo)
Partial	- częściowy współczynnik korelacji
Pe	- liczba Pecleta, -
P _{ii} , P _{jj}	- odpowiednie dopełnienia algebraiczne macierzy P powstałe przez skreślenie jej i-tego wiersza i i-tej kolumny oraz jej j-tego wiersza i j-tej kolumny
P _{ij}	- dopełnienie algebraiczne macierzy P współczynników korelacji par wszystkich włączonych do analizy zmiennych, powstałych przez skreślenie jej i-tego wiersza i j-tej kolumny
PIN	- założony poziom istotności dla testu F-Snedecora
Q	- ładunek elektrostatyczny, C
Q _L	- ładunek elektrostatyczny odniesiony do jednostkowej długości włókna, C/m
R	- liczba bezpośredniego zaczepienia, -
R	- macierz współczynników korelacji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi
R Square, R ²	- nieskorygowany współczynnik determinacji (oznaczalności)
R, R _w	- współczynnik korelacji wielorakiej
R _{1 23 k}	-
r _{cz}	- promień cząstki aerozolu, m
Re	- liczba Reynoldsa, -
Regression	- regresja
Residual	- reszta
r _{ijklz}	- współczynnik korelacji cząstkowej
Ro	- rozstęp
\bar{R}	- estymator współczynnika korelacji R
R ²	- skorygowany współczynnik determinacji
s ²	- nieobciążony estymator wariancji σ^2 składnika losowego
s _b	- błąd standardowy oceny estymatora b
SD	- odchylenie standardowe
SE	- błąd wartości średniej
SE B	- ocena błędu średniego szacunku parametru równania regresji
Sig T	- obserwowany poziom istotności testu t- Studenta podczas weryfikacji hipotezy o istotności odchylen od zera poszczególnych parametrów (współczynników) regresji
Signif F	- obserwowany poziom istotności testu F-Snedecora podczas weryfikacji hipotezy o istotności odchylen od zera współczynnika korelacji wielorakiej
S _{D_p}	- ilość ziaren o średnicy zastępczej D _p w pyłe wprowadzanym na warstwę filtracyjną, -
Standard Error	- błąd standardowy
Stk	- liczba Stokesa, -
Stk _{KR}	- krytyczna wartość liczby Stokesa, -
Sum of Squares	- suma kwadratów
S _{w_i}	- ilość ziaren o średnicy zastępczej D _p w pyłe zatrzymanym w warstwie filtracyjnej, -
S _z	- ilość ziaren o średnicy zastępczej D _p w pyłe, która przeszła przez warstwę filtracyjną, -
T	- temperatura powietrza, K
t, T	- statystyka t-Studenta
t _α	- wartość zmiennej t Studenta dla n-k-1 stopni swobody i dla ustalonego z góry współczynnika ufności 1-α

u	- prędkość napływu powietrza, m/s
$V(\dots)$	- kowariancja
$V(B)$	- błąd standardowy współczynnika regresji B
Variable	- zmienne występujące w analizie regresji
X	- $(n \times (k+1))$ - wymiarowa macierz obserwacji dokonanych w n-elementowej próbie na $(k+1)$ zmiennych niezależnych $X_1, X_2, \dots, X_k, X_{k+1}$,
y	- n-wymiarowy wektor kolumnowy obserwacji dokonanych w n-elementowej próbie na zmiennej zależnej Y
\hat{y}	- wektor oszacowań wartości zmiennej zależnej
\hat{y}_t	- wartość teoretyczna zmiennej zależnej
α	- gęstość upakowania włókniny, -
α	- poziom istotności
β	- $(k+1)$ -wymiarowy wektor kolumnowy parametrów (współczynników regresji wielorakiej)
β_i	- współczynnik regresji wielorakiej przy zmiennej niezależnej X_i ,
β_{i0}	- współczynnik regresji wielorakiej przy zmiennej niezależnej X_i przy wystąpieniu hipotezy zerowej
$\hat{\beta}$	- wektor oszacowań parametrów
δ	- współczynnik poprawkowy charakteryzujący rozproszenie wartości promieni włókien, -
Δp	- strata ciśnienia, Pa
Δp_{ex}	- opór przepływu powietrza przez filtr, określony z równania regresji oporu przepływu powstałego na podstawie danych eksperymentalnych dla danej prędkości przepływu powietrza u z zależności $\Delta p = f(u)$, Pa
ϵ	- n-wymiarowy wektor kolumnowy losowy
ϵ	- współczynnik poprawkowy uwzględniający niejednorodność materiału filtracyjnego, -
ϵ_0	- współczynnik uwzględniający niejednorodność struktury filtru w przypadku włókien monodispersyjnych, -
ϵ_{01}	- współczynnik uwzględniający niejednorodność struktury filtru w przypadku włókien polidispersyjnych, -
$\hat{\epsilon}$	- wektor oszacowań składnika losowego
$\hat{\epsilon}_t$	- wartość teoretyczna składnika losowego
Θ	- poprawka na właściwości gazu uwzględniająca jego gęstość i lepkość, obliczona z zależności (3.23)-
η	- przedziałowa skuteczność filtracji, %
η_C	- całkowita skuteczność filtracji powietrza, -
η_D	- prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie w wyniku zjawiska dyfuzji, -
η_{DR}	- prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie w wyniku zjawiska dyfuzji z uwzględnieniem bezpośredniego zaczepienia, -
η_i	- współczynnik przedziałowej skuteczności filtracji powietrza odniesiony do ziaren pyłu o średnicy zastępczej D_{pi} , -
η_P	- sumaryczne prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie, -
η_R	- prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie w wyniku bezpośredniego zaczepienia, -
η_{RSuk}	- prawdopodobieństwo osadzania cząstek na wyizolowanym włóknie w wyniku bezpośredniego zaczepienia i osadzania bezwładnościowego, -
η_{Suk}	- prawdopodobieństwo osadzania na drodze bezwładności, -

λ	- średnia długość drogi swobodnej cząstki gazu, m
λ_w	- liniowa gęstość ładunku elektrostatycznego, C/m
μ_r	- współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, Pa·s
ρ_g	- gęstość gazu (powietrza), kg/m ³
ρ_p	- gęstość pyłu, kg/m ³
ρ_w	- gęstość włókien, kg/m ³
ρ_w^*	- zmienna niezależna wprowadzona do równania regresji zamiast zmiennej ρ_w , $\rho_w^* = \ln(\rho_w)$
σ	- odchylenie standardowe
σ^2	- wariancja
τ	- współczynnik poprawkowy wyznaczony przez Kirsza, uwzględniający wzajemne oddziaływanie cząstek i powierzchni włókna
φ^2	- współczynnik zbieżności

LITERATURA

- [1] **Ando K., Tabahashi M., Togashi R., Okumura Y.**, Properties of Electret Filters with Low Pressure Drop and High Collection Efficiency, w: Proceedings of the Third International Aerosol Conference. September 24-27, 1990, Kyoto, Japan. Eds. Masuda S., Takahashi K., Pergamon Press, BPCC Wheatons Ltd., Exeter, Great Britain, vol. 2, 1990, s. 702-705
- [2] **ASHRAE 52-76 (1992)**, Gravimetric and Dust-Spot Procedures for Testing Air-Cleaning Devices Used in General Ventilation for Removing Particulate Matter.
- [3] **Benjamin J.R., Cornell C.A.**, Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1977
- [4] **Biuletyn Informacyjny Elektroniki Praktycznej**, Fabryki przyszłości, 8/95
- [5] **Biuletyn Informacyjny Elektroniki Praktycznej**, Mikroelektronika w 2010 roku, 7/95
- [6] **Blalock H.M.**, Statystyka dla socjologów, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1975
- [7] **BN-77/9542-01**, Sprzęt ochrony dróg oddechowych. Filtry i materiały filtracyjne. Oznaczanie wskaźnika przenikania metodą nefelometryczną.
- [8] **BN-78/8962-09**, Wentylacja i klimatyzacja. Filtry działkowe. Wspólne wymagania i badania.
- [9] **BN-85/9542-14**, Sprzęt indywidualnej ochrony dróg oddechowych stosowany w środowisku powietrznym. Metody badań. Oznaczanie nieselektywnych defektów strukturalnych elementów filtropochłaniających i filtrów.
- [10] **BN-88/8962-05**, Wentylacja i klimatyzacja. Filtry powietrza. Klasy jakości.
- [11] **Brown R.C.**, Air Filtration, An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters, Pergamon Press. Printed in Great Britain by BPPC Wheatons Ltd. Exeter, 1993
- [12] **Cai J.**, Fibrous Filters with Non-Ideal Conditions, Department of Heating and Ventilation, The Royal Institute of Technology, Samhall Avabe AB, Stockholm, 1992
- [13] **Charkowska A.**, Czystość powietrza w pomieszczeniach szpitalnych - wymagania i kontrola, Wydawnictwa Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej, 1996
- [14] **Charkowska A., Jędrzejewska-Ścibak T.**, Problemy oczyszczania powietrza w systemach klimatyzacji, w: Materiały XI Konferencji Naukowo - Technicznej: Wentylacja w budownictwie i przemyśle, 24-25 listopad 1994, Kraków (Dobczyce), s. 21-38, 1994
- [15] **Charkowska A., Nowicki J.**, Analiza możliwości wykorzystania modeli matematycznych do opisu procesu filtracji wysokodispersyjnych aerozoli w złożach z włókien szklanych, w: Materiały Konferencyjne Konferencji Naukowo-Technicznej "Indywidualne środki ochrony przed skażeniem", Warszawa, 21-22.10.1992, s. 199-213
- [16] **Dąbrowski J., Świckatowski W.**, Sprawozdanie z wykonania prac dla Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji P.W. pt. Opracowanie warunków formowania techniką papierniczą struktur z mikrowłókien szklanych o zróżnicowanej tendencji do flokulacji przeznaczonych do filtracji powietrza; Ocena podstawowych parametrów jakościowych próbek struktur z mikrowłókien szklanych przeznaczonych do badań modelowych filtracji powietrza, Instytut Papiernictwa i Maszyn Papierniczych Politechniki Łódzkiej, Łódź, sierpień 1993
- [17] **Dąbrowski J., Gonera H.**, Formowanie papieropodobnych struktur z mikrowłókien szklanych, w: Przegląd Papierniczy, nr 10, 1994, s. 499-504
- [18] **Encyklopedia Techniki**, Chemia, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1993
- [19] **EUROVENT 4/4**, Sodium Chloride Aerosol Test for Filters Using Flame Photometric Technique, 1973

- [20] **EUROVENT 4/5**, Method of Testing Air Filters Used in General Ventilation, 1978
- [21] **Federal Standard 209E**, Airborne Particulate Cleanliness Classes in Cleanrooms and Clean Zones, 1992
- [22] **Filter Engineering**, Camfil, Informator techniczny
- [23] **Furs S.**, Analiza teoretyczna i empiryczna oporów włóknistych materiałów filtracyjnych i filtrów przeciwpylowych, Rozprawa doktorska, Instytut Maszyn i Urządzeń Włókienniczych Politechniki Łódzkiej, Centralny Instytut Ochrony Pracy, Łódź, 1977
- [24] **Furs S., Zakrzewski J.**, Zastosowanie analizy wymiarowo-probabilistycznej do wyznaczania oporów przepływu powietrza przez włókniste materiały filtracyjne, Prace CIOP, Zeszyt 99, 1978, s. 327-352
- [25] **Górniak J., Lesińska E.**, Pakiet statystyczny SPSS, Marketing Mix, 5/1996
- [26] **Greń J.**, Statystyka matematyczna, modele i zadania, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1984
- [27] **Grzybowski P.**, Skuteczność filtracji wydłużonych cząstek aerozolowych na pojedynczym elemencie filtra, Praca doktorska, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1995
- [28] **ISO/DIS 14644-1: 1996**, Cleanrooms and Associated Controlled Environments, Part 1: Classification of Airborne Particulates
- [29] **Jankowska E.**, Klasyfikacja i metody badania filtrów powietrza, w *Bezpieczeństwo Pracy*, nr 2, 1996, s. 18-21
- [30] **Jankowska E.**, Layers Nonwoven Filtrating Fabrics, w: *Indoor air Quality Problems: from Science to Practice*, Eds.: T. Jędrzejewska-Ścibak, J. Sowa, Wydawnictwa Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji P.W., Warszawa, 1993, s. 247-252
- [31] **Jankowska E. i in.**, Bezazbestowe filtry przeciwpylowe do urządzeń filtrowentylacyjnych stosowanych w wentylacji miejscowej i ogólnej. Założenia techniczne dla bezazbestowych materiałów filtracyjnych oraz filtrów przeciwpylowych, Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa, 1991
- [32] **Jankowska E. i in.**, Opracowanie metody wyznaczania wskaźników filtracyjnych filtrów powietrza testem mgły olejowej na podstawie analizy europejskich i międzynarodowych norm i dokumentów normalizacyjnych, Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa, 1996
- [33] **Jin Y.H.**, Determination of Structural Parameters for Filter Materials, w: *Stofnanalys*, Del 11, Department of Heating and Ventilation, The Royal Institute of Technology, Stockholm, 2/1988, s. 37-43
- [34] **Jóźwiak J., Podgórski J.**, Statystyka od podstaw, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 1992
- [35] **Kabsch P.**, Odpylanie i odpylacze, Tom 1: Mechanika aerozoli i odpylanie suche, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1992
- [36] **Kawalerow G.I., Mandelsztam S.M.**, Wprowadzenie do teorii pomiarów, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1983
- [37] **Kirsz A.A., Stieczkina L.B.**, The Theory of Aerosol Filtration with Fibrous Filters, w: *Aerosol Science*, Ed.: D.T. Shaw, Wiley, New York, 1978, s. 165-256
- [38] **Lisowski A., Jankowska E., Brzozowski A.**, Dostosowanie krajowych wymagań i metod badań do norm światowych dla środków ochrony zbiorowej przed zapyleniem, Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa, 1993
- [39] **Lücke T.**, Filtrationseigenschaften inhomogener Filtermedien für die Schwebstofffiltration, Dr.-Ing. Dissertation, Technischen Universität Dresden, 1994
- [40] **Makać W., Urbanek-Krzysztofik D.**, Metody opisu statystycznego, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 1995
- [41] **Mölter W., Fissan H.**, Die Filtrationseigenschaften von HEPA-Glasfaser-Filtermedien:

- Auswirkung der realen Struktur und Aussagekraft integraler Strukturdaten. Teil 1, Staub-Reinhaltung der Luft 55, 1995, s. 411-416
- [42] **Möller W., Fissan H.**, Gewinnung innerer Strukturdaten von HEPA-Glasfaserfiltermedien, Teil 2, Staub-Reinhaltung der Luft 55, 1995, s. 379-382
- [43] **Möller W., Helsper Ch., Kaminski S.**, Automitierter Test von Luftfiltermedien für Hochleistungsschwebstofffilter und Entstaubungsfilter, w: Staub-Reinhaltung der Luft, 50, 1990, s. 311-317
- [44] **Müller E.**, Separation of Oil Downstream of Lubricated High-pressure Compression, w: Filtration and Separation, May/June 1988, s. 191-193
- [45] **Müller K.G.**, 30 Jahre Reinraumtechnik - Entwicklung in Deutschland, Gesundheits - Ingenieur - Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik 117, 1996, Helt 1, s. 14-22
- [46] **Neuber A.**, Modellierung und Optimierung von Schwebstofffiltern, Dissertation, Der Fakultät für Maschinenwesen des Wissenschaftlichen Rates der Technischen Universität Dresden, 1991
- [47] **Nietzold I.**, Filtracja powietrza, Wydawnictwo Arkady, 1984
- [48] **Norusis M.J.**, SPSS/PC+ Advanced Statistics™ 4.0 for the IBM PC/XT/AT and PS/2, SPSS/PC Inc, Chicago, USA
- [49] **Nowicki J., Pilaciński W., Sokolowska D.**, Charakterystyka filtracyjna włóknin pneumatycznych, w: Materiały Konferencyjne Konferencji Naukowo-Technicznej "Indywidualne środki ochrony przed skażeniem", Wojskowy Instytut Chemii i Radiometrii, Warszawa, 21-22.10.1992, s. 216-217
- [50] **Nowicki J., Pilaciński W., Sokolowska D.**, Materiały włókninowe filtrów klimatyzacyjnych. Wymagania. Metody badań. Pomiary wstępne., w: Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów, Nr 3/1993, s. 72-76
- [51] **Nowicki M.**, Proces filtracji aerozolu w filtrach włóknistych z poliakrylonitrylu, Praca doktorska, Zakład Ochrony Atmosfery Instytutu Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1972
- [52] **Onderski W.**, Sprawozdanie z wykonania pracy dla Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji P.W. pt. Badanie struktur włókniny za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego, Warszawa, 1993
- [53] **Ottney T.C.**, Helping Users with a Universal Air Filter Classification System, w: ASHRAE Journal, September 1993, s. 56-58
- [54] **Pacut A.**, Prawdopodobieństwo. Teoria. Modelowanie probabilistyczne w technice, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1985
- [55] **Piotrowski J.**, Teoria pomiarów. Pomiary w fizyce i technice, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1986
- [56] **PN-72/P-04604**, Metody badań surowców włókienniczych. Rozpoznawanie włókien.
- [57] **PN-74/M-52052**, Urządzenia odpylające. Filtry tkaninowe. Oznaczenie parametrów charakterystycznych tkaniny filtracyjnej.
- [58] **PN-74/Z-01001/04**, Ochrona czystości powietrza. Nazwy, określenia i jednostki dotyczące charakterystycznych wielkości oddzielaczy cząstek oraz filtrów aerozolu.
- [59] **PN-81/P-04612**, Metody badań wyrobów włókienniczych. Pomiar grubości.
- [60] **PN-84/C-96059**, Przetwory naftowe. Oleje turbinowe TU.
- [61] **PN-87/Z-02010/15**, Sprzęt indywidualnej ochrony dróg oddechowych stosowany w środowisku powietrznym. Metody badań. Metoda wyznaczania wskaźnika filtracji przy użyciu cząstek chlorku sodu.
- [62] **PN-88/P-04768**, Włókna szklane. Wyznaczanie średnicy.
- [63] **PN-91/Z-01001/01**, Ochrona czystości powietrza. Terminologia i jednostki związane z

aerozolem i pyłem.

- [64] PN-92/M-53030, Urządzenia do oczyszczania powietrza i innych gazów. Terminologia.
- [65] PN-92/P-50000, Papier, tektura, masa włóknista i określenia związane. Terminologia.
- [66] PN-EN 143: 1996, Sprzęt ochrony układu oddechowego. Filtry. Wymagania, badanie, znakowanie.
- [67] PN-EN 29073-1: 1994, Tekstylnia. Metody badań włóknin. Wyznaczanie masy powierzchniowej.
- [68] PN-EN 29092, ISO 9092: 1992, Tekstylnia. Włókniny. Definicja.
- [69] PN-ISO 536: 1996, Papier i tektura. Oznaczanie gramatury.
- [70] **Poradnik inżyniera**, Włókiennictwo. Tom 1, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1988
- [71] prPN-EN 779, Przeciwpylowe filtry powietrza dla wentylacji ogólnej - wymagania, badanie, oznaczania.
- [72] prPN- (zamiast BN-78/8962-04), Wentylacja i klimatyzacja. Filtry powietrza. Grawimetryczne metody badań.
- [73] prPN- (zamiast BN-88/8962-05), Wentylacja i klimatyzacja. Filtry powietrza. Klasy jakości.
- [74] Ptak T., Proces filtracji aerozolu i optymalizacja włókninowego złoża filtracyjnego w obszarze przepływów przejściowych. Praca doktorska, Wydział Inżynierii Sanitarnej i Wodnej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1982
- [75] Reckangel H., Sprenger E., Hönmann W., Schramek E.R., **Poradnik Ogrzewanie+Klimatyzacja 1994/95**, Wyd. EWFE, Gdańsk, 1994
- [76] Sobczyk M., **Statystyka**. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1994
- [77] Sowa J., Proces migracji zanieczyszczeń powietrza w budynkach w warunkach stochastycznych zakłóceń. Rozprawa doktorska, Wydział Inżynierii Środowiska P.W., Warszawa, 1995
- [78] Strojny J., Elektryczność statyczna w pytaniach i odpowiedziach, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1979
- [79] Taylor J.R., Wstęp do analizy błędów pomiarowych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1995
- [80] Urbańczyk G.W., Nauka o włóknie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1985, s. 123-132
- [81] Użow W.N., Miagkow B.I., **Oczyszczanie przemysłowych gazów filtrami**. *Chimia*, Moskwa, 1970
- [82] Warych J., **Oczyszczanie przemysłowych gazów odlotowych**, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1994
- [83] Weiss - Clean Room Ceiling. Weiss Klimatechnik GmbH, Karta katalogowa, 1989
- [84] Wepfer R., Characterisation of HEPA and ULPA Filters by Proposed New European Test Methods, w: *Filtration and Separation*, Vol. 32, No. 6, 1995, s. 545-550
- [85] Wirski W., Wpływ parametrów włóknistej warstwy filtracyjnej na skuteczność odpylania. Praca doktorska, Wydział Chemii Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1969
- [86] Wywiał J., Kończak G., **Przykłady wnioskowania statystycznego za pomocą komputerowego pakietu SPSS**. PLJ, Warszawa, 1996
- [87] Zawada B.A., **Analiza procesu użytkowania energii cieplnej w eksploatacji obiektów przemysłowych**, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa, 1993

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Anna Charkowska

**Probabilistyczna ocena numerycznej skuteczności
filtracji aerozolu w materiałach mikrowłóknistych
o słabo zdeterminowanej strukturze**

ZAŁĄCZNIKI

ZAŁĄCZNIK 1

Wyniki pomiarów i analiz teoretycznych

W Załączniku 1 zamieszczono teoretyczne wartości przedziałowej numerycznej skuteczności filtracji oraz numerycznego przedziałowego współczynnika przeskoku w postaci graficznej oraz rzeczywiste wartości przeskoku i skuteczności filtracji w postaci graficznej oraz tabelarycznej.

Na wykresach powstałych w oparciu o modele procesów filtracyjnych zastosowano podane poniżej cyfrowe oznaczenia charakterystyk numerycznej przedziałowej skuteczności filtracji oraz numerycznego frakcyjnego przeskoku ziaren. Dla porównania, oprócz wartości określonych w oparciu o modele matematyczne, na tych samych wykresach umieszczono również uzyskane doświadczalnie wartości.

Zastosowane oznaczenia:

1. model matematyczny Daviesa,
2. model matematyczny Friedlandera - Whitbyego,
3. model matematyczny Torgensona,
4. model matematyczny Fuksa - Stieczkiny - Kirsza (równoległy),
5. model matematyczny Kirsza - Stieczkiny (wachlarzowy) bez uwzględnienia niejednorodności budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny,
6. model matematyczny Kirsza - Stieczkiny (wachlarzowy) z uwzględnieniem niejednorodności budowy włókien, z których wykonano materiał filtracyjny,
7. rzeczywisty przeskoc frakcyjny ziaren lub skuteczność filtracji.

Dla porównania przedstawiono wartości przeskoku dla zakresu wymiarów ziaren, dla których wykonano pomiary skuteczności filtracji oraz wartości skuteczności dla poszerzonego zakresu wielkości średnic ziaren, tzn. od 0.0042 do 10.0 μm . Na wykres o poszerzonym zakresie wymiarowym naniesiono również wyniki pomiarów.

Pomiary wykonano dla zakresu średnic o dolnej i górnej granicy wymiarowej wynoszącej $0.0316 \pm 1 \mu\text{m}$. Ze względu na podawanie przez licznik TSI 3030 ilości ziaren w odniesieniu do kanałów pomiarowych, zdefiniowanych przez średnią średnicę geometryczną, w pracy używano jako zakresu wymiarowego przedział $0.0422 \pm 0.75 \mu\text{m}$, pamiętając jednak, że w rzeczywistości maksymalnym wymiarem ziaren był 1 μm .

Na kolejnym wykresie przedstawiono opory przepływu w funkcji prędkości napływu powietrza na filtr. Umieszczono również równanie regresji liniowej charakterystyki oporowej oraz współczynniki oznaczalności (R^2) i regresji (R).

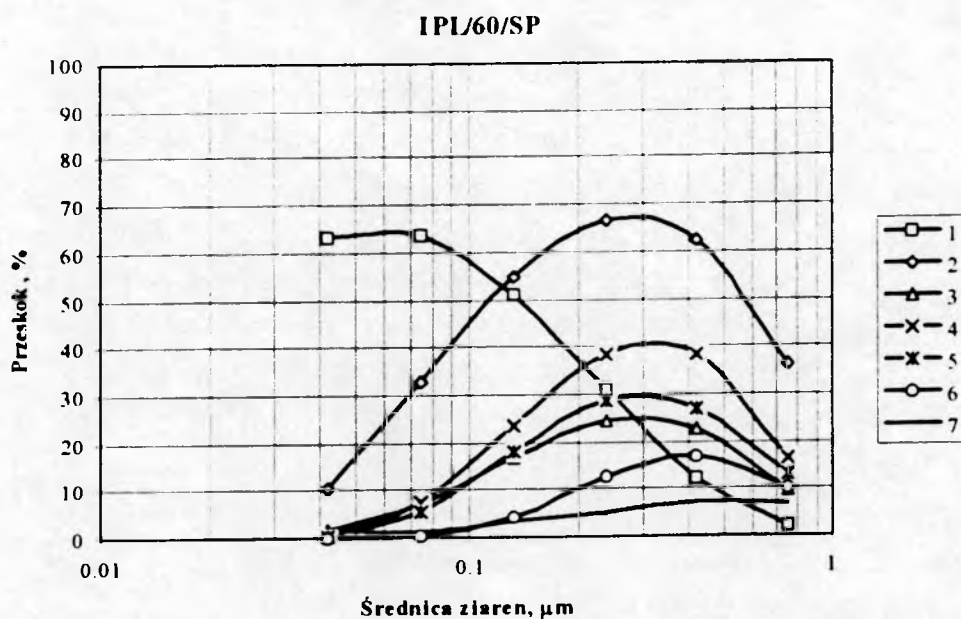
Zastosowano następujące oznaczenia:

- Δp opory przepływu powietrza, Pa
 u prędkość napływu powietrza na filtr, cm/s

WŁÓKNINA FILTRACYJNA I PL/60/SP

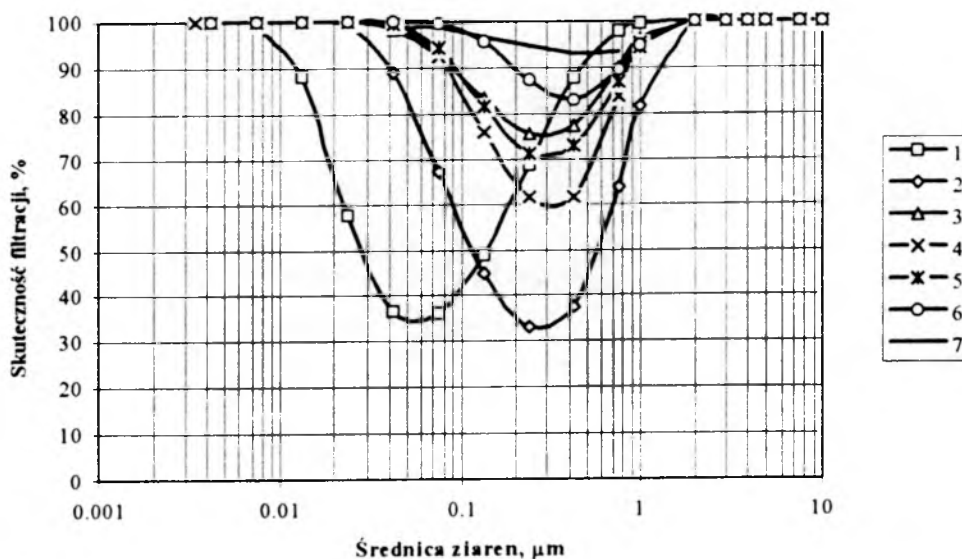
Tabela Z.1.1. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku [%]
0.0422	5258	85	98.38342	1.61658
0.075	36527	531	98.54628	1.45372
0.133	21028	711	96.61879	3.38121
0.237	8360	421	94.96412	5.03588
0.422	2847	202	92.90481	7.09519
0.75	742	49	93.39623	6.60377



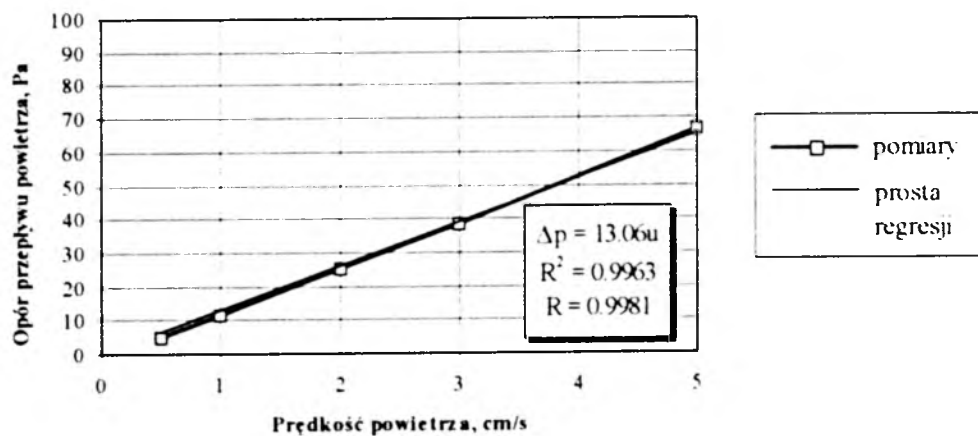
Rysunek Z1.1. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$

IPL/60/SP



Rysunek Z1.2. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

IPL/60/SP

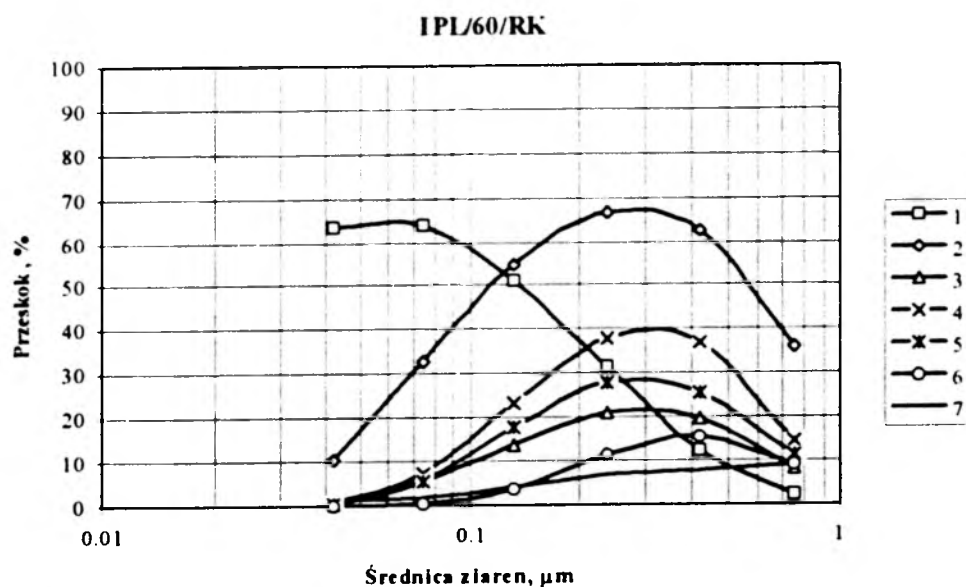


Rysunek Z1.3. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

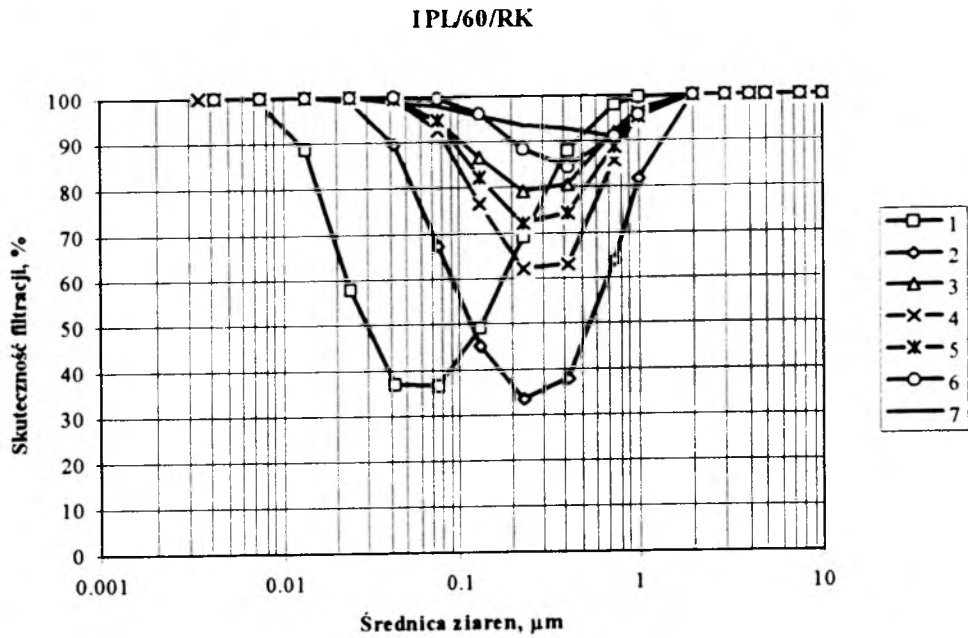
WŁÓKNINA FILTRACYJNA I PL/60/RK

Tabela Z1.2. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

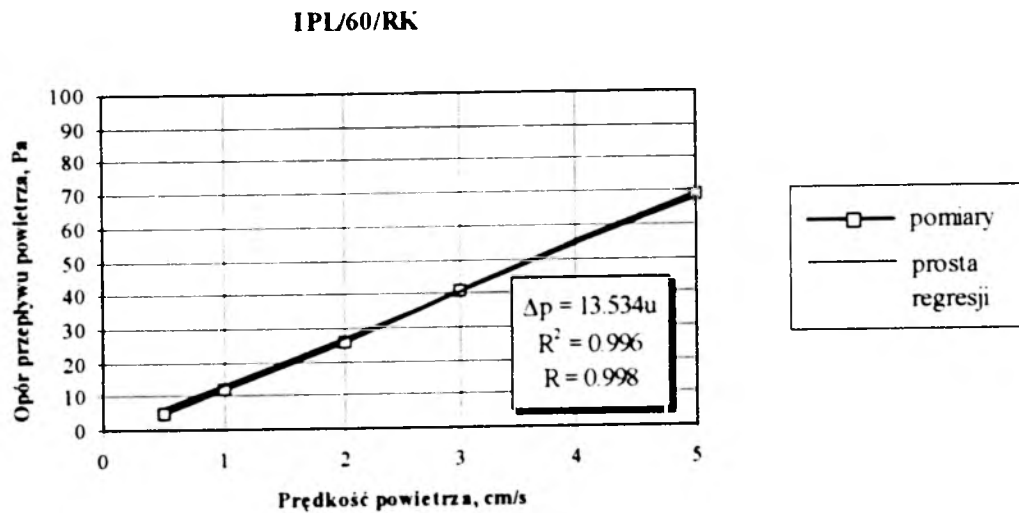
Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	11534	156	98.64748	1.35252
0.075	38484	773	97.99137	2.00863
0.133	22052	945	95.71467	4.28533
0.237	8486	565	93.34198	6.65802
0.422	2812	213	92.42532	7.57468
0.75	712	65	90.87079	9.12921



Rysunek Z1.4. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$



Rysunek Z1.5. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

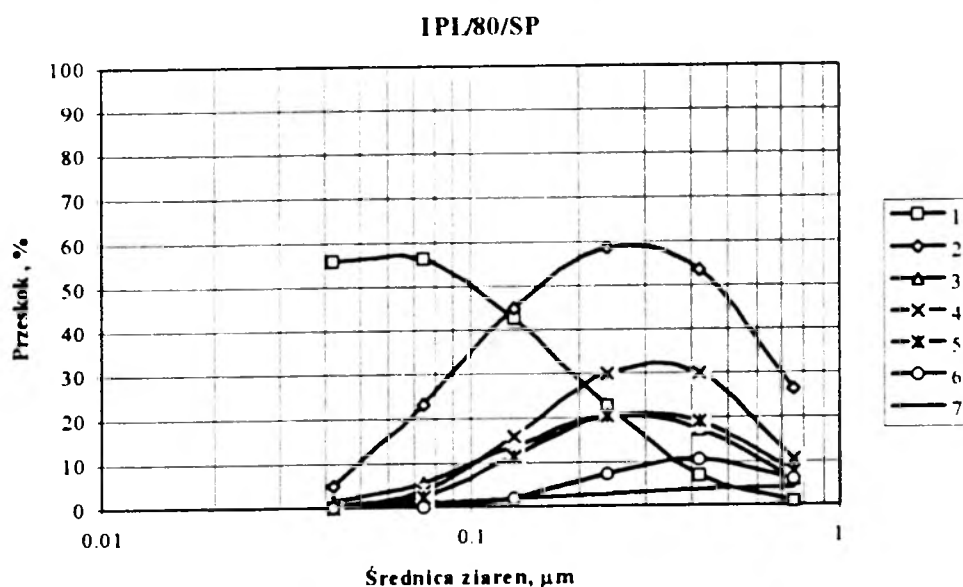


Rysunek Z1.6. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

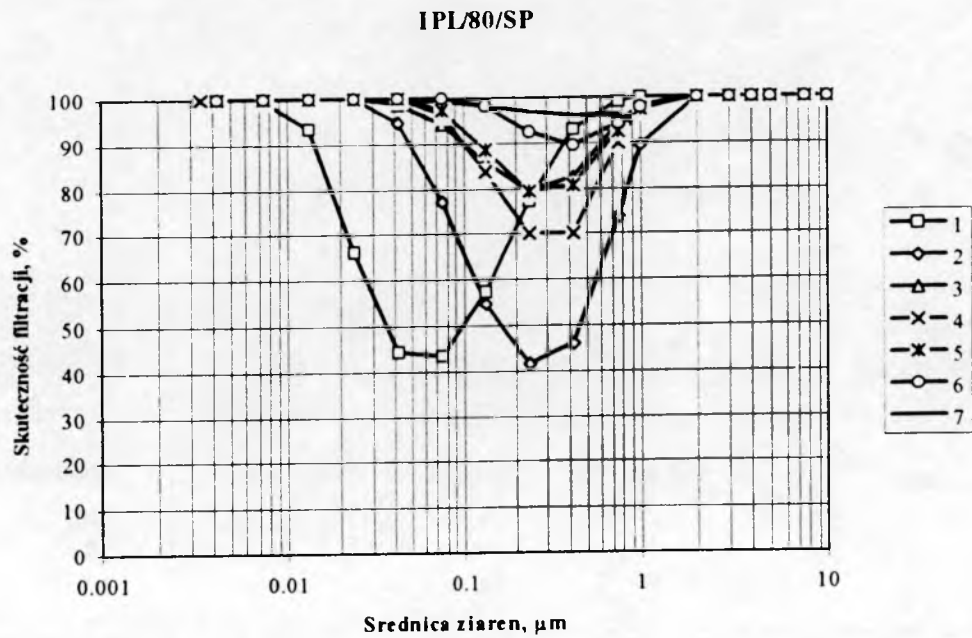
WŁÓKNINA FILTRACYJNA I PL/80/SP

Tabela Z1.3. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

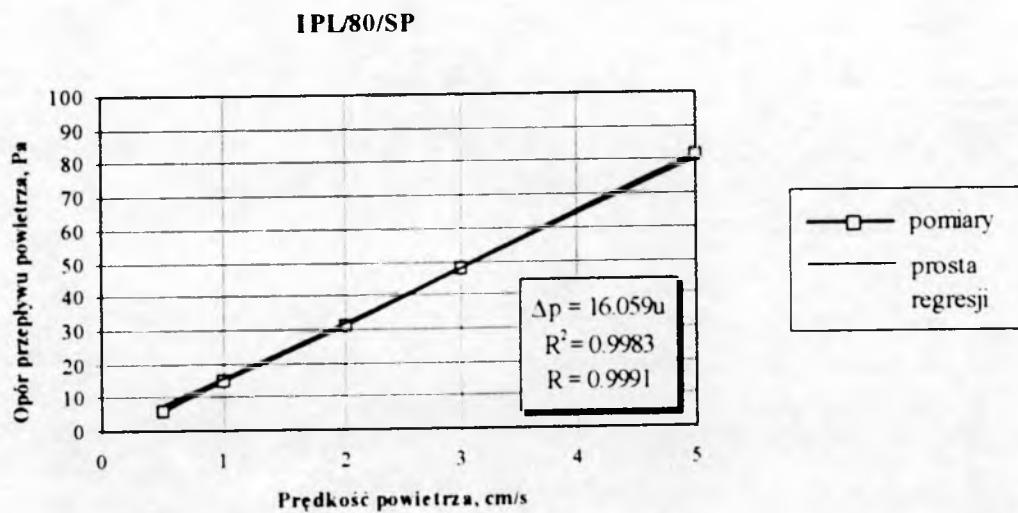
Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	16855	77	99.54316	0.45684
0.075	40068	286	99.28621	0.71379
0.133	22620	396	98.24934	1.75066
0.237	8564	253	97.04577	2.95423
0.422	2768	106	96.17052	3.82948
0.75	687	28	95.92431	4.07569



Rysunek Z1.7. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach 0.0422÷0.75 μm



Rysunek Z1.8. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$



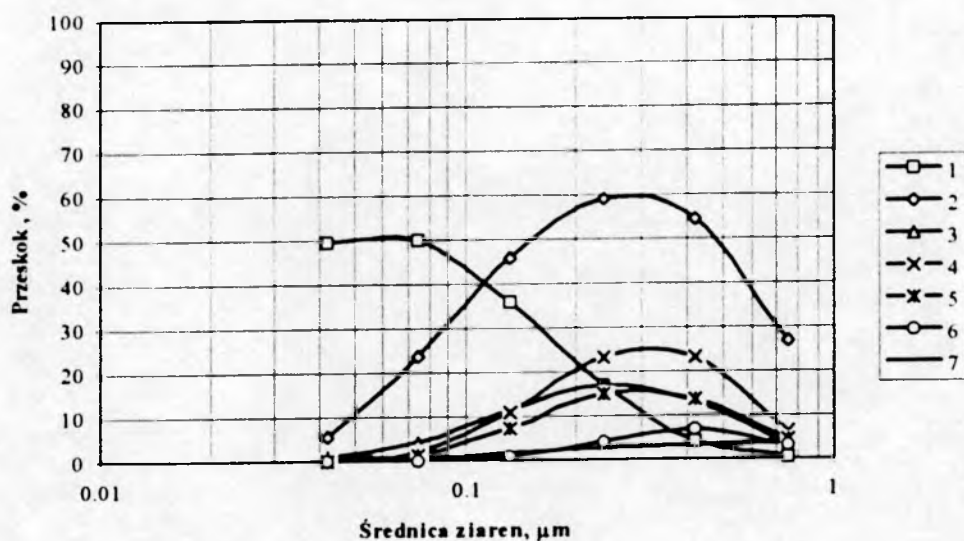
Rysunek Z1.9. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA I PL/80/RK

Tabela Z1.4. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

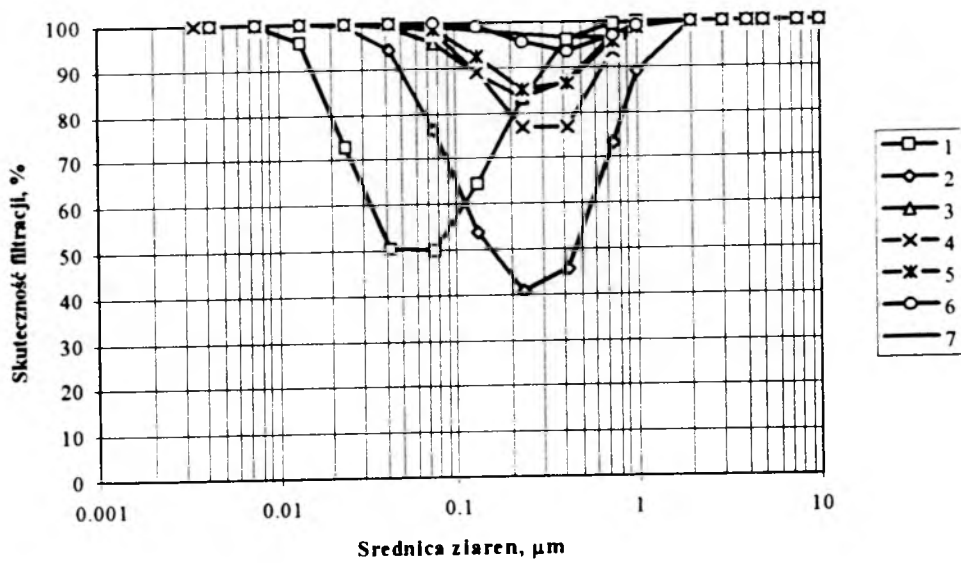
Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	7923	99	98.75047	1.24953
0.075	42553	280	99.34120	0.65880
0.133	22399	381	98.29903	1.70097
0.237	8439	235	97.21531	2.78469
0.422	2814	95	96.62402	3.37598
0.75	669	24	96.41256	3.58744

IPL/80/RK



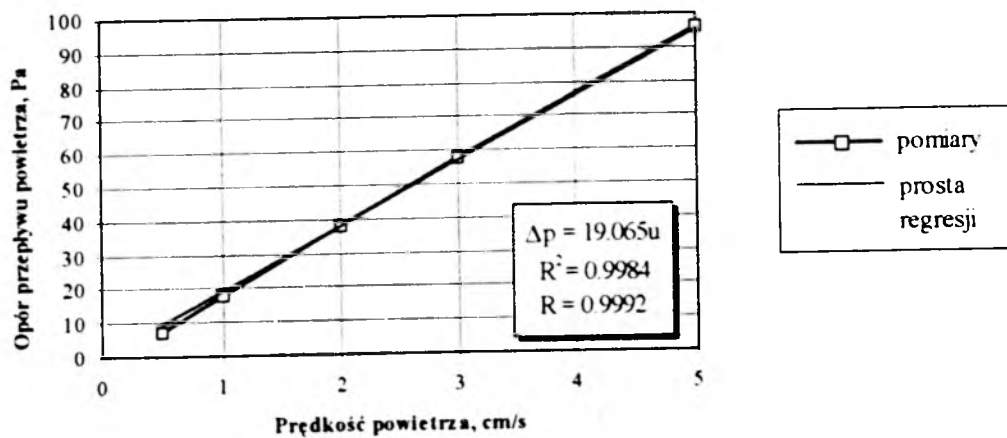
Rysunek Z1.10. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach 0.0422÷0.75 μm

IPL/80/RK



Rysunek Z1.11. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

IPL/80/RK

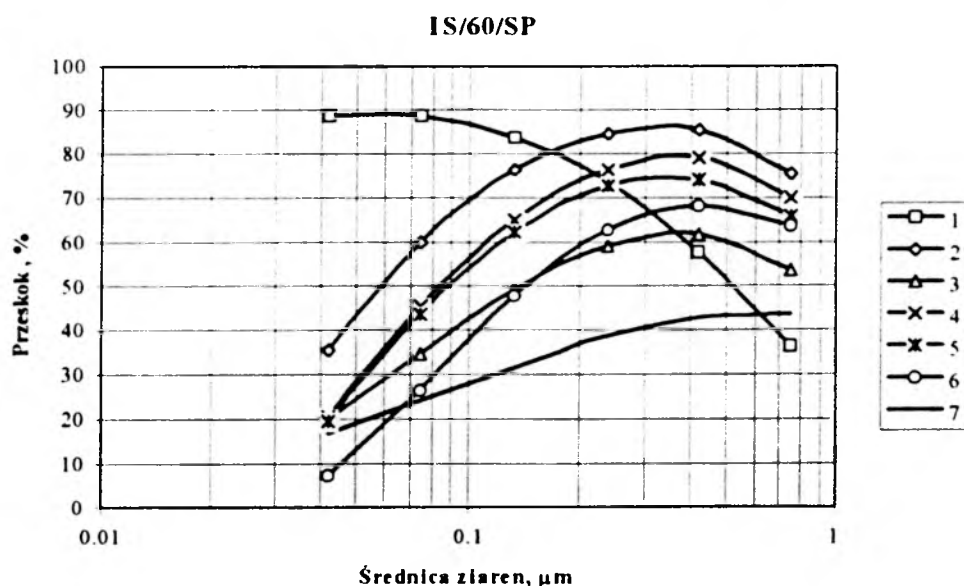


Rysunek Z1.12. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA I S/60/SP

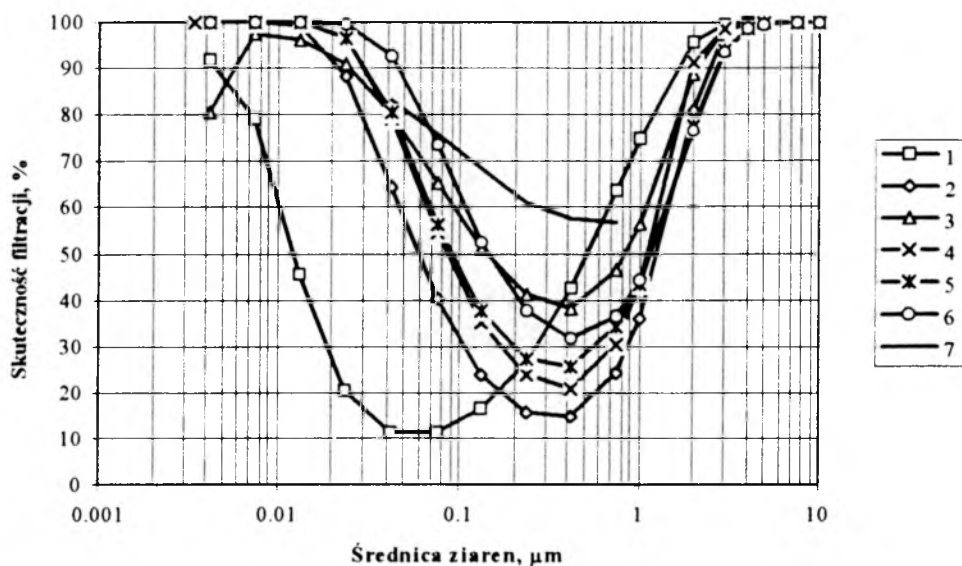
Tabela Z1.5. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	6162	1037	83.17105	16.82895
0.075	34683	8376	75.84984	24.15016
0.133	19211	6043	68.54406	31.45594
0.237	6793	2636	61.19535	38.80465
0.422	2082	886	57.44477	42.55523
0.75	594	258	56.56566	43.43434



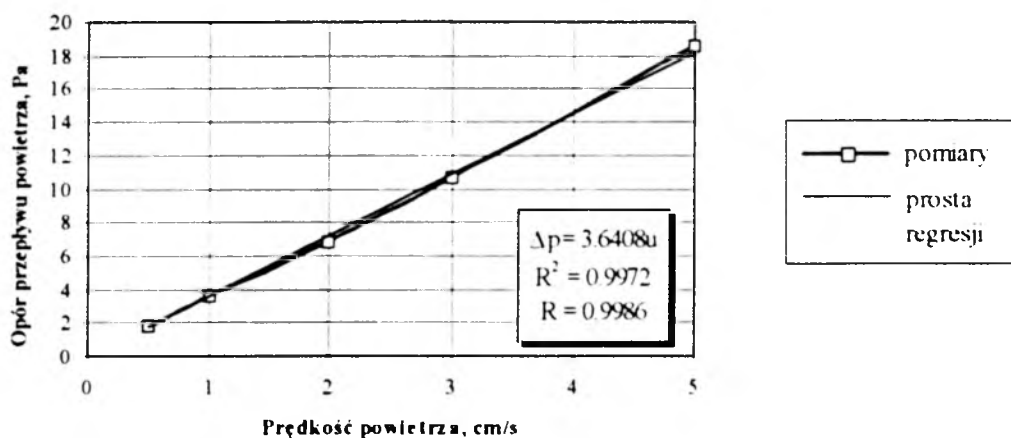
Rysunek Z1.13. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$

IS/60/SP



Rysunek Z1.14. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

IS/60/SP

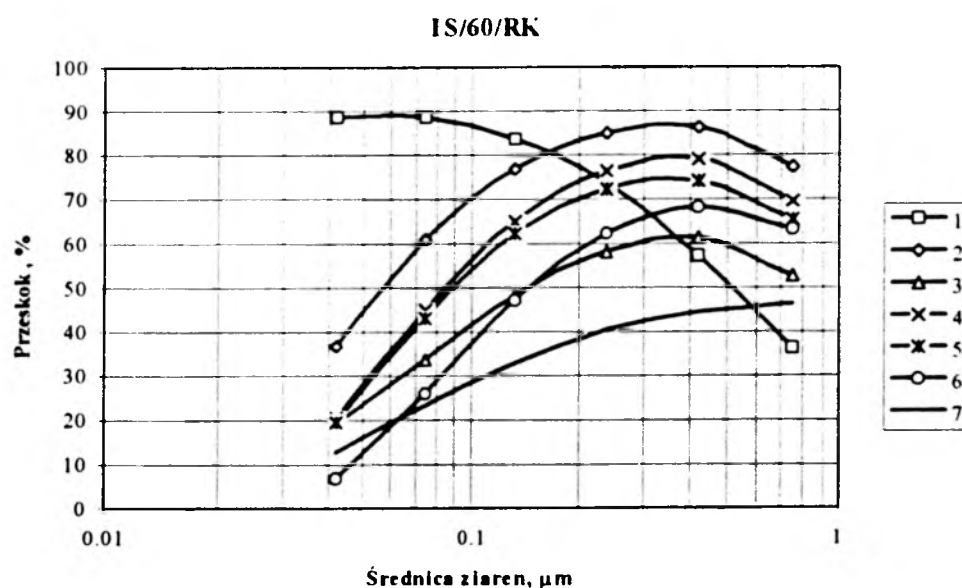


Rysunek Z1.15. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA I S/60/RK

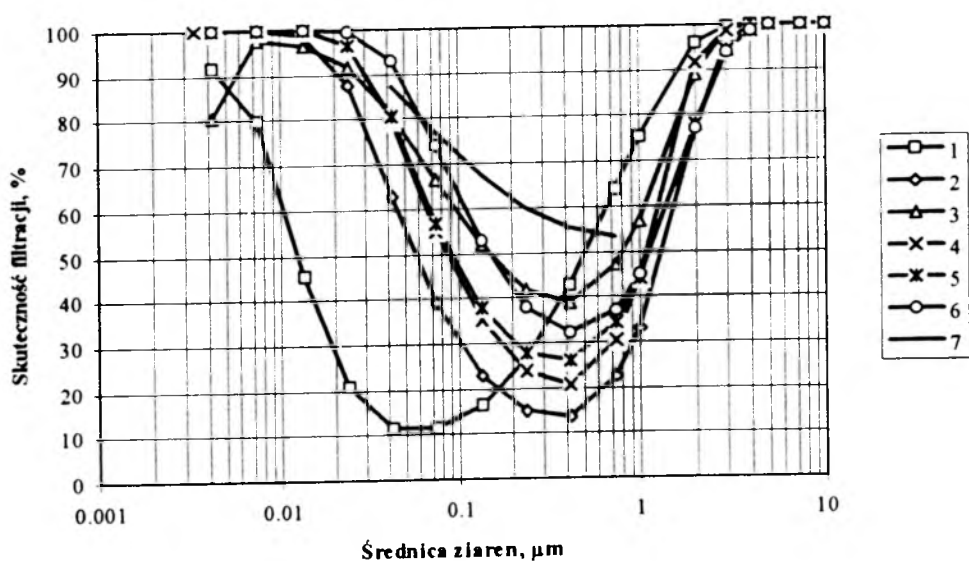
Tabela Z1.6. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	15283	1978	87.05752	12.94248
0.075	41756	9624	76.95182	23.04818
0.133	21988	7167	67.40495	32.59505
0.237	8003	3224	59.71511	40.28489
0.422	2529	1125	55.51601	44.48399
0.75	614	286	53.42020	46.57980



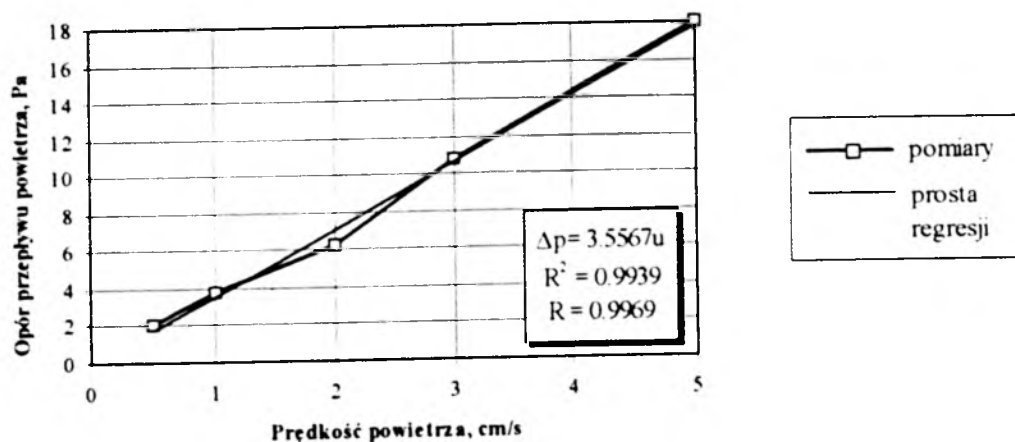
Rysunek Z1.16. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$

IS/60/RK



Rysunek Z1.17. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

IS/60/RK

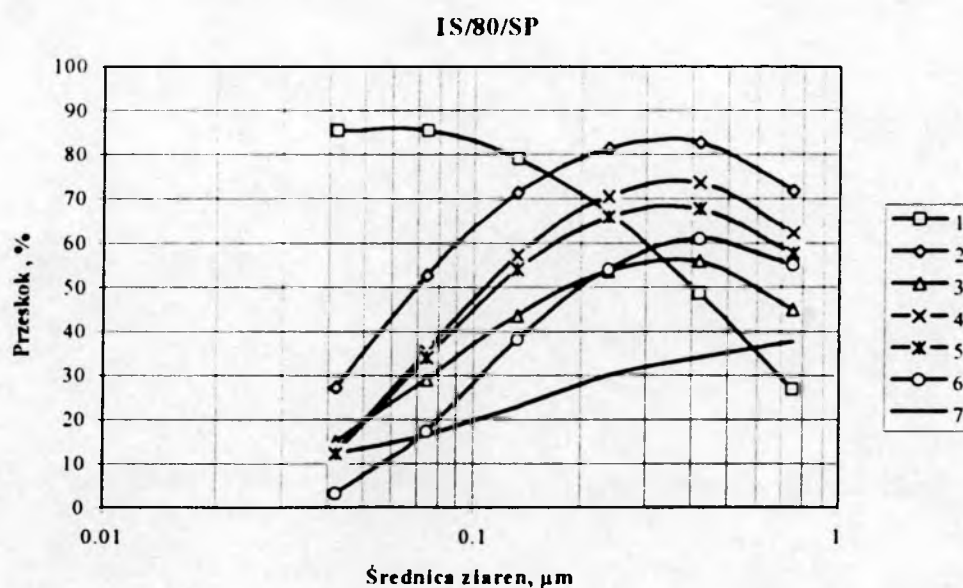


Rysunek Z1.18. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA I S/80/SP

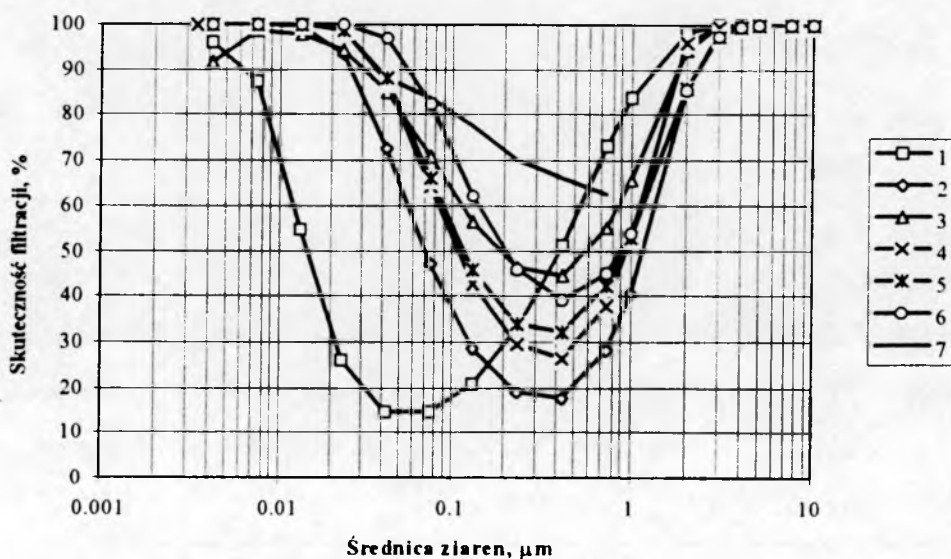
Tabela Z1.7. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/m ³]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/m ³]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	3806	461	87.88755	12.11245
0.075	35393	5741	83.77928	16.22072
0.133	21715	4901	77.43035	22.56965
0.237	8102	2440	69.88398	30.11602
0.422	2517	853	66.11045	33.88955
0.75	696	262	62.35632	37.64368



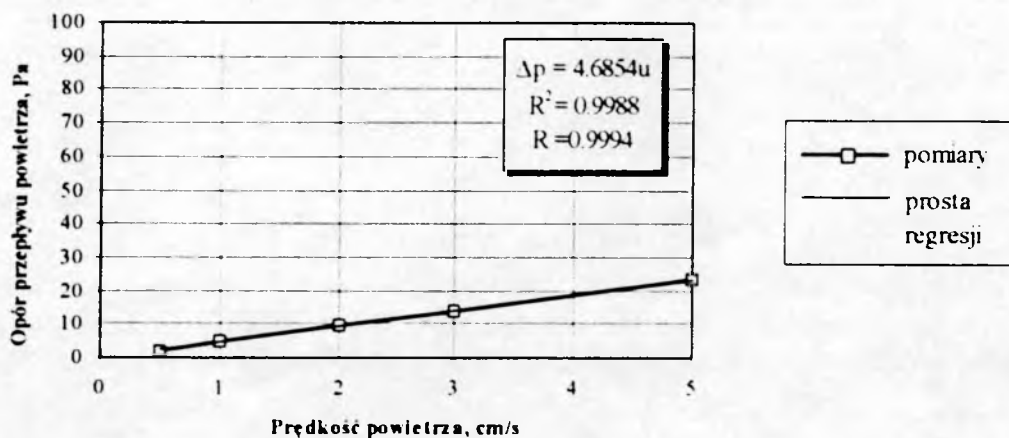
Rysunek Z1.19. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach 0.0422÷0.75 μm

IS/80/SP



Rysunek Z1.20. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

IS/80/SP

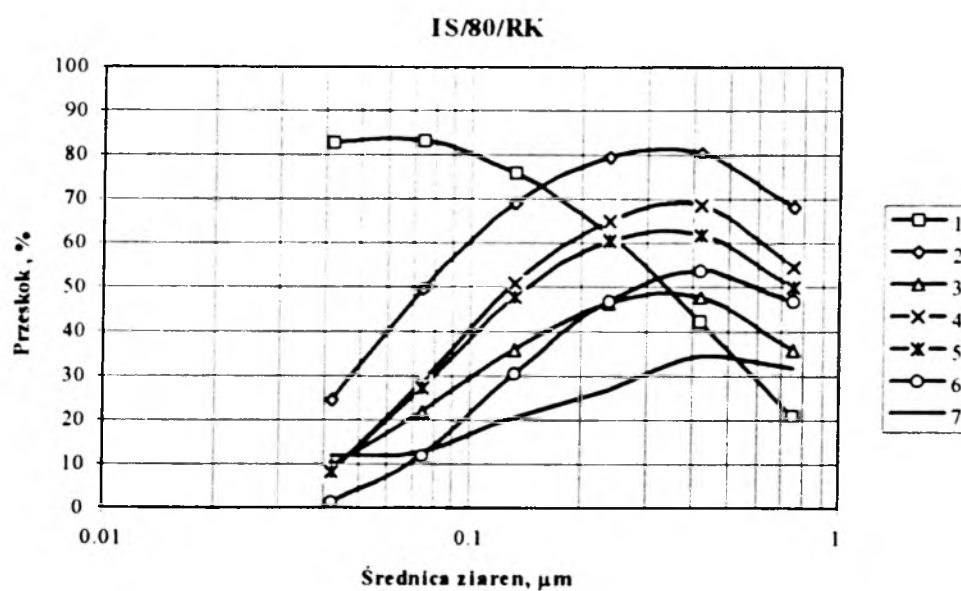


Rysunek Z1.21. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA I S/80/RK

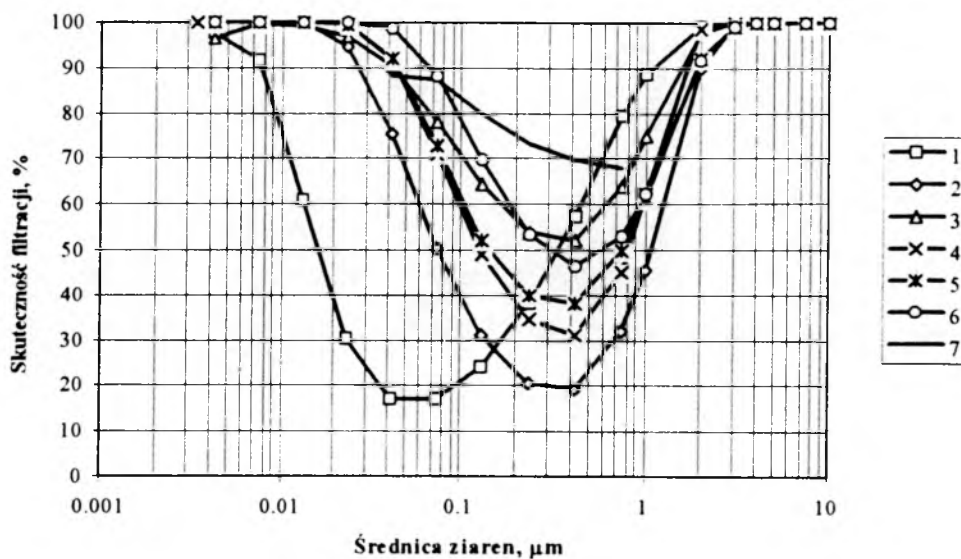
Tabela Z1.8. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	11387	1358	88.07412	11.92588
0.075	34686	4402	87.30900	12.69100
0.133	18845	3840	79.62324	20.37676
0.237	6456	1721	73.34263	26.65737
0.422	2001	609	69.56522	34.43478
0.75	550	175	68.18182	31.81818



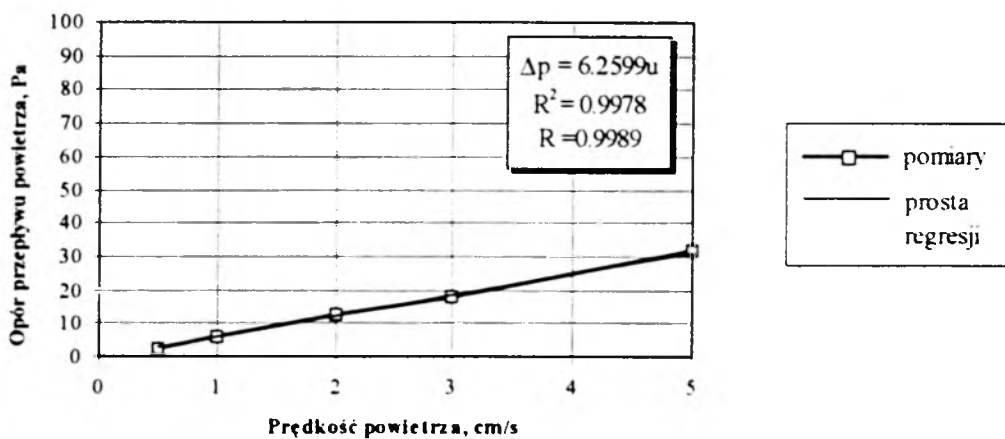
Rysunek Z1.22. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$

IS/80/RK



Rysunek Z1.23. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla dla ziaren o średnicach 0.0042÷10 μm

IS/80/RK

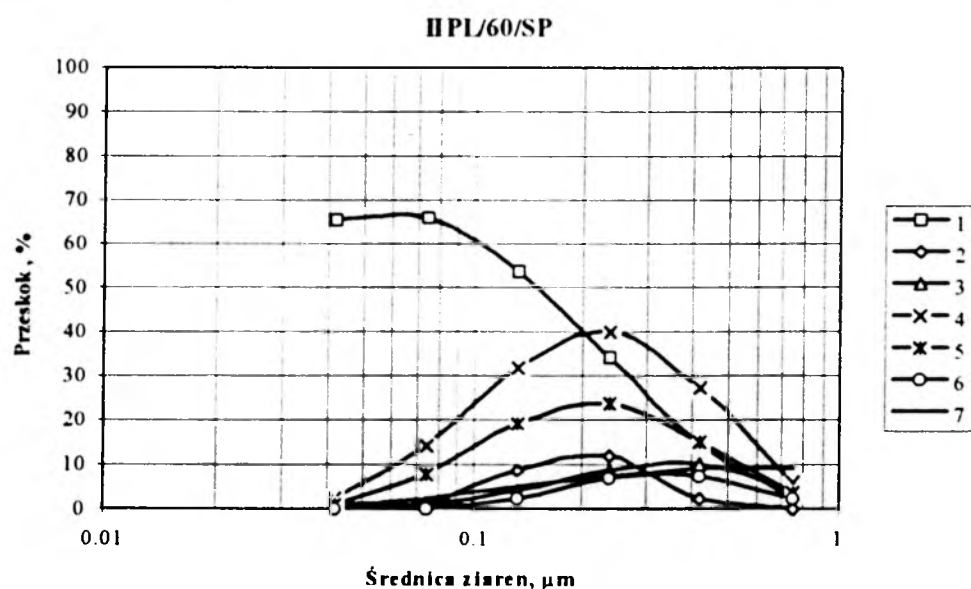


Rysunek Z1.24. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

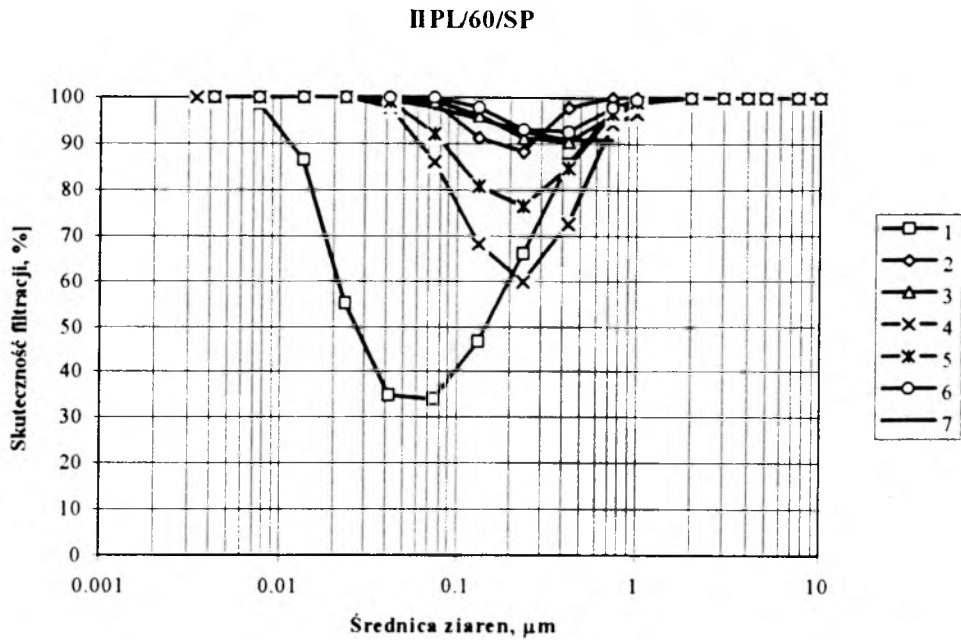
WŁÓKNINA FILTRACYJNA II PL/60/SP

Tabela Z1.9. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

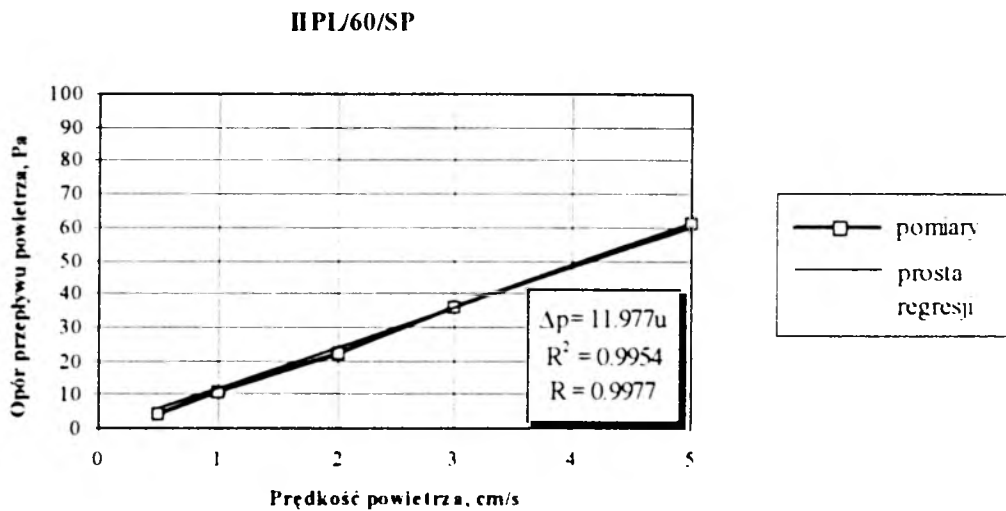
Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	9932	93	99.06363	0.93637
0.075	38643	840	97.82626	2.17374
0.133	20115	972	95.16779	4.83221
0.237	7624	553	92.74659	7.25341
0.422	2578	232	91.00078	8.99922
0.75	597	54	90.95477	9.04523



Rysunek Z1.25. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach 0.0422÷0.75 μm



Rysunek Z1.26. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

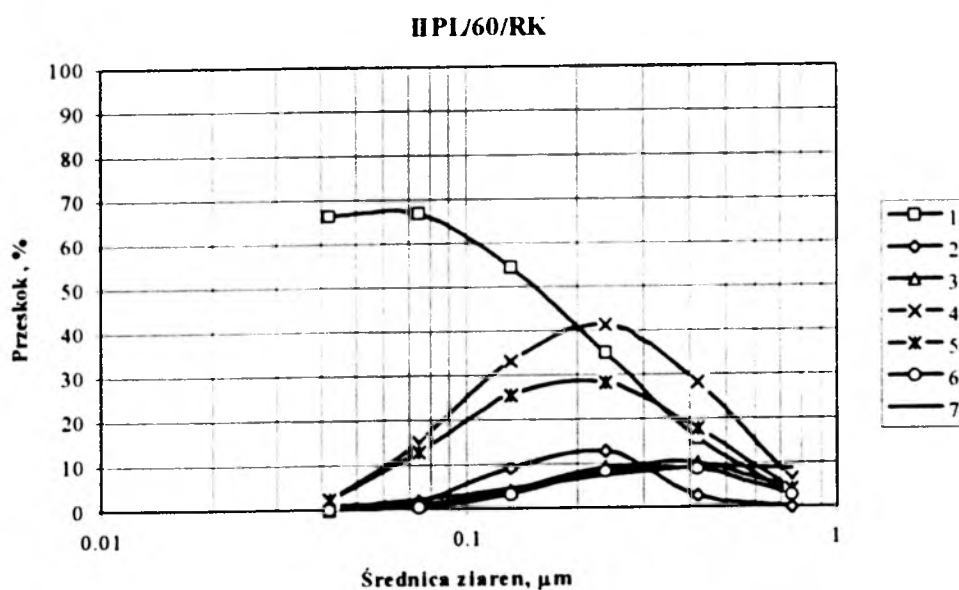


Rysunek Z1.27. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA II PL/60/RK

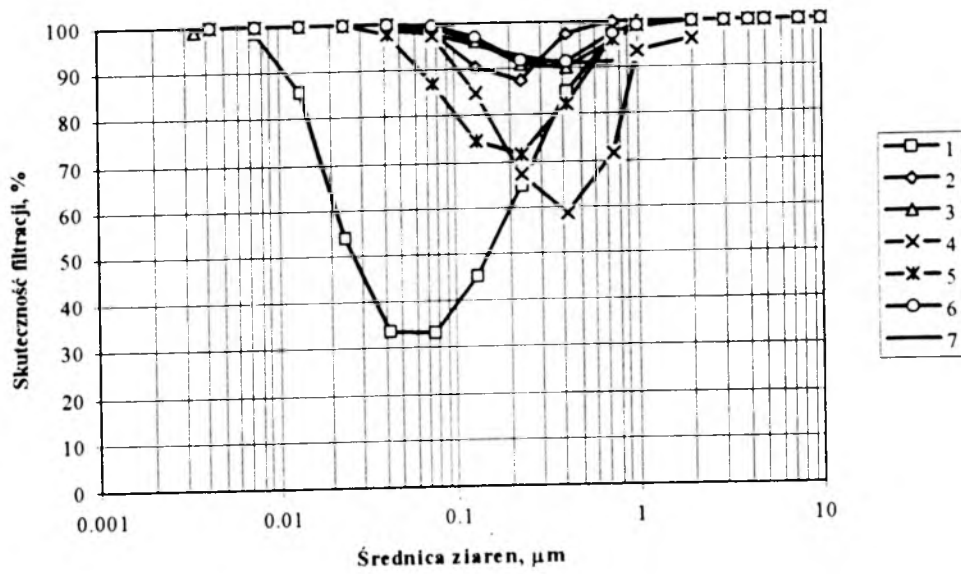
Tabela Z1.10. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	12265	135	98.89931	1.10069
0.075	32743	710	97.83160	2.16840
0.133	16956	807	95.24062	4.75938
0.237	6736	480	92.87411	7.12589
0.422	2439	221	90.93891	9.06109
0.75	654	55	91.59021	8.40979



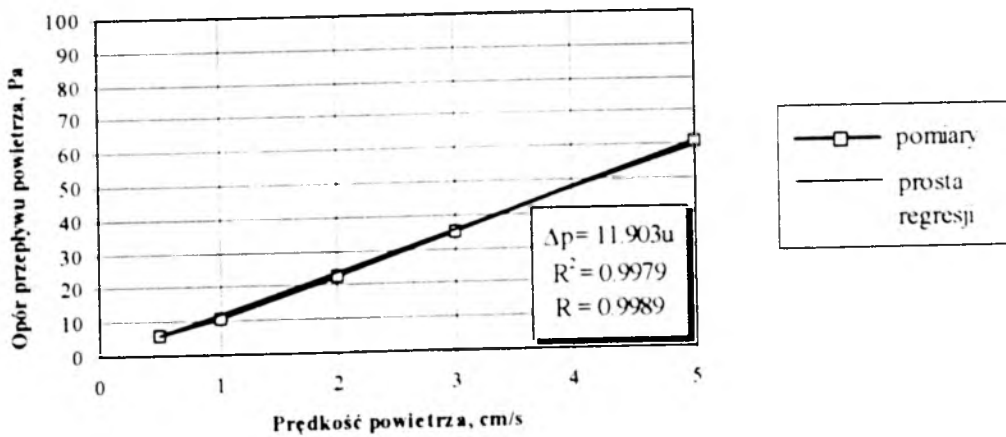
Rysunek Z1.28. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$

IIPI/60/RK



Rysunek Z1.29. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

IIPI/60/RK

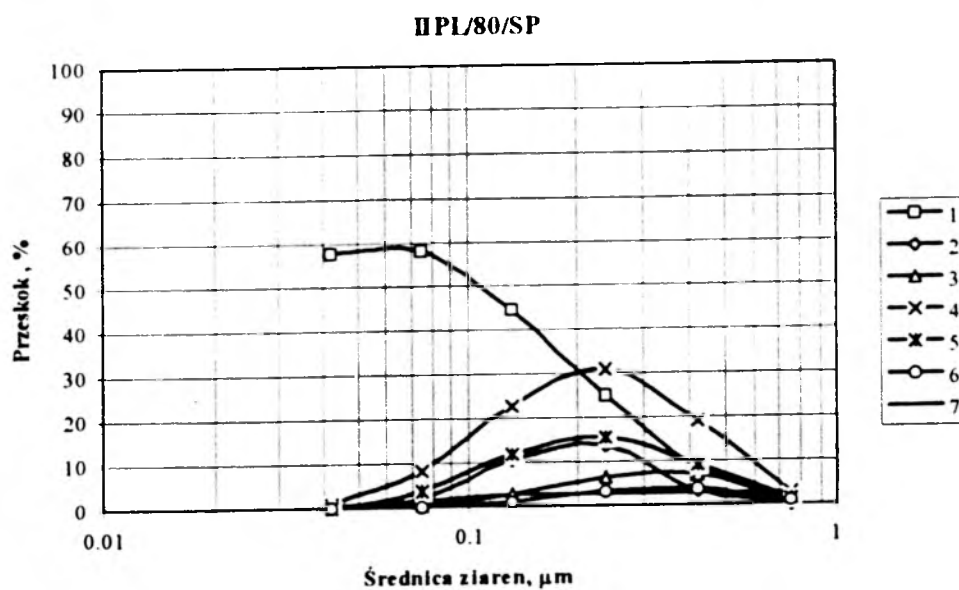


Rysunek Z1.30. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

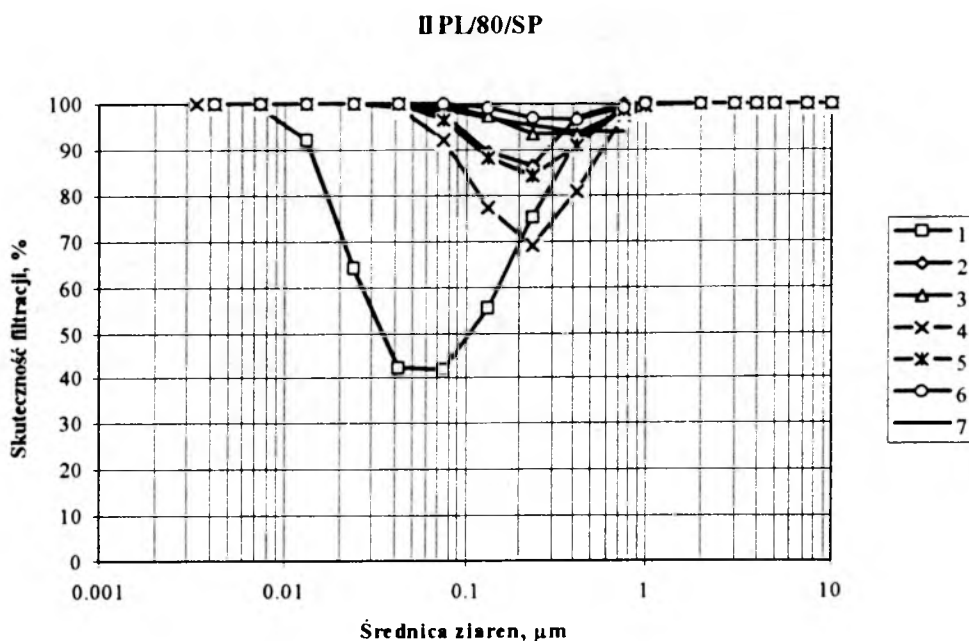
WLÓKNINA FILTRACYJNA II PL/80/SP

Tabela Z1.11. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

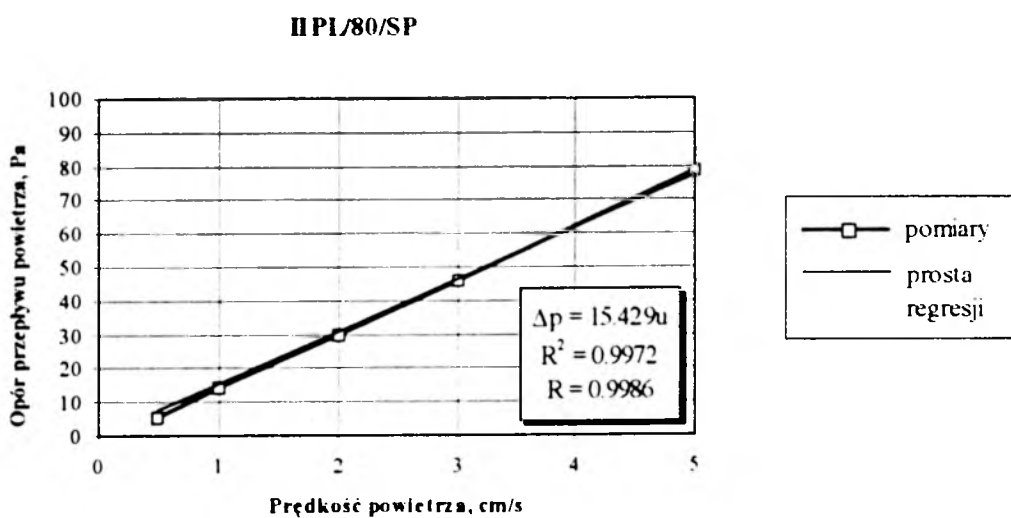
Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	16070	107	99.33416	0.66584
0.075	41172	516	98.74672	1.25328
0.133	20724	631	96.95522	3.04478
0.237	8007	368	95.40402	4.59598
0.422	2636	158	94.00607	5.99393
0.75	604	37	93.87417	6.12583



Rysunek Z1.31. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach 0.0422÷0.75 μm



Rysunek Z1.32. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

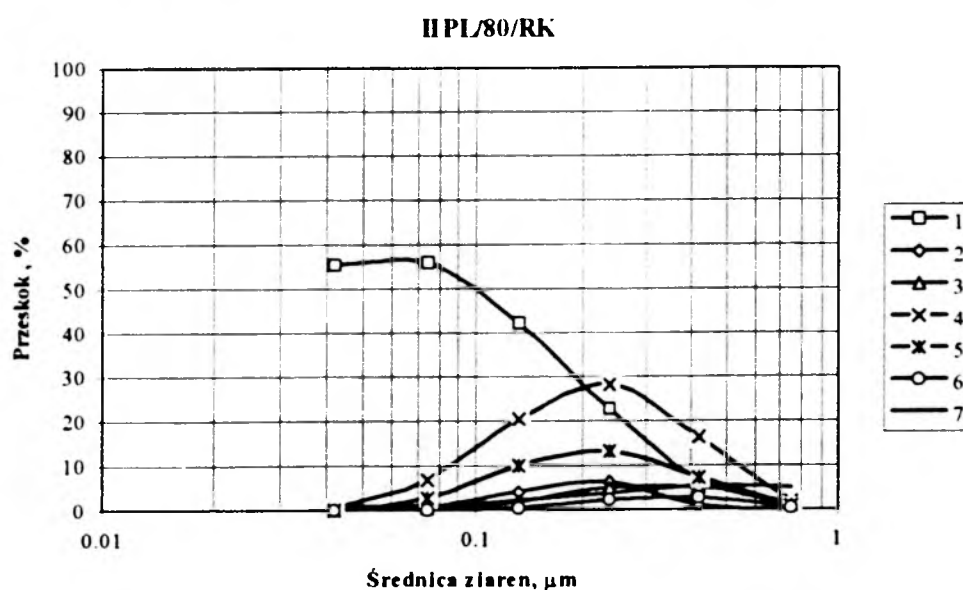


Rysunek Z1.33. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA II PL/80/RK

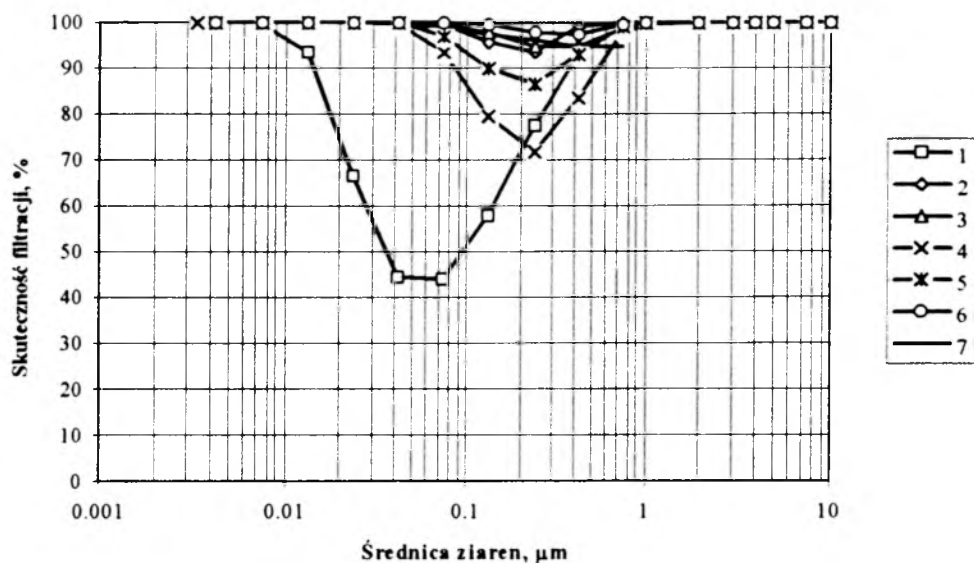
Tabela Z1.12. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	9663	74	99.23419	0.76581
0.075	27747	271	99.02332	0.97668
0.133	16088	385	97.60691	2.39309
0.237	6489	247	96.19356	3.80644
0.422	2468	134	94.57050	5.42950
0.75	632	33	94.77848	5.22152



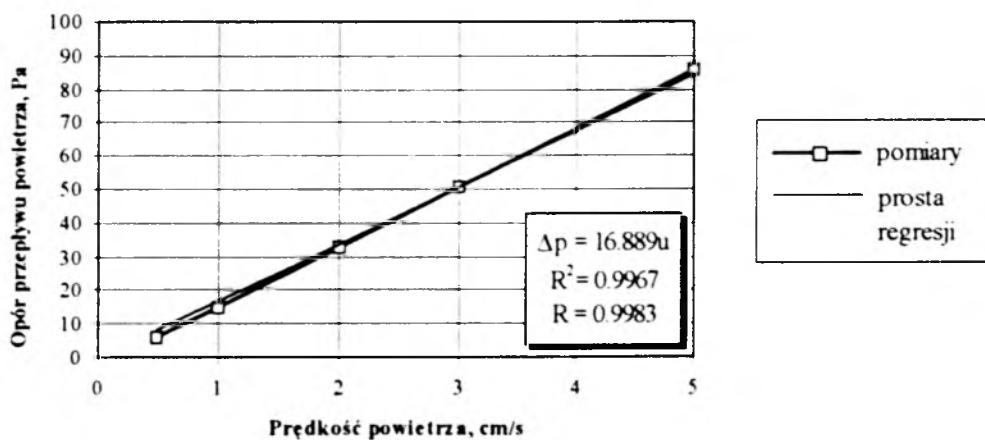
Rysunek Z1.34. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach 0.0422÷0.75 μm

II PL/80/RK



Rysunek Z1.35. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

II PL/80/RK

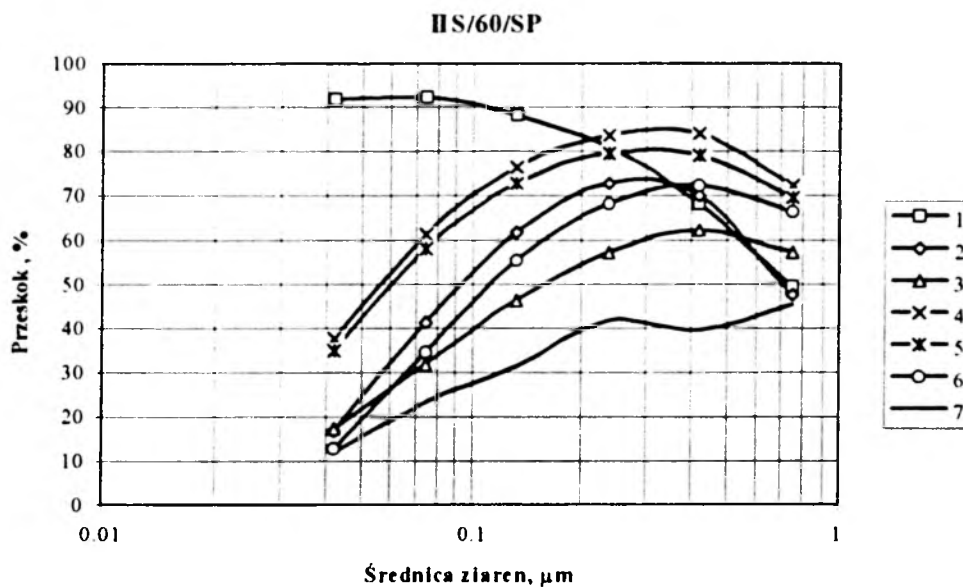


Rysunek Z1.36. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA II S/60/SP

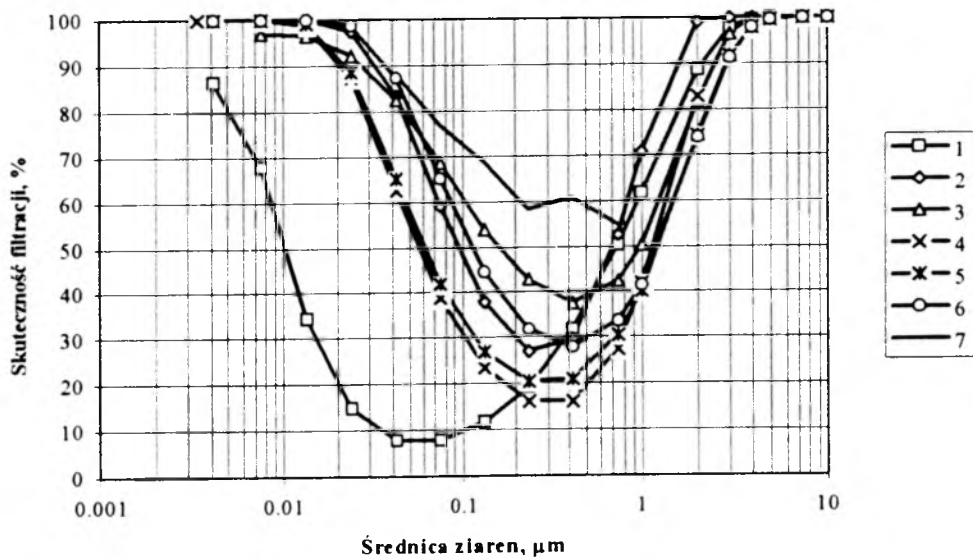
Tabela Z1.13. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	20128	2341	88.37003	11.62997
0.075	38942	8965	76.97957	23.02043
0.133	20638	6456	68.72085	31.27915
0.237	9314	3895	58.18738	41.81262
0.422	2504	987	60.57245	39.42755
0.75	652	295	54.76226	45.23774



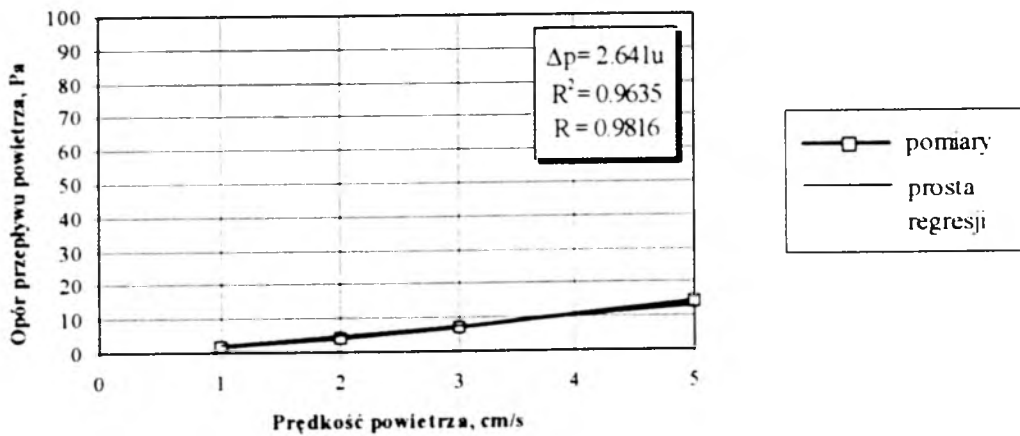
Rysunek Z1.37. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$

II S/60/SP



Rysunek Z1.38. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach 0.0042÷10 μm

II S/60/SP

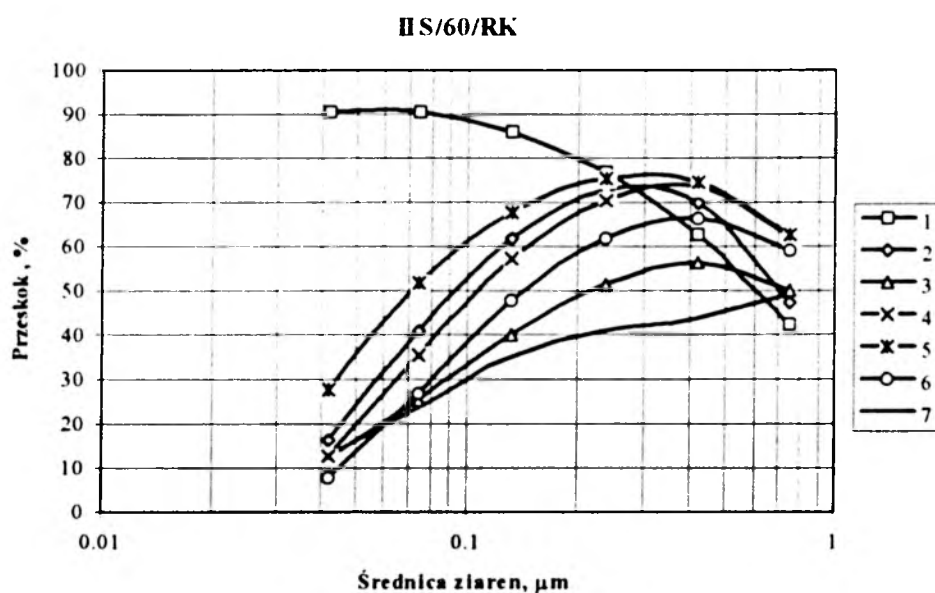


Rysunek Z1.39. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA II S/60/RK

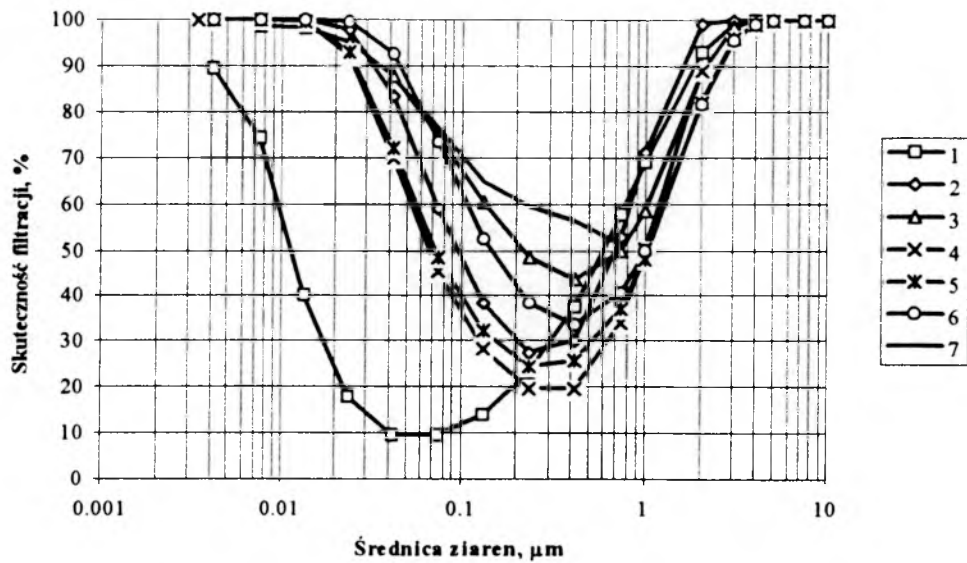
Tabela Z1.14. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku [%]
0.0422	12007	1543	87.14916	12.85084
0.075	38880	9170	76.41461	23.58539
0.133	19568	6891	64.78434	35.21566
0.237	9393	3822	59.31016	40.68984
0.422	2731	1189	56.46283	43.53717
0.75	640	313	51.09375	48.90625



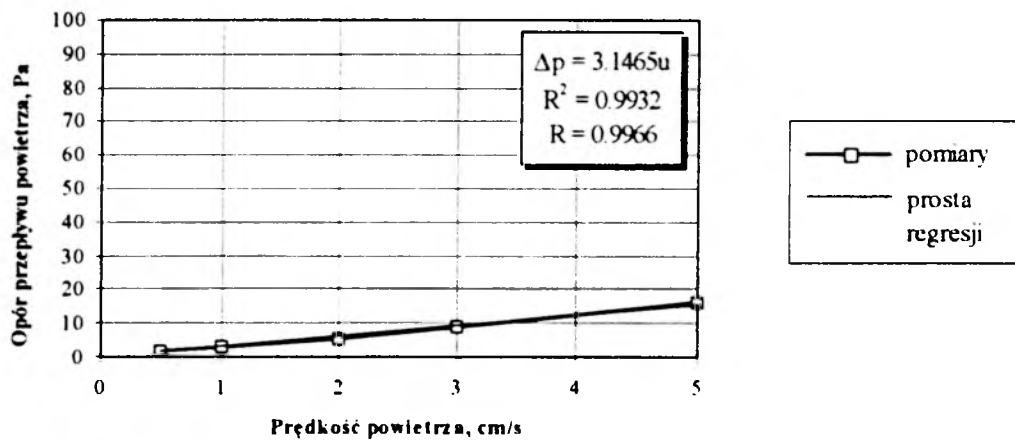
Rysunek Z1.40. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach 0.0422÷0.75 μm

II S/60/RK



Rysunek Z1.41. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach 0.0042÷10 μm

II S/60/RK

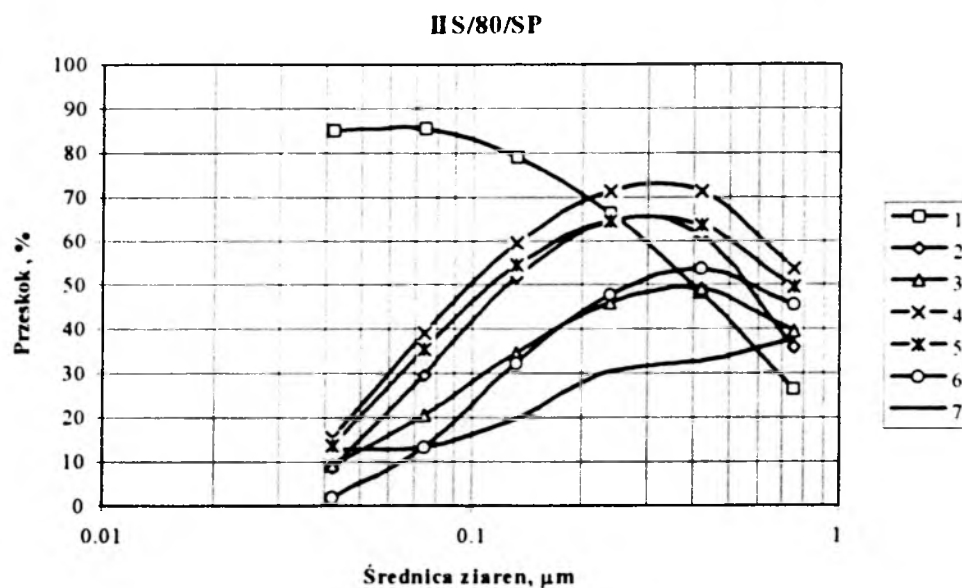


Rysunek Z1.42. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA II S/80/SP

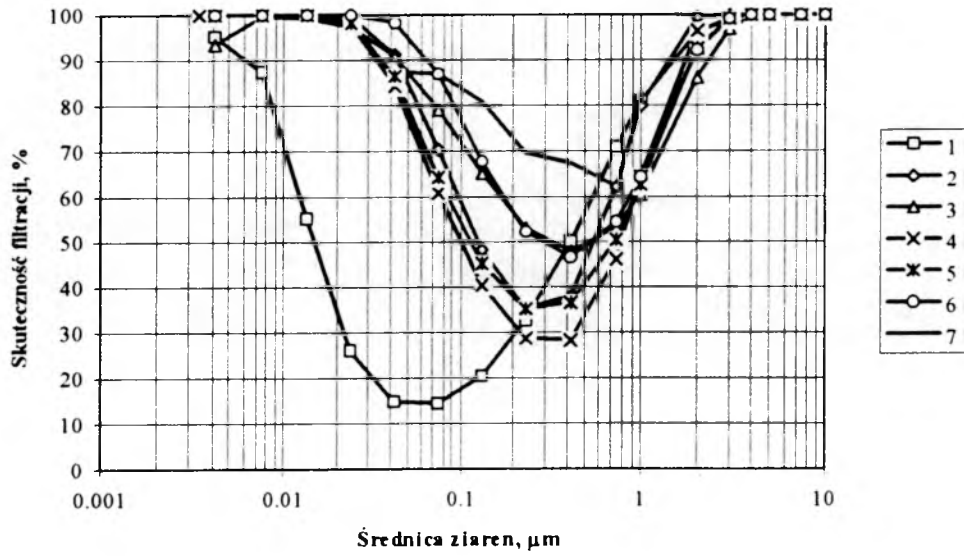
Tabela Z1.15. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	23805	3047	87.20017	12.79983
0.075	38425	5019	86.93819	13.06181
0.133	22336	4320	80.65903	19.34097
0.237	7829	2370	69.72794	30.27206
0.422	2289	747	67.36566	32.63434
0.75	752	283	62.36702	37.63298



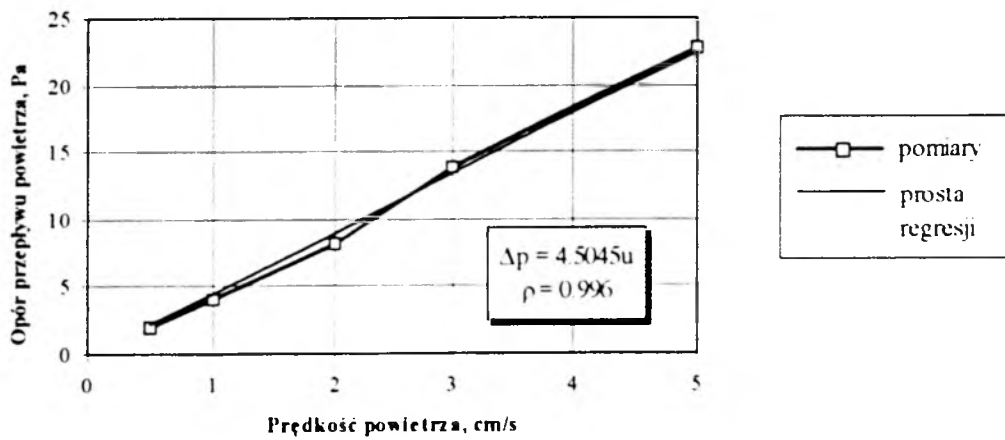
Rysunek Z1.43. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$

HS/80/SP



Rysunek Z1.44. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

HS/80/SP

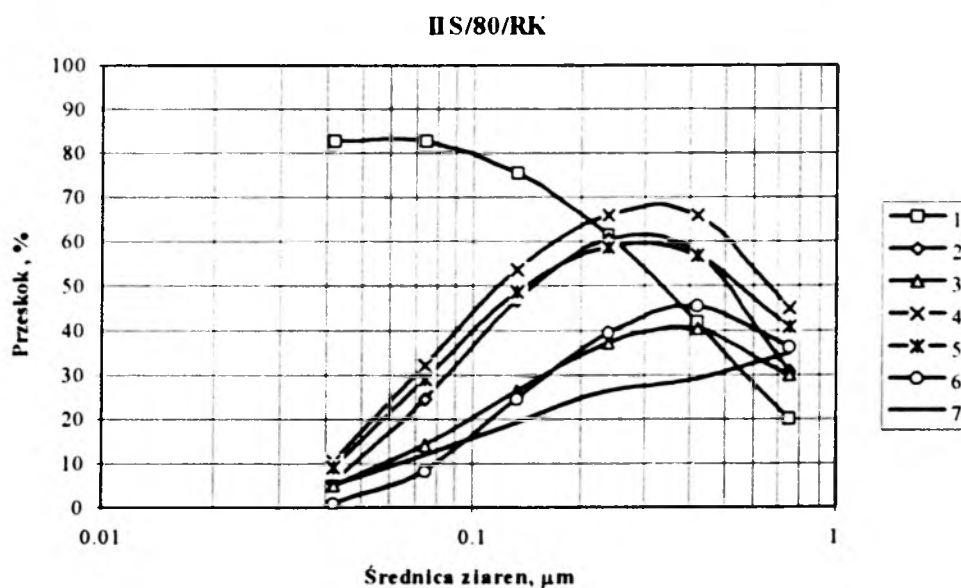


Rysunek Z1.45. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA II S/80/RK

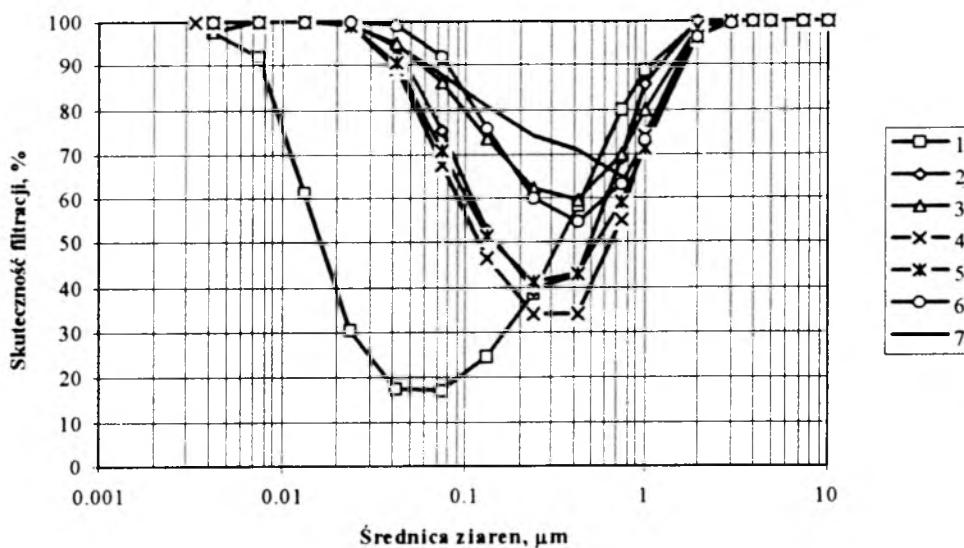
Tabela Z1.16. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/m ³]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/m ³]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku [%]
0.0422	22332	1166	94.77879	5.22121
0.075	38055	4532	88.09092	11.90908
0.133	21153	4069	80.76396	19.23604
0.237	8107	2125	73.78808	26.21192
0.422	2407	697	71.04279	28.95721
0.75	752	263	65.02660	34.97340



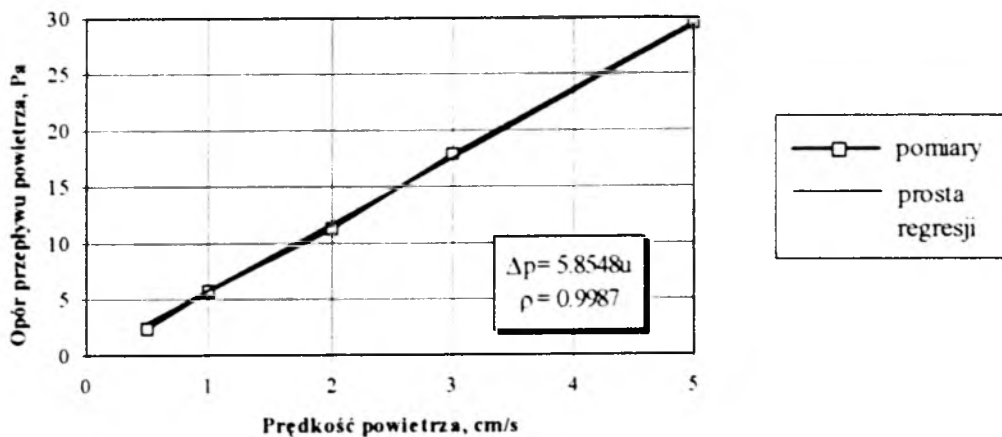
Rysunek Z1.46. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach 0.0422÷0.75 μm

II S/80/RK



Rysunek Z1.47. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

II S/80/RK

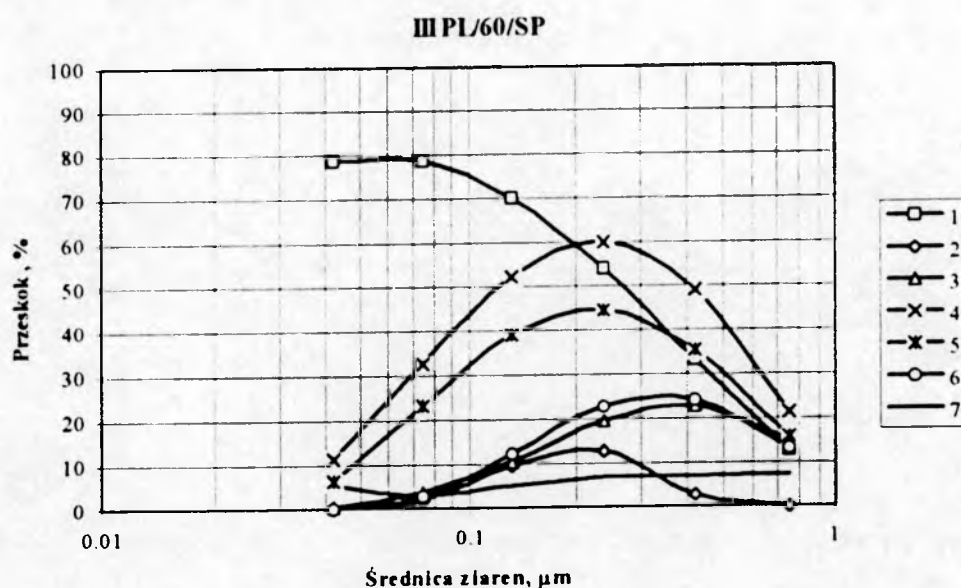


Rysunek Z1.48. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WLÓKNINA FILTRACYJNA III PL/60/SP

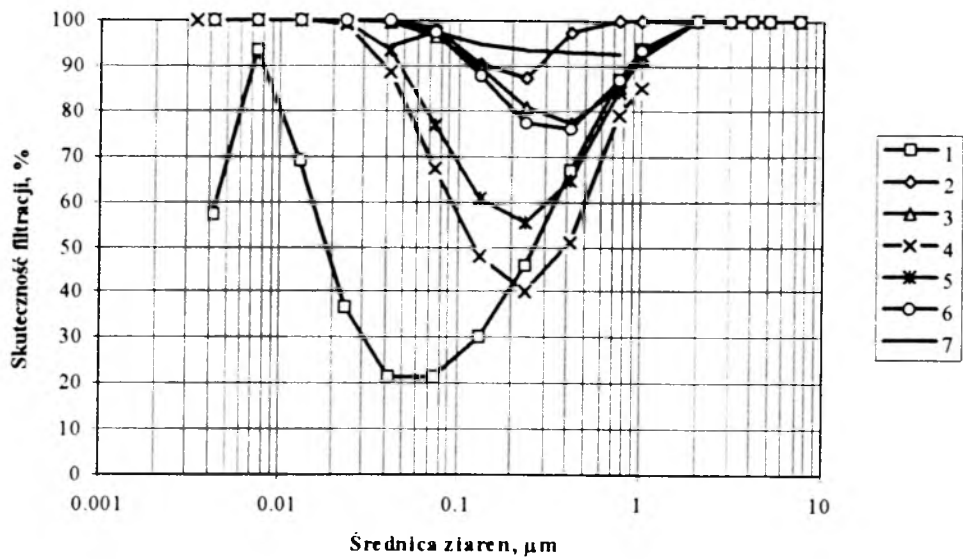
Tabela Z1.17. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	6043	337	94.42330	5.57670
0.075	26654	731	97.25745	2.74255
0.133	15269	769	94.96365	5.03635
0.237	6796	458	93.26074	6.73926
0.422	2791	195	93.01326	6.98674
0.75	859	64	92.54948	7.45052



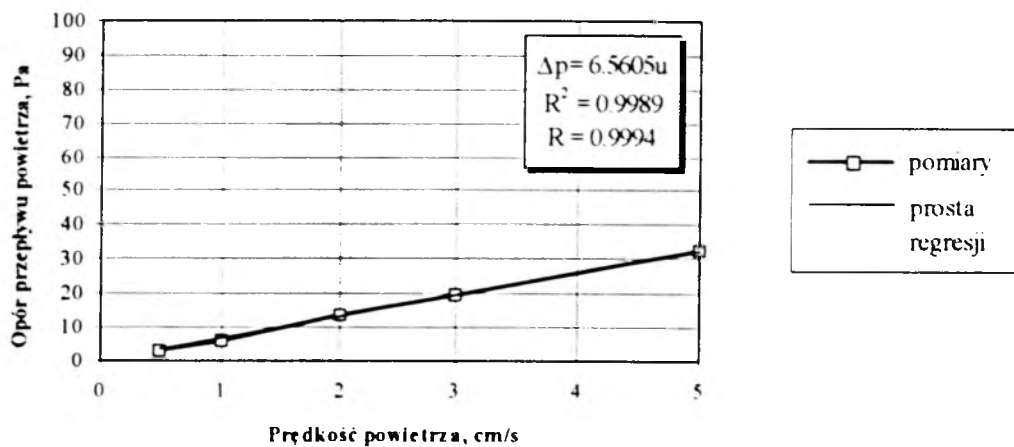
Rysunek Z1.49. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$

III PL/60/SP



Rysunek Z1.50. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach 0.0042÷10 μm

III PI/60/SP

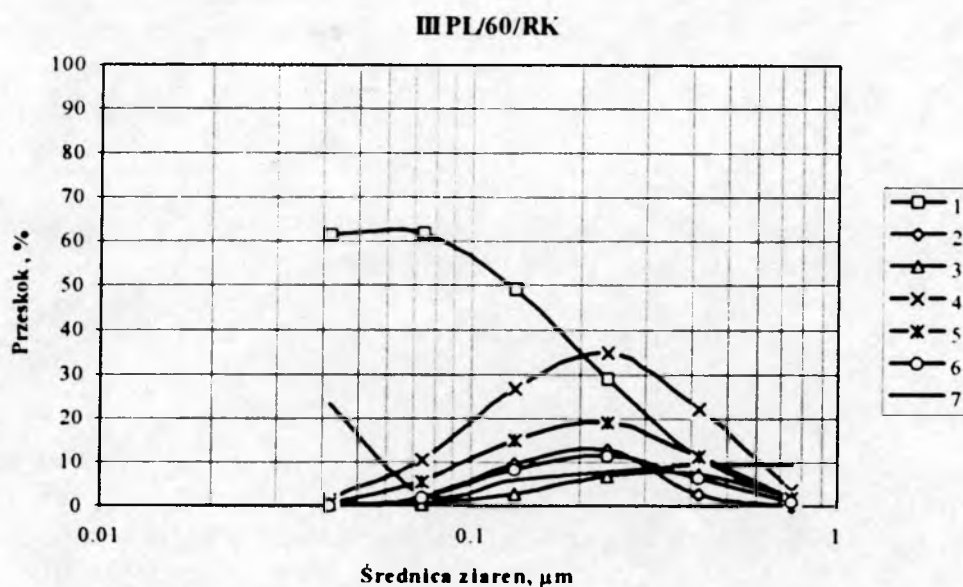


Rysunek Z1.51. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA III PL/60/RK

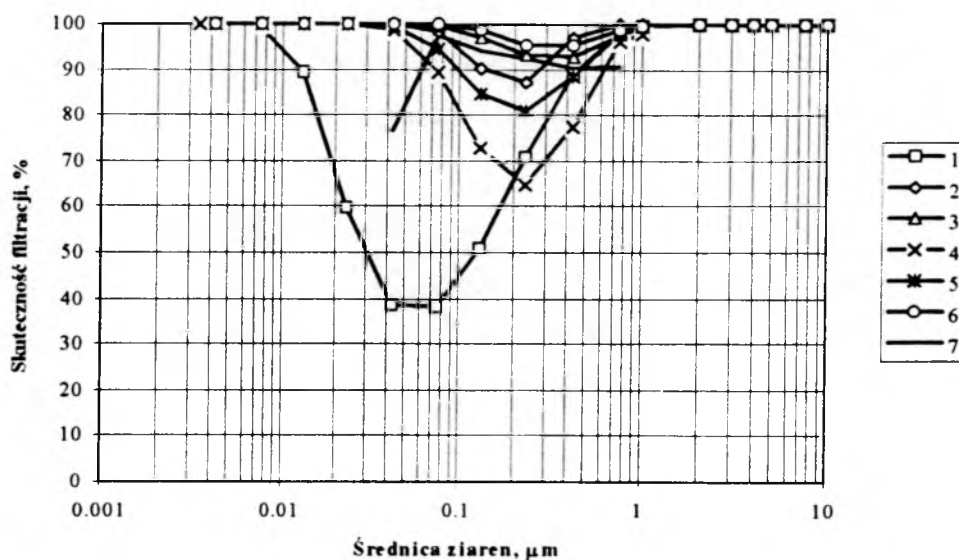
Tabela Z1.18. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku [%]
0.0422	1893	443	76.59800	23.40200
0.075	29922	756	97.47343	2.52657
0.133	17957	1047	94.16941	5.83059
0.237	7654	583	92.38307	7.61693
0.422	3088	298	90.34974	9.65026
0.75	925	87	90.59460	9.40540



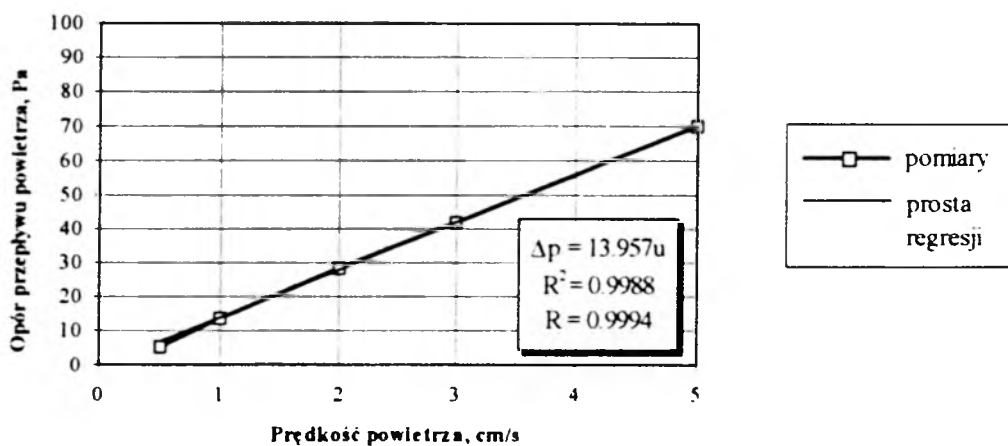
Rysunek Z1.52. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach 0.0422÷0.75 μm

III PL/60/RK



Rysunek Z1.53. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

III PL/60/RK

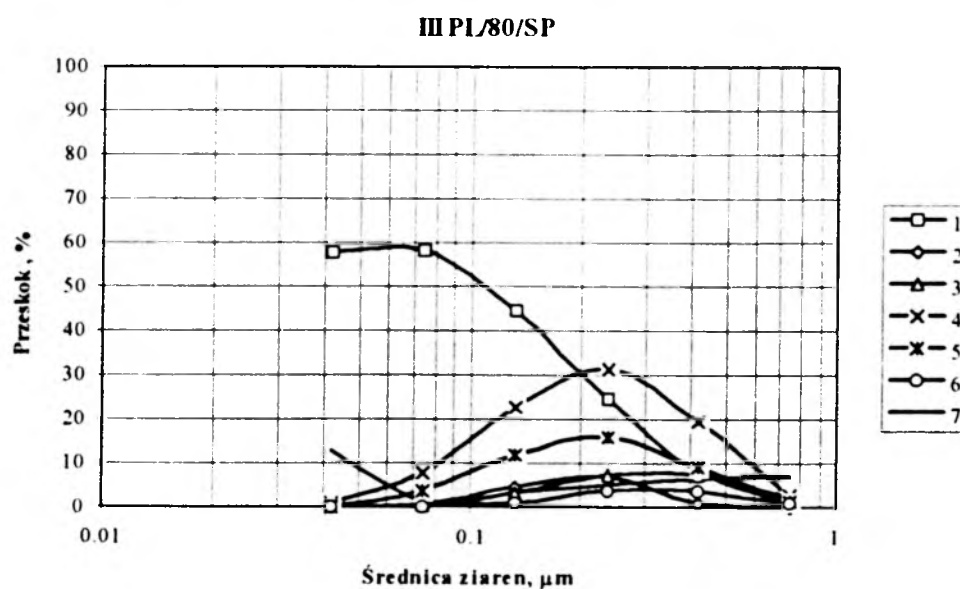


Rysunek Z1.54. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA III PL/80/SP

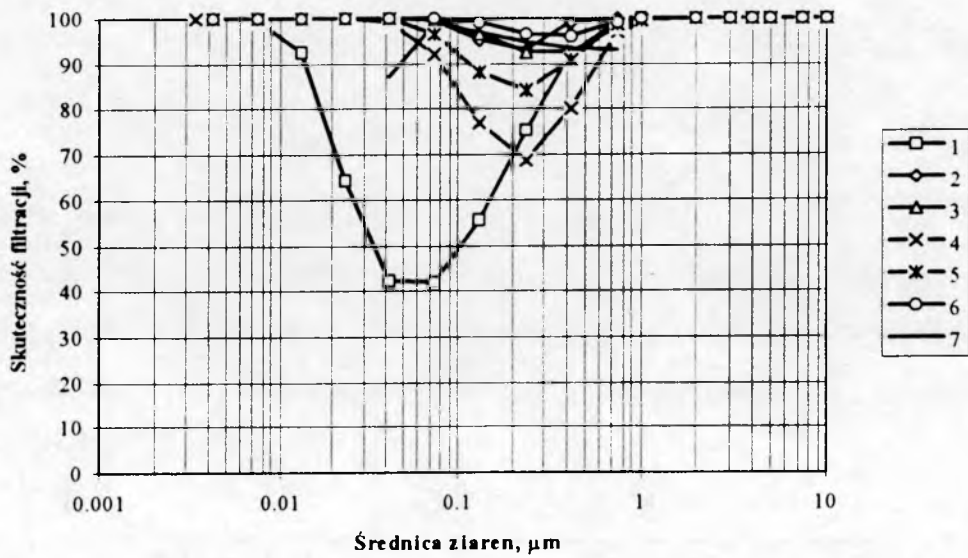
Tabela Z1.19. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	1931	244	87.36406	12.63594
0.075	27159	336	98.76284	1.23716
0.133	15477	506	96.73063	3.26937
0.237	6684	340	94.91322	5.08678
0.422	2698	175	93.51371	6.48629
0.75	808	56	93.06931	6.93069



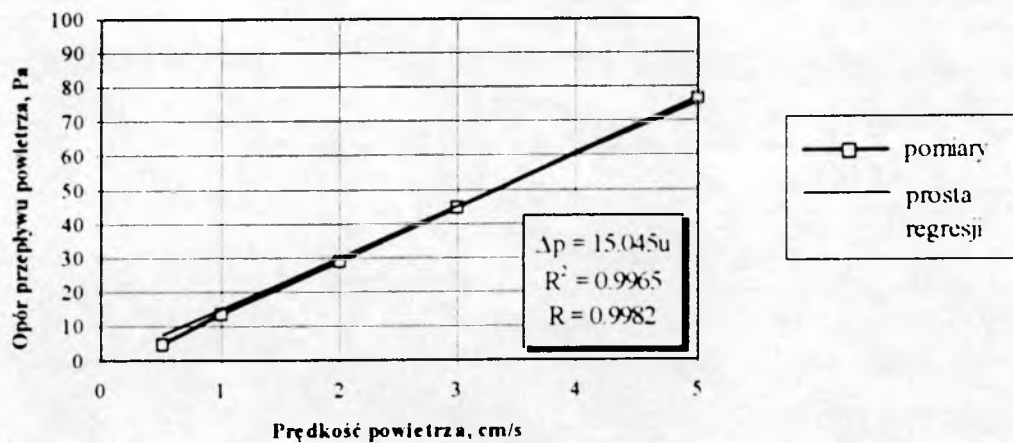
Rysunek Z1.55. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$

III PL/80/SP



Rysunek Z1.56. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach 0.0042÷10 μm

III PL/80/SP

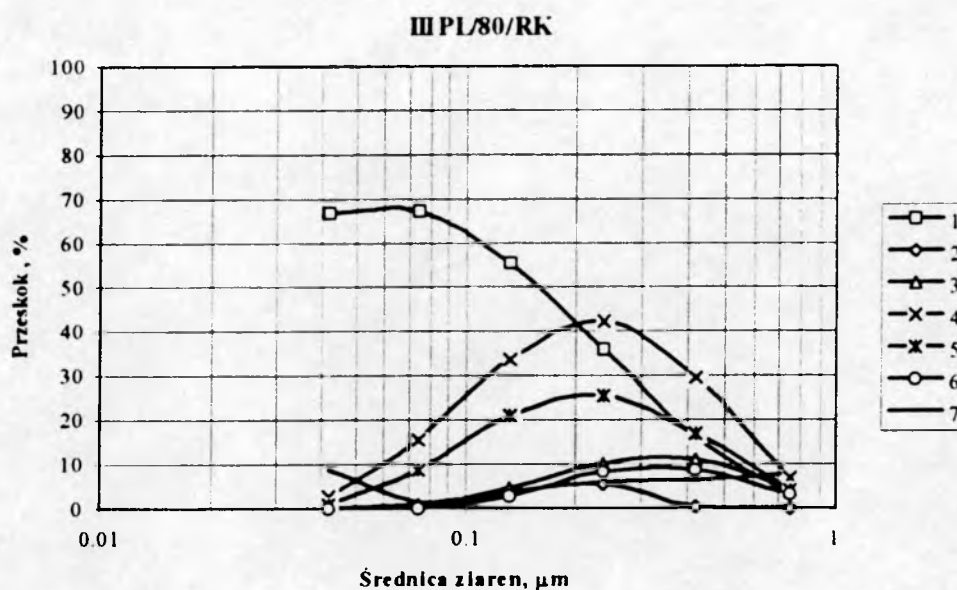


Rysunek Z1.57. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA III PL/80/RK

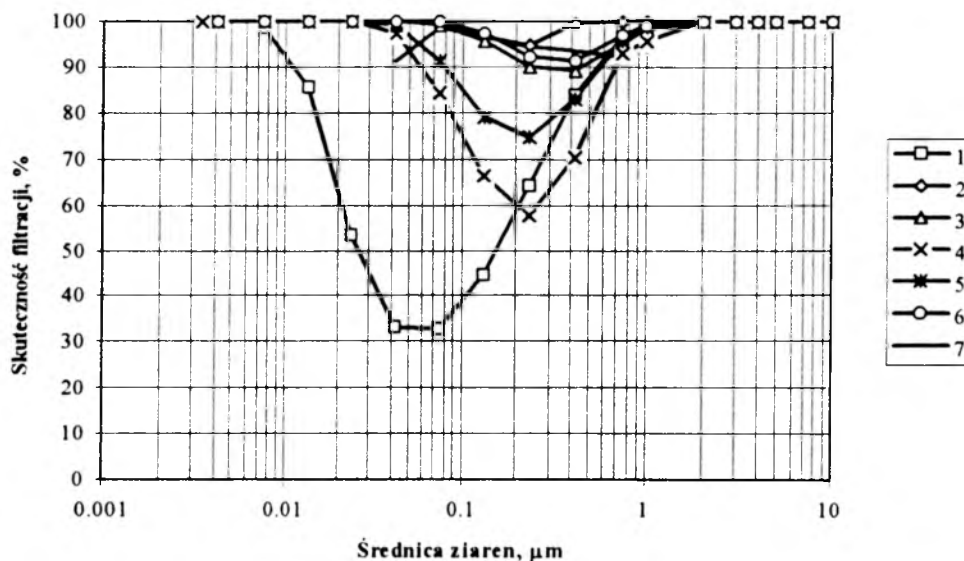
Tabela Z1.20. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku [%]
0.0422	2224	194	91.27698	8.72302
0.075	30042	426	98.58199	1.41801
0.133	17875	624	96.50909	3.49091
0.237	8923	507	94.31806	5.68194
0.422	3006	197	93.44644	6.55356
0.75	823	63	92.34508	7.65492



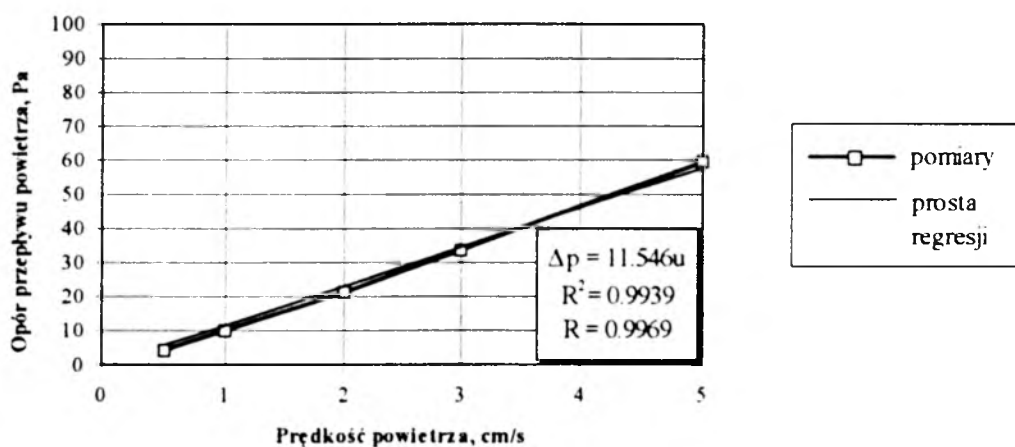
Rysunek Z1.58. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$

III PL/80/RK



Rysunek Z1.59. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

III PL/80/RK

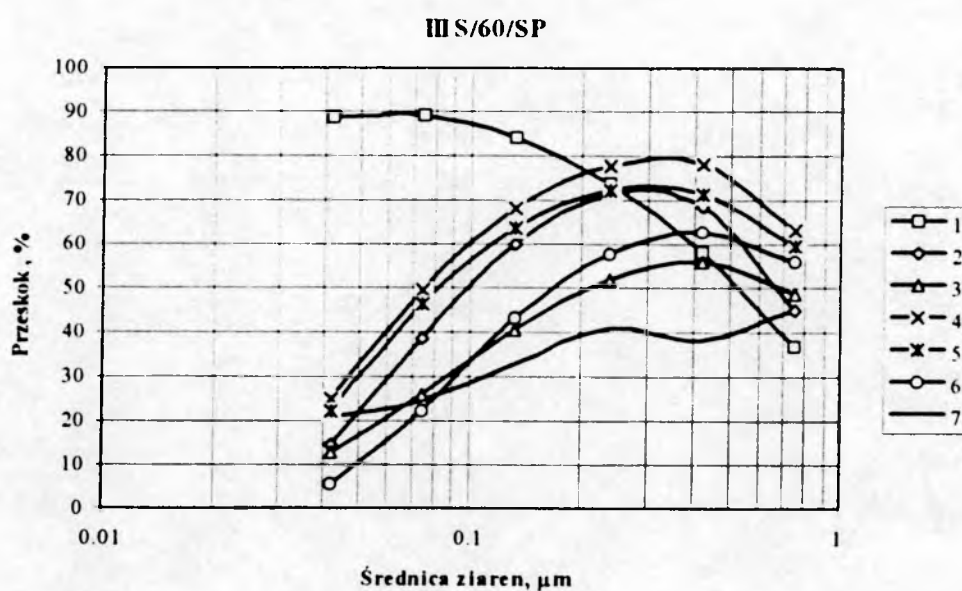


Rysunek Z1.60. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA III S/60/SP

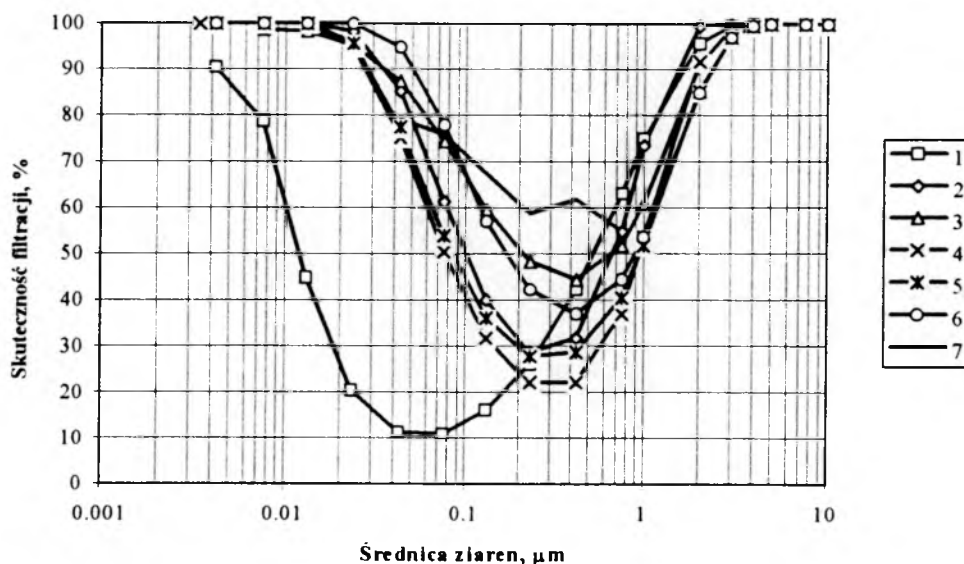
Tabela Z1.21. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	14909	3112	79.12670	20.87330
0.075	31018	7580	75.56258	24.43742
0.133	17426	5693	67.33043	32.66957
0.237	7920	3255	58.90152	41.09848
0.422	2790	1064	61.86380	38.13620
0.75	704	317	54.97159	45.02841



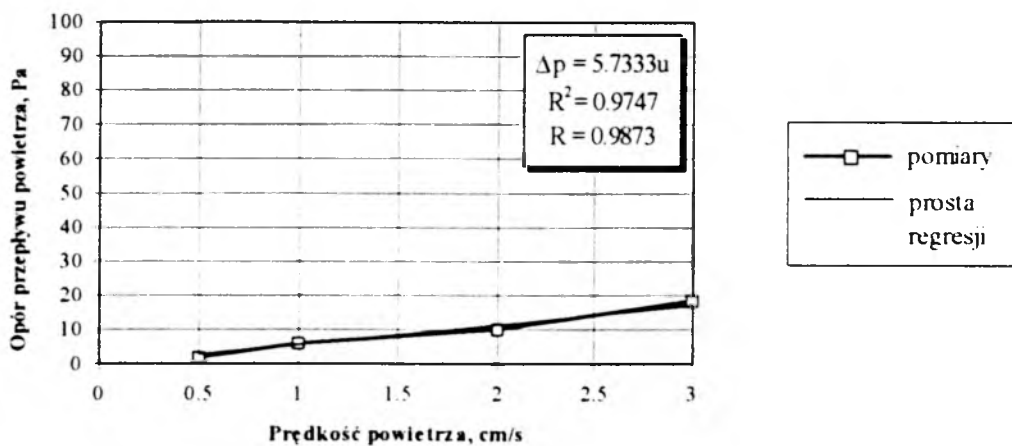
Rysunek Z1.61. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach 0.0422÷0.75 μm

III S/60/SP



Rysunek Z1.62. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

III S/60/SP

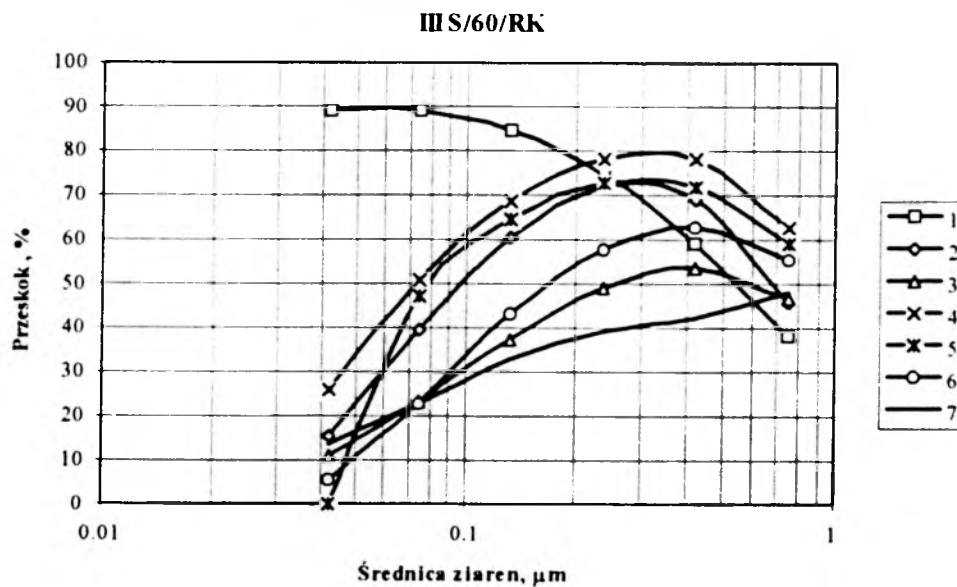


Rysunek Z1.63. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA III S/60/RK

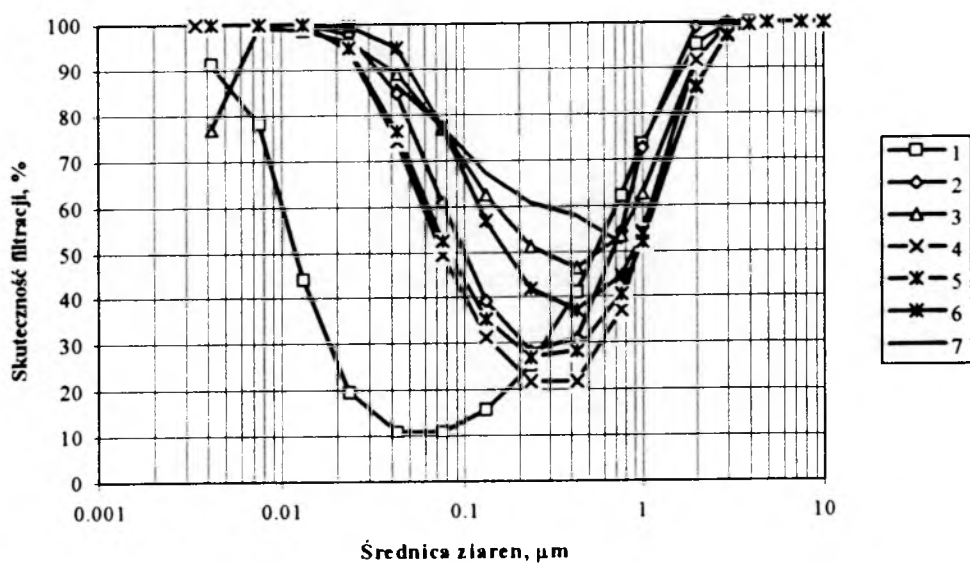
Tabela Z1.22. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	14014	1889	86.52062	13.47938
0.075	30206	6825	77.40515	22.59485
0.133	16487	5373	67.41069	32.58931
0.237	6454	2531	60.78401	39.21599
0.422	2361	999	57.68742	42.31258
0.75	571	276	51.66375	48.33625



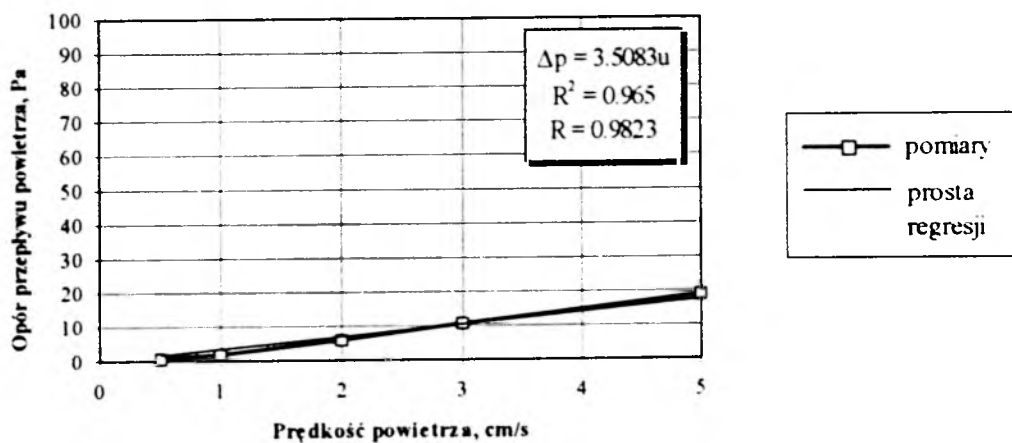
Rysunek Z1.64. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach 0.0422÷0.75 μm

III S/60/RK



Rysunek Z1.65. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

III S/60/RK

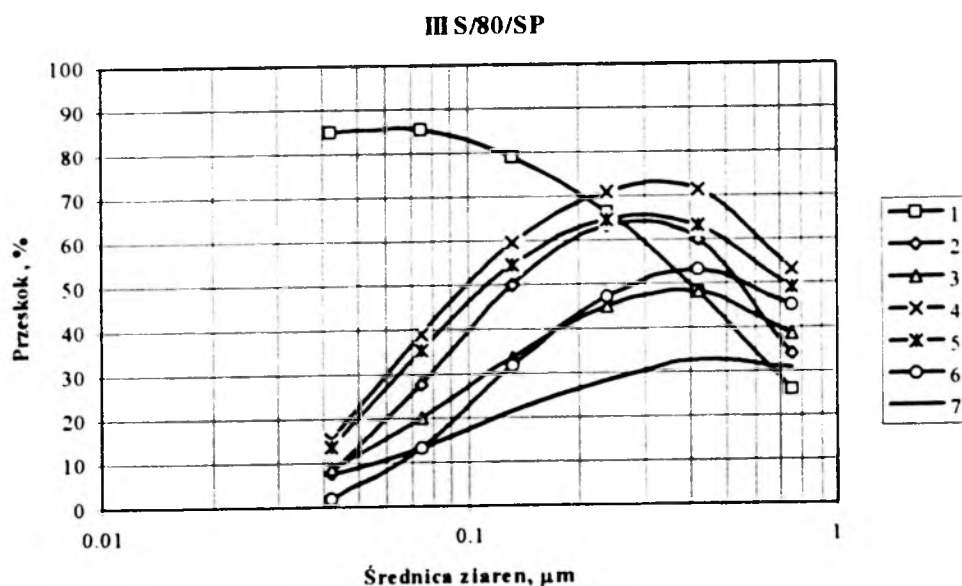


Rysunek Z1.66. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA III S/80/SP

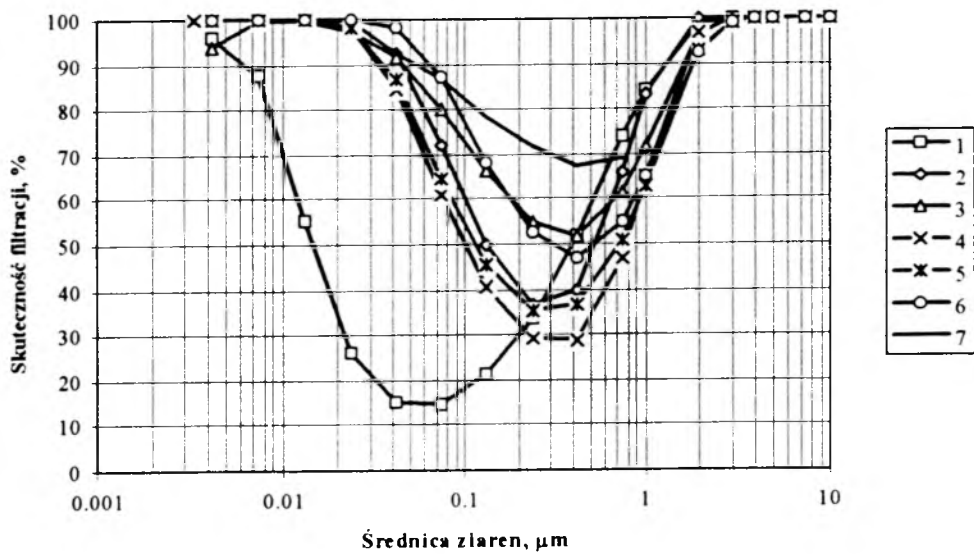
Tabela Z1.23. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku ziaren [%]
0.0422	15932	1193	92.51193	7.48807
0.075	31158	4166	86.62944	13.37056
0.133	15954	3439	78.44428	21.55572
0.237	6245	1758	71.84948	28.15052
0.422	2191	718	67.22958	32.77042
0.75	673	209	68.94502	31.05498



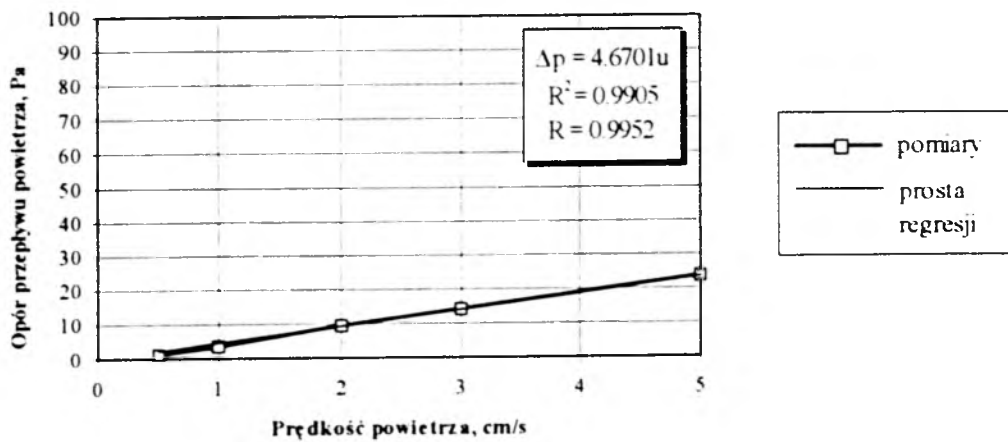
Rysunek Z1.67. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$

III S/80/SP



Rysunek Z1.68. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$

III S/80/SP

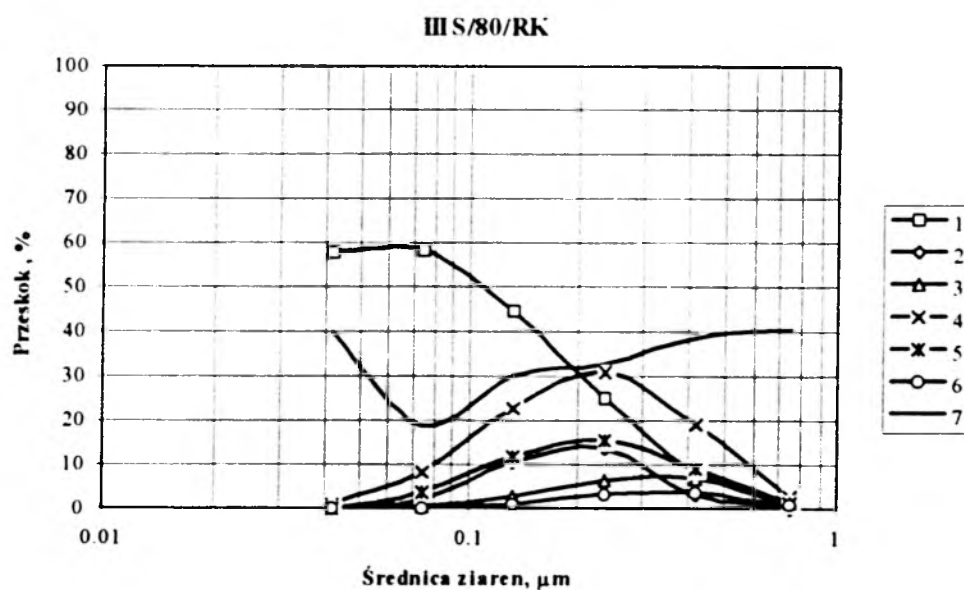


Rysunek Z1.69. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu powietrza

WŁÓKNINA FILTRACYJNA III S/80/RK

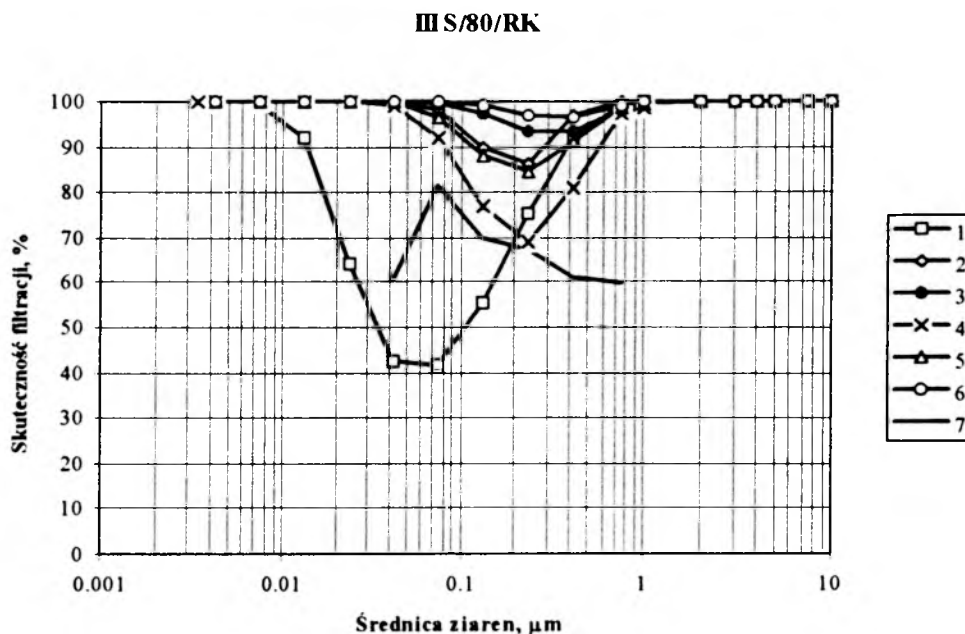
Tabela Z1.24. Rozkład frakcyjny aerozolu chlorku sodu przed i za badanym filtrem, przedziałowe współczynniki numerycznej skuteczności filtracji oraz przeskoku

Zastępcze średnice ziaren [μm]	Numeryczne stężenie ziaren przed filtrem [ziarna/ m^3]	Numeryczne stężenie ziaren za filtrem [ziarna/ m^3]	Przedziałowy współczynnik numerycznej skuteczności filtracji [%]	Przedziałowy współczynnik numerycznego przeskoku [%]
0.0422	15932	1193	92.51193	7.48807
0.075	31158	4166	86.62944	13.37056
0.133	15954	3439	78.44428	21.55572
0.237	6245	1758	71.84948	28.15052
0.422	2191	718	67.22958	32.77042
0.75	673	209	68.94502	31.05498

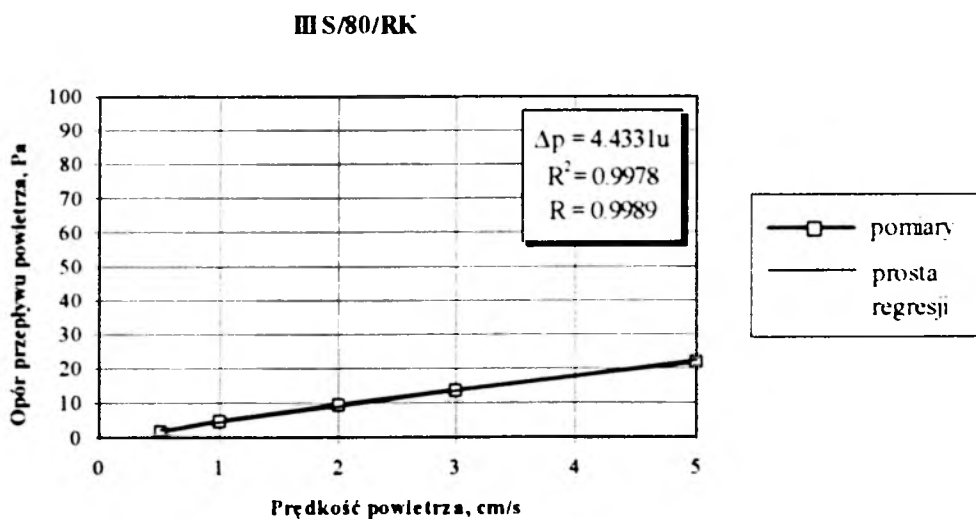


Rysunek Z1.70. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoku frakcyjnego dla ziaren o średnicach 0.0422÷0.75 μm

Rysunek Z1.71. Teoretyczna i rzeczywista numeryczna skuteczność filtracji dla
ziaren o średnicach $0.0042 \div 10 \mu\text{m}$



Rysunek Z1.70. Wartości rzeczywistego i teoretycznego przeskoaku frakcyjnego dla
ziaren o średnicach $0.0422 \div 0.75 \mu\text{m}$



Rysunek Z1.72. Opory przepływu przez włókninę w funkcji prędkości napływu
powietrza

ZAŁĄCZNIK 2

Podstawy teoretyczne modelu regresji wielowymiarowej oraz wyniki analizy statystycznej

Podstawy teoretyczne modelu regresji wielowymiarowej

Pojęcia *regresja i korelacja wieloraka (wielokrotna)* stosowane są podczas badania więcej niż dwóch cech mierzalnych w populacji. Wartości przyjmowane przez podstawową zmienną (zwaną *zmienną zależną* lub *objaśnianą*) wyjaśniane są za pomocą jej związku z wieloma innymi zmiennymi (nazywanymi *niezależnymi* lub *objaśniającymi*). Pobrana z populacji próba jest realizacją wielowymiarowej zmiennej losowej, czyli wektora losowego. Funkcja, która wartościom wielu badanych zmiennych (niezależnych) podporządkowuje średnie wartości zmiennej zależnej nazywana jest *funkcją regresji wielorakiej (wieloparametrowej, wielowymiarowej)* [26].

Omówiony poniżej model wyjaśnia pewną szczególną odmianę klasycznego modelu regresji wielorakiej zwaną *zmodyfikowanym zagadnieniem regresji*. Różnica w stosunku do klasycznego modelu polega na tym, że jedynie zmienna zależna jest zmienną losową, podczas gdy zmienne niezależne nie są traktowane jako zmienne losowe, lecz ich wartości są z góry znane. Zachodzi wtedy konieczność wprowadzenia do modelu tzw. składnika losowego. Zakładając, że składnik losowy ma wartość oczekiwaną równą zeru, otrzymuje się funkcję przyporządkowującą wartościom zmiennych niezależnych wartości oczekiwane zmiennej zależnej. Funkcja taka jest identyczna z funkcją regresji pierwszego rodzaju, którą w klasycznym modelu regresji wielorakiej otrzymuje się jako wartość oczekiwaną warunkowego rozkładu zmiennej zależnej, gdy zmienne niezależne (losowe) przyjmują ustalone wartości. Przyjęcie założenia, że składniki losowe mają rozkład normalny, pozwala na wnioskowanie statystyczne, tj. budowę przedziałów ufności i stosowanie testów statystycznych w oparciu o rozkład t Studenta.

Poniżej omówiono podstawowe pojęcia i zagadnienia występujące w modelu regresji [6], [26], [34], [76], [79].

1. Podstawowe pojęcia:

Omawiany model regresji wielorakiej ma postać:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (Z2.1)$$

gdzie:

X oznacza $(n \times (k+1))$ - wymiarową macierz obserwacji dokonanych w n -elementowej próbie na $(k+1)$ zmiennych niezależnych $X_1, X_2, \dots, X_k, X_{k+1}$, przy czym $X_{k+1} \equiv 1$ (jest to zmienna występująca przy wyrazie wolnym):

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,k} & x_{1,k+1} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,k} & x_{2,k+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \dots & x_{n,k} & x_{n,k+1} \end{bmatrix} \quad (Z2.2)$$

y oznacza n-wymiarowy wektor kolumnowy obserwacji dokonanych w n-elementowej próbie na zmiennej zależnej Y:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (Z2.3)$$

β oznacza (k+1)-wymiarowy wektor kolumnowy parametrów zwanych współczynnikami regresji wielorakiej:

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \\ \beta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (Z2.4)$$

Elementy wektora β_j dla $j=1, 2, \dots, k$, w przypadku stosowania jednakowych jednostek opisujących zmienne niezależne, informują, o ile zmieni się wartość badanej zmiennej zależnej, jeżeli j-ta zmienna niezależna wzrośnie o jednostkę, a pozostałe zmienne objaśniające pozostaną na niezmiennym poziomie. Jeśli zmienne niezależne zostały przedstawione przy pomocy różnych jednostek do oceny zmienności wartości zmiennej zależnej stosuje się standaryzowany współczynnik regresji. Natomiast β_{k+1} jest parametrem stałym równania.

ε oznacza n-wymiarowy wektor kolumnowy losowy, którego składowymi są tzw. składniki losowe zwane też zakłóceniami losowymi lub zmiennymi nieobserwowalnymi. ε_i przedstawia w przypadku i-tej obserwacji łączny efekt oddziaływania na zmienną zależną tych wszystkich czynników, które nie zostały uwzględnione jako zmienne niezależne:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (Z2.5)$$

W modelu każda z n łącznych obserwacji w próbie składa się z danego zbioru wartości zmiennych niezależnych X_1, X_2, \dots, X_{k-1} oraz z wartości zmiennej zależnej Y, która jest liniową funkcją wartości zmiennych niezależnych i wartości składnika losowego.

2. Założenia modelu regresji:

Poniziej podano trzy podstawowe założenia modelu regresji wieloparametrowej:

I. $y = \mathbf{X}\beta + \varepsilon$,

macierz \mathbf{X} oraz wektory y , β i ε zostały zdefiniowane wcześniej,

II. wektor losowy ε jest sferycznym wektorem normalnym, tj. ma n -wymiarowy rozkład normalny $N(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I})$ o funkcji gęstości określonej wzorem:

$$f(\varepsilon) = \left(\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \right)^n \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \varepsilon^T \varepsilon \right) \quad (Z2.6)$$

i parametrach:

$$\mathbf{E}(\varepsilon) = \mathbf{0}, \quad (Z2.7)$$

$$\mathbf{V}(\varepsilon \varepsilon^T) = \sigma^2 \mathbf{I} \quad (Z2.8)$$

gdzie:

$\mathbf{E}(\dots)$ wartość oczekiwana

\mathbf{I} macierz jednostkowa stopnia n

k ilość szacowanych parametrów w danym równaniu

n ilość obserwacji

$\mathbf{V}(\dots)$ kowariancja

ε wektor losowy

σ odchylenie standardowe

σ^2 wariancja

III. macierz \mathbf{X} obserwacji na zmiennych niezależnych jest macierzą o ustalonych elementach i ma rząd $r(\mathbf{X}) = k+1 \leq n$.

Założenie 1 mówi o liniowości związku pomiędzy obserwacjami w próbie na zmiennych objaśniających i na zmiennej zależnej z dokładnością do składnika losowego, czyli dla każdego t ($t=1, 2, \dots, n$) zachodzi równość:

$$y_t = \beta_1 x_{t,1} + \beta_2 x_{t,2} + \dots + \beta_k x_{t,k} + \beta_{k+1} x_{t,(k+1)} + \varepsilon_t \quad (Z2.9)$$

Założenie 2 mówi, że występujące w każdym z n powyższych równań zakłócenia losowe ε_t są niezależnymi zmiennymi losowymi o jednakowym rozkładzie normalnym $N(0, \sigma)$, tj. o średniej zero i jednakowej wariancji σ^2 . Ponieważ zazwyczaj nie znana jest wariancja σ^2 składnika losowego, nie znana jest także macierz wariancji i kowariancji $\mathbf{V} = \sigma^2 \mathbf{I}$ wektora losowego i należy ją oszacować z próby.

Założenie 3 mówi, że macierz \mathbf{X} obserwacji zmiennych niezależnych nie jest stochastyczna, a jej kolumny stanowią układ $(k+1)$ liniowo niezależnych wektorów, przy czym liczba jej wierszy (liczba elementów w próbie n) jest nie mniejsza od liczby kolumn (tj. od liczby parametrów β_i , których jest $k+1$).

Z założeń 1, 2, 3 wynikają równości:

$$\mathbf{E}(\varepsilon | \mathbf{X}) = \mathbf{0} \quad (Z2.10)$$

$$\mathbf{E}(y | \mathbf{Y}) = \mathbf{X}\beta \text{ (funkcja regresji)} \quad (Z2.11)$$

$$V(y | Y) = \sigma^2 I \quad (Z2.12)$$

gdzie kreski pionowe po prawej stronie tych wzorów oznaczają, że rozważane są wektory wartości oczekiwanych i macierz kowariancji w rozkładzie warunkowym (przy ustalonej macierzy X).

3. Oszacowanie parametrów modelu regresji

Na podstawie wyników próby, tj. macierzy X oraz wektora y , należy oszacować wektor β parametrów tego modelu (współczynników regresji) i ewentualnie wariancję σ^2 składnika losowego. Parametry powyższego modelu szacuje się metodą najmniejszych kwadratów, tak aby suma kwadratów zaobserwowanych odchyleń (reszt) od hiperpłaszczyzny regresji była najmniejsza. Oznacza to wyznaczenie oszacowań $\hat{\beta}$ w ten sposób, aby zminimalizować funkcję S określaną równoważnymi wzorami:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2 = \hat{\varepsilon}^T \hat{\varepsilon} \quad (Z2.13)$$

gdzie:

$$\hat{\varepsilon} = v - \hat{y} = y - X\hat{\beta} \quad (Z2.14)$$

Uzyskuje się następujące rozwiązanie:

Nieobciążonym estymatorem wektora β współczynników regresji jest wektor b , uzyskany z próby według wzoru:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (Z2.15)$$

Symetryczna macierz odwrotna $(X^T X)^{-1}$ występująca w tym wzorze istnieje na mocy założenia 3. Macierz wariancji i kowariancji estymatora b określona jest wzorem:

$$V(b) = \sigma^2 (X^T X)^{-1} \quad (Z2.16)$$

Nieobciążonym estymatorem wariancji σ^2 składnika losowego jest s^2 określone wzorem:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k - 1} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n - k - 1} = \frac{\hat{\varepsilon}^T \hat{\varepsilon}}{n - k - 1} = \frac{(y - \hat{y})^T (y - \hat{y})}{n - k - 1} = \frac{y^T y - b^T X^T y}{n - k - 1} \quad (Z2.17)$$

gdzie:

$$\hat{y} = Xb \quad (Z2.18)$$

Przedział ufności dla poszczególnego współczynnika regresji wielorakiej β_i , będącego i -tą składową wektora β , otrzymuje się ze wzoru:

$$P\{b_i - t_{\alpha} s_{b_i} < \beta_i < b_i + t_{\alpha} s_{b_i}\} = 1 - \alpha \quad (Z2.19)$$

$$s_{b_i} = s \sqrt{d_{ii}} \quad (Z2.20)$$

gdzie:

b wektor oszacowań parametrów (nieobciążony estymator wektora β)

b_i i -ta składowa estymatora b

d_{ii}	i-ty diagonalny element macierzy $(\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}$
k	ilość szacowanych parametrów w danym równaniu
n	ilość obserwacji
$P\{\dots\}$	miara probabilistyczna (prawdopodobieństwo)
s_{bi}	błąd standardowy oceny estymatora \mathbf{b}
s^2	nieobciążony estymator wariancji σ^2 składnika losowego
t_α	wartość zmiennej t Studenta dla $n-k-1$ stopni swobody i dla ustalonego z góry współczynnika ufności $1-\alpha$
\mathbf{X}	macierz obserwacji (zmiennych niezależnych)
\mathbf{y}	wektor zmiennych zależnych
$\hat{\mathbf{y}}$	wektor oszacowań wartości zmiennej zależnej
\hat{y}_i	wartość teoretyczna zmiennej zależnej
α	poziom istotności
$\hat{\beta}$	wektor oszacowań parametrów
ε	wektor składnika losowego
$\hat{\varepsilon}$	wektor oszacowań składnika losowego
$\hat{\varepsilon}_i$	wartość teoretyczna składnika losowego

4. Korelacja cząstkowa i wieloraka

Jeśli na pewną zmienną objaśnianą Y oddziałowuje więcej niż jedna zmienna objaśniająca (X), a interesuje nas ścisłość związku korelacyjnego jedynie pomiędzy dwiema zmiennymi, przy wyłączeniu wpływu innych zmiennych, to wykorzystuje się miary ścisłości związku, zwane współczynnikami korelacji cząstkowej. Oznacza się je symbolem: $r_{ij.kl\dots z}$. Pierwsze dwa subskrypty przed kropką (zwane głównymi) oznaczają cechy, między którymi poszukuje się korelacji, natomiast subskrypty po kropce (zwane następczymi) oznaczają cechy, które eliminuje się [76].

Do obliczania współczynników korelacji cząstkowej wygodnie jest posłużyć się rachunkiem macierzowym. Współczynnik korelacji cząstkowej dowolnego rzędu oblicza się z ogólnego wzoru:

$$r_{ij.kl\dots z} = \frac{-P_{ij}}{\sqrt{P_{ii}P_{jj}}} \quad (Z 2.21)$$

gdzie:

P_{ii}, P_{jj} odpowiednie dopełnienia algebraiczne macierzy \mathbf{P} powstałe przez skreślenie jej i -tego wiersza i i -tej kolumny oraz jej j -tego wiersza i j -tej kolumny

P_{ij} dopełnienie algebraiczne macierzy \mathbf{P} współczynników korelacji par wszystkich włączonych do analizy zmiennych, powstałych przez skreślenie jej i -tego wiersza i j -tej kolumny

$r_{ij.kl\dots z}$ współczynnik korelacji cząstkowej

Jak wynika z powyższego wzoru, do obliczenia współczynników korelacji cząstkowej niezbędna jest znajomość współczynników korelacji całkowitej par wszystkich rozpatrywanych zmiennych.

Współczynniki korelacji całkowitej są elementami następującej macierzy:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & r_{1,2} & r_{1,3} & \dots & r_{1,z} \\ r_{2,1} & 1 & \dots & \dots & r_{2,z} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{z,1} & r_{z,2} & r_{z,3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (Z2.22)$$

Macierz P jest macierzą symetryczną o wymiarach wskazanych przez liczbę zmiennych wprowadzonych do analizy. Zgodnie z właściwością symetryczności współczynnika korelacji całkowitej, kolejność cyfr subskryptów jest obojętna, gdyż $r_{zk}=r_{kz}$. Natomiast współczynnik $r_{ii}=1$.

Współczynniki korelacji cząstkowej mają takie same właściwości jak współczynnik korelacji liniowej Pearsona, a ocena ścisłości związku pomiędzy zmiennymi zależy również od wielkości modułu otrzymanej wartości współczynnika. Należy ponadto zwrócić uwagę, że współczynnik korelacji cząstkowej może być większy lub mniejszy od współczynnika korelacji całkowitej odpowiedniej pary cech. Może także nastąpić zmiana znaku + na - i na odwrót.

Podczas badania korelacji między wartością jednej cechy (zmienna objaśniana) a kompleksem innych cech (zmiennie objaśniające) właściwą miarą jest współczynnik korelacji wielorakiej, który oznacza się symbolem R , R_w lub $R_{1,2,3,\dots,k}$. Pierwszy subskrypt (1) oznacza zmienną objaśnianą, a pozostałe subskrypty (2, 3, ..., k) - zmiennie objaśniające, których łączny wpływ na zmienną objaśnianą poddaje się ocenie. Ogólny wzór na współczynnik korelacji wielorakiej ma wówczas następującą postać:

$$R_{1,2,3,\dots,k} = \sqrt{1 - \frac{\det D}{\det R}} \quad (Z2.23)$$

gdzie:

D macierz współczynników korelacji zmiennych objaśniających i zmiennej objaśnianej

det wyznacznik macierzy

R macierz współczynników korelacji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi

$R_{1,2,3,\dots,k}$ współczynnik korelacji wielorakiej

1 zmienna objaśniana

2, 3, ..., zmiennie objaśniające

k

Macierze D i R można ogólnie zapisać następująco:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & r_{1,2} & r_{1,3} & \dots & r_{1,k} \\ r_{2,1} & 1 & r_{2,3} & \dots & r_{2,k} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & 1 & \dots & r_{3,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{k,1} & r_{k,2} & r_{k,3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (Z2.24)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{2,3} & \dots & r_{2,k} \\ r_{3,2} & 1 & \dots & r_{3,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{k,2} & r_{k,3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (Z2.25)$$

Współczynnik korelacji wielorakiej R , mierzący stopień skorelowania zmiennej Y od wszystkich zmiennych niezależnych X_1, X_2, \dots, X_k , definiowany jest również wzorem:

$$R = \sqrt{1 - \varphi^2} \quad (Z2.26)$$

przy czym φ^2 (tzw. współczynnik zbieżności) jest określany wzorem:

$$\varphi^2 = \frac{\sigma^2}{D^2(Y)} \quad (Z2.27)$$

gdzie:

- $D^2(Y)$ wariancja zmiennej Y
- R współczynnik regresji wielorakiej
- φ^2 współczynnik zbieżności
- σ^2 wariancja składnika losowego

R przyjmuje następujące wartości:

$$0 \leq R \leq 1 \quad (Z2.28)$$

przy czym, jeżeli $R=0$, to zmienna Y nie jest skorelowana ze zmiennymi X_1, X_2, \dots, X_k , natomiast, gdy $R=1$, to zachodzi równość

$$y = X\beta \quad (Z2.29)$$

Wartość R^2 oznaczająca współczynnik determinacji zawiera się w przedziale $\langle 0, 1 \rangle$ i określa, jaka część obserwowanej w próbie zmienności zmiennej zależnej jest wyjaśniona regresją względem wszystkich zmiennych niezależnych jednocześnie. Jeśli $R^2=1$, wszystkie punkty empiryczne leżą na hiperpłaszczyźnie regresji, a więc dopasowanie jest doskonałe. Jeśli $R^2=0$, to $Y_i = \hat{Y}_i$ dla wszystkich i wówczas zmienne niezależne uwzględnione w modelu nie wnoszą żadnych informacji o wartościach zmiennej Y [34].

Estymatorem współczynnika korelacji R jest statystyka \bar{R} obliczona z próby według wzoru:

$$\bar{R} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (Z2.30)$$

lub z równoważnego mu w zapisie macierzowym wzoru:

$$\bar{R} = \sqrt{1 - \frac{y^T y - b^T X^T y}{y^T y - \frac{1}{n}(1^T y)^2}} \quad (Z2.31)$$

Im bliższa jest 1 wartość współczynnika korelacji z próby \bar{R} , tym stopień wyjaśnienia wartości Y przez liniową funkcję regresji wielorakiej uważany jest za lepszy. Bliska zeru wartość \bar{R} oznacza brak liniowej zależności między zmienną Y a całym kompleksem zmiennych X_1, X_2, \dots, X_k .

5. Testy istotności

Budując model liniowej regresji wielorakiej uwzględnia się w nim te wszystkie zmienne, które ewentualnie mogą mieć wpływ na kształtowanie się wartości zmiennej zależnej Y . Nie wszystkie z tych zmiennych odgrywają jednak istotną rolę w funkcji regresji. Żeby się przekonać, która ze zmiennych objaśniających nie ma wpływu istotnego na zmienną Y , dla każdego z otrzymanych współczynników regresji przy poszczególnych zmiennych stosuje się test istotności. Test ten pozwala na zweryfikowanie hipotezy, że wartość współczynnika regresji wynosi zero. Dopiero po odrzuceniu takiej hipotezy można stwierdzić, że dana zmienna odgrywa istotną rolę w modelu regresji liniowej. Zmienne, przy których współczynniki regresji nie różnią się od zera istotnie, należy z modelu usunąć i zbudować model z mniejszą już ilością zmiennych objaśniających. Wynika stąd wniosek, że ostateczny model liniowej funkcji regresji wielorakiej, w którym wszystkie współczynniki regresji są istotne i który może być wykorzystany w praktyce, np. do celów prognozy wartości Y , nieraz jest otrzymywany w drugim czy trzecim etapie, przy czym na każdym etapie szacuje się współczynniki regresji danego modelu, sprawdza ich istotność statystyczną i usuwa zmienne z nieistotnymi od zera współczynnikami regresji.

Zatem na podstawie wyników próby, tj. macierzy X i wektora y , weryfikuje się hipotezę, że współczynnik regresji β_i przy zmiennej X_i ma określoną wartość β_{i0} (najczęściej $\beta_{i0}=0$), tj. hipotezę $H_0: \beta_i = \beta_{i0}$, wobec hipotezy alternatywnej $H_1: \beta_i \neq \beta_{i0}$.

Aby przeprowadzić test istotności należy:

1. znaleźć oszacowanie b wektora β parametrów

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (Z2.32)$$

2. obliczyć oszacowanie nieznannej wariancji σ^2 wektora losowego:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n - k - 1} = \frac{y^T y - b^T X^T y}{n - k - 1} \quad (Z2.33)$$

3. obliczyć wartość statystyki:

$$t = \frac{b_i - \beta_{i0}}{s_{b_i}} \quad (Z2.34)$$

gdzie:

- b_i i-ta składowa estymatora b
- s_{b_i} błąd standardowy oceny estymatora b
- s^2 nieobciążony estymator wariancji σ^2 składnika losowego

t	statystyka t-Studenta
k	ilość szacowanych parametrów w danym równaniu
n	ilość obserwacji
\hat{y}_i	wartość teoretyczna zmiennej zależnej
y_i	wartość rzeczywista zmiennej zależnej
β_i	współczynnik regresji wielorakiej przy zmiennej niezależnej X_i
β_{i0}	współczynnik regresji wielorakiej przy zmiennej niezależnej X_i przy wystąpieniu hipotezy zerowej

Zdefiniowana za pomocą wzoru (Z2.34) statystyka t ma przy założeniu prawdziwości hipotezy H_0 rozkład t Studenta z $n-k-1$ stopniami swobody. Z tablic rozkładu t Studenta należy dla $n-k-1$ stopni swobody i dla przyjętego z góry poziomu istotności α odczytuje się taką krytyczną wartość t_α , aby $P\{|t| \geq t_\alpha\} = \alpha$. Jeżeli z porównania obliczonej wartości statystyki t z wartością krytyczną t_α , otrzymuje się nierówność $|t| \geq t_\alpha$, wówczas odrzuca się hipotezę H_0 na korzyść jej alternatywy H_1 . Gdy natomiast spełniona jest nierówność $|t| < t_\alpha$, to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, że współczynnik regresji β_i ma wartość β_{i0} sprecyzowaną w hipotezie H_0 . Odrzucenie hipotezy $H_0: \beta_i = 0$ oznacza, że współczynnik regresji wielorakiej β_i przy zmiennej X_i ma wartość istotnie różną od zera, czyli zmienna X_i wywiera istotny wpływ na kształtowanie się wartości zmiennej zależnej Y.

Innym przeprowadzanym testem jest test istotności współczynnika korelacji. Sprawdzana jest hipoteza $H_0: r = 0$ (r - współczynnik korelacji w populacji), wobec hipotezy alternatywnej $H_1: r \neq 0$. Na podstawie próby oblicza się wartość statystyki [6]:

$$F = \frac{R^2 (n - k - 1)}{(1 - R^2) k} \quad (Z2.35)$$

gdzie:

F	statystyka F-Snedecora
k	ilość szacowanych parametrów w danym równaniu
n	ilość obserwacji
R^2	współczynnik determinacji (oznaczalności)

Statystyka ta ma rozkład F-Snedecora o k i (n-k-1) stopniach swobody. Hipoteza H_0 odrzucana jest na poziomie istotności α ($\alpha = 0.05$), gdy tak obliczona wartość F jest większa lub równa wartości krytycznej $F(\alpha, k, n-k-1)$ odczytanej z tablic rozkładu F.

Wyniki analizy statystycznej

Zastosowana symbolika zmiennych i ich statystyka

W modelu regresji liniowej wieloparametrowej podstawową zmienną y (zwaną zależną lub objaśnianą) była przedziałowa numeryczna skuteczność filtracji powietrza

(podawana w %) oznaczana we wszystkich zależnościach matematycznych przez symbol η .

Wartości przyjmowane przez zmienną zależną wyjaśniane były za pomocą jej związku z wieloma innymi zmiennymi niezależnymi x (objaśniającymi).

Zmiennymi niezależnymi były średnice ziaren aerozolu oraz parametry strukturalne badanych włóknin filtracyjnych:

- d_p średnica ziaren, μm
- d_w średnica włókien, μm
- H grubość warstwy filtracyjnej, mm
- ρ_w gęstość włókien, kg/m^3
- M_p masa powierzchniowa włókniny (gramatura), kg/m^2
- α gęstość upakowania włókniny, -

Dla zmiennej zależnej (η) zebrano $n=144$ obserwacji, tzn. analizowano wartości przedziałowej numerycznej skuteczności filtracji wszystkich materiałów filtracyjnych wykonanych dla potrzeb pracy doktorskiej (tj. 24) o danych parametrach strukturalnych dla 6 wielkości średnic ziaren aerozolu. Ilość obserwacji ($n=144$) pozwoliła na stworzenie wiarygodnego modelu procesu filtracji. Analizowane dane zawarte są w Załączniku 1 oraz w Rozdziale 4.3.3.

W Tabeli Z2.1 zamieszczono statystykę zmiennych: zależnej i niezależnych, stosując podane poniżej oznaczenia:

- M wartość średnia,
- SD odchylenie standardowe,
- SE błąd wartości średniej,
- Min, Max element minimalny i maksymalny,
- R_o rozstęp,
- M_e mediana,
- Mod moda,
- CM częstość mody,
- KM krotność mody.

Tabela Z2.1. Statystyka zmiennej zależnej i zmiennych niezależnych

Z.	Jedn.	M	Med	Mod	C	K	SD	Min	Max	R _o	SE
					M	M					
η	%	83.0311	89.3599	51.0938	1	144	14.7914	51.0938	99.5432	48.4494	1.2326
d_p	μm	0.2765	0.1850	0.0422	24	6	0.2468	0.0422	0.7500	0.7078	0.0206
d_w	μm	2.4153	2.6654	1.1420	48	2	1.0345	1.1420	4.1070	2.9650	0.0862
H	mm	0.4706	0.4580	0.3820	12	1	0.0835	0.3460	0.6120	0.2660	0.0070
ρ_w	kg/m^3	2276.67	2290.0	2290.0	96	1	18.8172	2250.0	2290.0	40.0	1.5681
M_p	kg/m^2	0.0689	0.0657	0.0562	6	24	0.0105	0.0562	0.0877	0.0315	0.0009
α	-	0.0649	0.0646	0.0586	12	1	0.0065	0.0520	0.0810	0.0290	0.0005

Opis modelu liniowej regresji wieloparametrowej

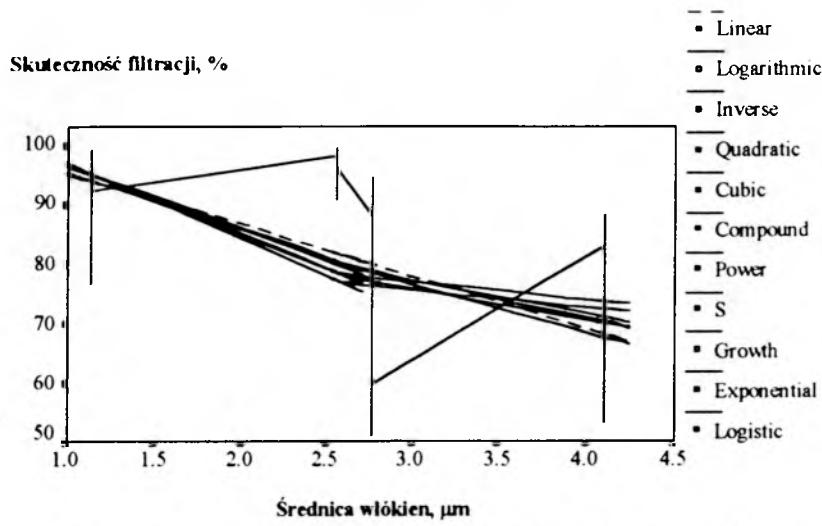
Analizę regresji wykonano stosując metodę wieloparametrowej regresji krokowej. Metoda ta polegała na badaniu zmiennej zależnej w zależności od jednej zmiennej niezależnej, najlepiej wyjaśniającej zmiany zmiennej zależnej, potem od dwóch, trzech, aż do sześciu.

W pierwszym etapie krokowej analizy regresji wyznaczono współczynniki korelacji, a na ich podstawie współczynniki oznaczalności (determinacji) między badaną przedziałową skutecznością filtracji a wszystkimi zmiennymi niezależnymi. W pierwszym kroku analizowana była ta zmienna niezależna, która wyjaśniała w największym procencie zmienność badanej przedziałowej skuteczności filtracji. Następnie przeprowadzona została analiza regresji dla tego właśnie przypadku, tzn. obliczono wszystkie niezbędne statystyki i oszacowano parametry. Określono również procent, do jakiego wzrosłoby wyjaśnienie zmienności zmiennej zależnej, gdyby do modelu wprowadzono kolejną zmienną niezależną. W następnym kroku analizy uwzględniono zmienną niezależną, dla której ten procent był największy. Procedura ta była powtarzana, aż do momentu gdy do modelu zostały wprowadzone wszystkie zmienne niezależne.

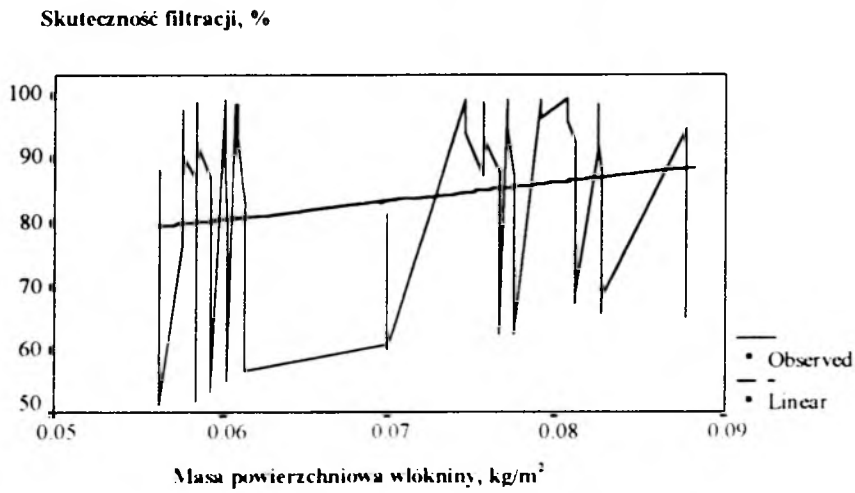
W przypadku takich zmiennych niezależnych jak grubość włókniny filtracyjnej (H), gęstość włókien (ρ_w) stosując dopasowanie liniowe nie uzyskano zadowalających wyników (obserwowane współczynniki istotności miały zbyt wysokie wartości). Z tego właśnie powodu zdecydowano się zastąpić zależności liniowe funkcjami krzywoliniowymi. Po przeprowadzonych porównaniach wielu możliwych dopasowań zastosowano funkcję wykładniczą w przypadku zmiennej H i funkcję logarytmiczną dla zmiennej ρ_w . Aby móc nadal stosować metodę liniowej regresji wielorakiej zmieniono nieliniowe funkcje regresji na liniowe podstawiając zamiast H zmienną $H^* = \exp(H)$, a zamiast zmiennej ρ_w zmienną $\rho_w^* = \ln(\rho_w)$. Zależność zmiennej zależnej od pozostałych zmiennych niezależnych opisano przy pomocy funkcji liniowych, nie wprowadzając żadnych zmian w ich zapisie.

Poniżej zamieszczono wykresy pokazujące końcowe dopasowanie funkcji dla poszczególnych zmiennych niezależnych (Rysunki Z2.2÷Z2.6). Natomiast na Rysunku Z2.1 przedstawione są próby dopasowania różnych funkcji dla zmiennej d_w , tj. dla średnicy włókien. Wykresy te uzyskano korzystając z programu SPSS.

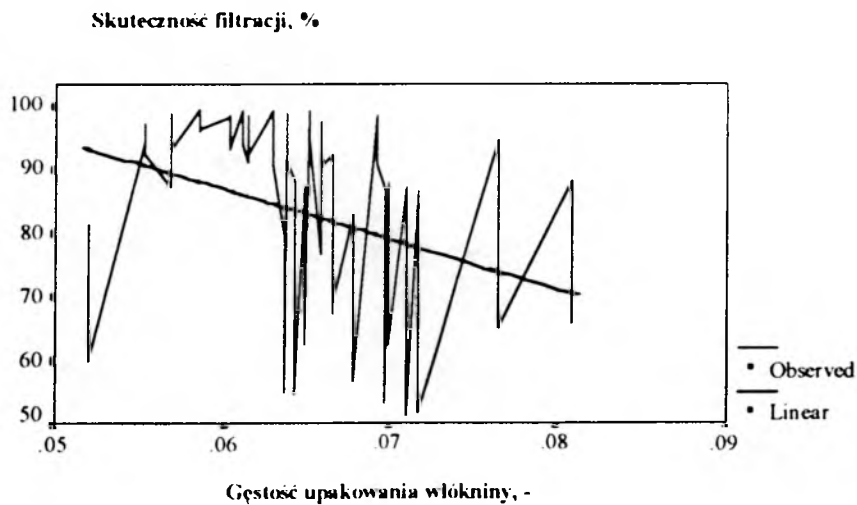
Na podstawie Rysunku Z2.1 można stwierdzić, że w rozważanym przedziale wymiarowym średnic włókien każda z proponowanych funkcji mogłaby być rozważana i zastosowana w modelu regresji. Z tego właśnie powodu zdecydowano się na najprostszą z nich, tj. funkcję liniową.



Rysunek Z2.1. Dopasowanie funkcji dla średnicy włókien

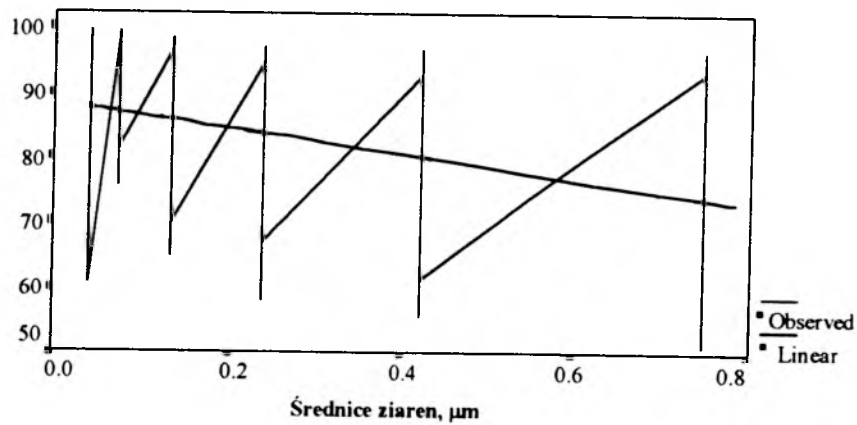


Rysunek Z2.2. Dopasowanie funkcji dla masy powierzchniowej włókniny



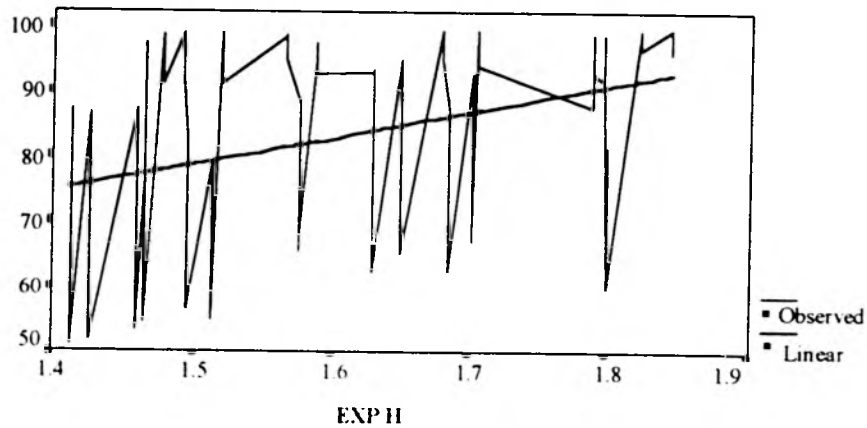
Rysunek Z2.3. Dopasowanie funkcji dla gęstości upakowania włókniny

Skuteczność filtracji, %



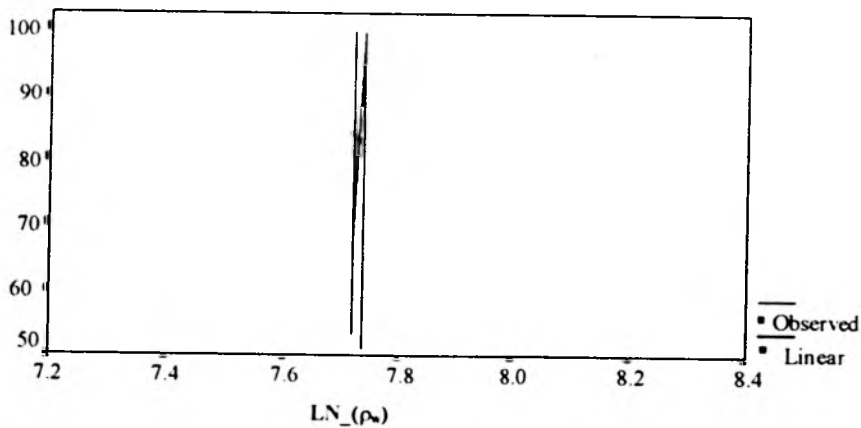
Rysunek Z2.4. Dopasowanie funkcji dla średnic ziaren

Skuteczność filtracji, %



Rysunek Z2.5. Dopasowanie funkcji dla grubości włókniny

Skuteczność filtracji, %



Rysunek Z2.6. Dopasowanie funkcji dla gęstości włókien

Wyniki analizy statystycznej

Poniżej zamieszczono wydruk komputerowy uzyskany podczas przeprowadzania analizy liniowej regresji wielorakiej przy pomocy pakietu SPSS/PC+ Advanced Statistics 4.0 for DOS [48].

Zachowano oryginalny tekst wydruku. Wyjaśnienia dotyczące poszczególnych oznaczeń znajdują się poniżej wydruku.

comp exp_h=exp(h).

comp ln_ro=ln(ro).

The raw data or tranformation pass is proceeding

144 cases are written to the uncompressed active file.

Correla tions	DW	EXP_H	LN_RO	MP	ALFA	DP	ETA_2
DW	1.000 (0) P= .	-.2131 (144) P= .005	-.6301 (144) P= .000	.0592 (144) P= .240	0.5290 (144) P= .000	.0000 (144) P= .500	- .6086 (144) P= .000
EXP_H	-.2132 (144) P= .005	1.000 (144) P= .	-.0186 (144) P= .412	.7931 (144) P= .000	-.5189 (144) P= .000	.0083 (144) P= .461	.3656 (144) P= .000
LN_RO	-.6301 (144) P= .000	-.0186 (144) P= .412	1.0000 (0) P= .	-.861 (144) P= .152	-.2144 (144) P= .005	.0000 (144) P= .500	-.0435 (144) P= .302
MP	.0592 (144) P= .240	0.7931 (144) P= .000	-.0861 (144) P= .152	1.0000 (0) P= .	.0924 (144) P= .135	.0000 (144) P= .500	.2035 (144) P= .007
ALFA	.5290 (144) P= .000	-.5189 (144) P= .000	-.2144 (144) P= .005	.0924 (144) P= .135	1.0000 (144) P= .	.0000 (144) P= .500	-.3470 (144) P= .007
DP	.0000 (144) P= .500	.0083 (144) P= .461	.0000 (144) P= .500	.0000 (144) P= .500	.0000 (144) P= .500	1.0000 (0) P= .	-.3297 (144) P= .000
ETA_2	-.6086 (144) P= .000	.3656 (144) P= .000	-.0435 (144) P= .302	.2035 (144) P= .007	-.3470 (144) P= .000	-.3297 (144) P= .000	1.0000 (0) P= .

(Coefficient / (Cases) / 1-tailed Significance)

" . " is printed if a coefficient cannot be computed

* * * * M U L T I P L E R E G R E S S I O N * * * *

Listwise Deletion of Missing Data

Variable(s) Entered on Step Number

1..	DP	Średnica ziaren
2..	ALFA	Gęstość upakowania włókniny
3..	MP	Masa powierzchniowa włókniny
4..	LN_RO	LN(Gęstość włókien)
5..	DW	Średnica włókien
6..	EXP_H	EXP(Grubość włókniny filtracyjnej)

regres var=dw exp_h ln_ro mp alfa dp
eta_2/stat=defa/depe=eta_2/meth=step.

SPSS/PC+

1/13/97

* * * * M U L T I P L E R E G R E S S I O N * * * *

Listwise Deletion of Missing Data

Equation Number 1 Dependent Variable.. ETA_2

Beginning Block Number 1. Method: Stepwise

Variable(s) Entered on Step Number 1.. DW Średnica włókien

Multiple R	.60858
R Square	.37037
Adjusted R Square	.36594
Standard Error	11.77799

Analysis of Variance

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	1	11587.46180	11587.46180
Residual	142	19698.39134	138.72107

F = 83.53066 Signif F = .0000

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
DW	-8.70122	.95204	-.60858	-9.140	.0000
(Constant)	104.04685	2.50015		41.616	.0000

----- Variables not in the Equation -----

Variable	Beta In	Partial	Min Toler	T	Sig T
EXP_H	.24710	.30424	.95452	3.792	.0002
LN_RO	-.70827	-.69309	.60291	-11.417	.0000
MP	.24042	.30245	.99649	3.768	.0002
ALFA	-.03484	-.03726	.72020	-.443	.6587
DP	-.32971	-.41552	1.00000	-5.424	.0000

* * * * *

Variable(s) Entered on Step Number 2.. LN_RO

Multiple R	.82026
R Square	.67283
Adjusted R Square	.66818
Standard Error	8.52029

Analysis of Variance

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	2	21049.91863	10524.95932
Residual	141	10235.93450	72.59528

*Probabilistyczna ocena numerycznej skuteczności filtracji aerozolu
w materiałach mikrowłóknistych o słabo zdeterminowanej strukturze*

F = 144.98132 Signif F = .0000

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
DW	-15.08241	.88698	-1.05490	-17.004	.0000
LN_RO	-1256.76353	110.07934	-.70827	-11.417	.0000
(Constant)	9834.78565	852.31284		11.539	.0000

----- Variables not in the Equation -----

Variable	Beta In	Partial	Min Toler	T	Sig T
EXP_H	.13924	.23294	.55228	2.834	.0053
MP	.20655	.35975	.60052	4.562	.0000
ALFA	.08485	.12382	.44033	1.476	.1421
DP	-.32971	-.57642	.60291	-8.346	.0000

* * * * *

Variable(s) Entered on Step Number 3.. DP Średnica ziaren

Multiple R .88404
R Square .78153
Adjusted R Square .77685
Standard Error 6.98720

Analysis of Variance

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	3	24450.91761	8150.30587
Residual	140	6834.93552	48.82097

F = 166.94273 Signif F = .0000

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
DW	-15.08241	.72738	-1.05490	-20.735	.0000
LN_RO	-1256.76353	90.27236	-.70827	-13.922	.0000
DP	-19.75741	2.36717	-.32971	-8.346	.0000
(Constant)	9840.24923	698.95340		14.079	.0000

----- Variables not in the Equation -----

Variable	Beta In	Partial	Min Toler	T	Sig T
EXP_H	.14223	.29118	.55228	3.588	.0005
MP	.20655	.44025	.60052	5.781	.0000
ALFA	.08485	.15153	.44033	1.807	.0729

* * * * *

Variable(s) Entered on Step Number 4.. MP Masa powierzchniowa włókniny

Multiple R .90768
 R Square .82388
 Adjusted R Square .81881
 Standard Error 6.29617

Analysis of Variance

	DF	Sum of Squares	Mean Square
Regression	4	25775.64641	6443.91160
Residual	139	5510.20672	39.64177

F = 162.55356 Signif F = .0000

----- Variables in the Equation -----

Variable	B	SE B	Beta	T	Sig T
DW	-15.10665	.65546	-1.05659	-23.048	.0000

LN_RO	-1227.09610	81.50623	-.69155	-15.055	.0000
DP	-19.75741	2.13306	-.32971	-9.262	.0000
MP	291.20608	50.37482	.20655	5.781	.0000
(Constant)	9590.89593	631.30279		15.192	.0000

----- Variables not in the Equation -----

Variable	Beta In	Partial	Min Toler	T	Sig T
EXP_H	-.11953	-.15110	.28143	-1.796	.0747
ALFA	.06436	.12755	.43967	1.511	.1332

End Block Number 1 PIN = .050 Limits reached.

OZNACZENIA:

Adjusted R Square	skorygowany współczynnik determinacji (oznaczalności),
Analysis of Variance	analiza wariancji,
B	oszacowanie parametru równania regresji (metodą najmniejszych kwadratów),
Beta	zestandardyzowany współczynnik regresji dla poszczególnych zmiennych niezależnych,
Beta In	standaryzowany współczynnik regresji w przypadku, gdyby rozważana zmienna niezależna weszła do równania w następnym kroku obliczeń,
DF	ilość stopni swobody,
F	wartość statystyki F-Snedecora,
Mean Square	wartość średnia kwadratów,
Min Toler	obserwowany poziom istotności przy odrzuconych zmiennych niezależnych,
Multiple R	współczynnik korelacji wielorakiej,
Partial	częściowy współczynnik korelacji,
PIN	założony poziom istotności dla testu F-Snedecora,
R Square, R ²	współczynnik determinacji (oznaczalności),
Regression	regresja,
Residual	reszta,

SE B	ocena błędu średniego szacunku parametru równania regresji,
Sig T	obserwowany poziom istotności testu t-Studenta podczas weryfikacji hipotezy o istotności odchylen od zera poszczególnych parametrów (współczynników) regresji,
Signif F	obserwowany poziom istotności testu F-Snedecora podczas weryfikacji hipotezy o istotności odchylen od zera współczynnika korelacji wielorakiej,
Standard Error	błąd standardowy,
Sum of Squares	suma kwadratów,
T	wartość statystyki t-Studenta,
Variable	zmienne występujące w analizie regresji.

Ocena analizy regresji

Podczas I części obliczeń, przy pomocy pakietu SPSS/PC+, wykonano analizę współzależności między parami zmiennych. Do analizy współzależności wykorzystano współczynniki korelacji liniowej. Uzyskano macierz korelacji pomiędzy zmienną zależną (η) a każdą zmienną niezależną, a także pomiędzy poszczególnymi parami zmiennych niezależnych.

Przeprowadzona została weryfikacja hipotezy o istotności odchylen od zera poszczególnych współczynników korelacji liniowej. Rozkład t został tutaj potraktowany jako specjalny przypadek rozkładu F, stosowanego do weryfikacji hipotezy o istotności odchylenia od zera wartości współczynnika korelacji (obliczając wartość t^2 o $n-2$ stopniach swobody można stwierdzić, że rozkład ten jest identyczny z rozkładem F z 1 i $n-2$ stopniami swobody).

Zweryfikowano zatem hipotezę $H_0: \rho=0$ wobec hipotezy alternatywnej $H_1: \rho \neq 0$, przy poziomie istotności testu t-Studenta $\alpha=0.05$, gdzie ρ jest współczynnikiem korelacji liniowej w populacji.

Obliczona została wartość statystyki t:

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} \quad (Z.2.36)$$

gdzie:

- n ilość elementów w próbie.
- r wartość współczynnika korelacji próby
- t statystyka t-Studenta

Statystyka ta miała przy założeniu prawdziwości hipotezy H_0 rozkład t Studenta z $n-2$ stopniami swobody. Z tablic rozkładu t Studenta dla ustalonego z góry poziomu istotności α i dla $n-2=142$ stopni swobody odczytana została wartość krytyczna t_α tak, aby $P\{|t| \geq t_\alpha\} = \alpha$. Wartość krytyczna wynosiła $t_\alpha=1.98$.

Poniżej podano wyjaśnienie powyższych oznaczeń:

- t statystyka t-Studenta
- t_α wartość zmiennej t Studenta dla $n-k-1$ stopni swobody i dla ustalonego z góry współczynnika ufności $1-\alpha=1-0.95$,

α poziom istotności

Np. dla zmiennych niezależnych d_w i $\exp H$ otrzymano:

$$t = \frac{-0.2132}{\sqrt{1-0.2132^2}} \sqrt{142} = -2.60 \quad (Z2.37)$$

Ponieważ

$$|t| = 2.6 > 1.98 \quad (Z2.38)$$

należało odrzucić hipotezę H_0 . Oznaczało to, że współczynnik korelacji między dwiema zmiennymi niezależnymi d_w i $\exp H$ różnił się istotnie od zera, były one zatem skorelowane.

Dla d_w i M_p :

$$t = \frac{0.0592}{\sqrt{1-0.0592^2}} \sqrt{142} = 0.707 \quad (Z2.39)$$

Ponieważ

$$|t| = 0.707 < 1.98 \quad (Z2.40)$$

zatem hipotezy H_0 nie można było odrzucić. Oznaczało to, że współczynnik korelacji między dwiema zmiennymi niezależnymi d_w i M_p nie różnił się istotnie od zera, nie były one zatem skorelowane.

Przy wysokim współczynniku korelacji pomiędzy zmiennymi niezależnymi nie powinno się stosować metody najmniejszych kwadratów.

Wartość P podana w tabeli korelacji (wydruk komputerowy) określała obserwowany poziom istotności. Im wartość ta była wyższa, tym gorzej skorelowane były dwie zmienne.

Na podstawie znajomości wartości współczynników korelacji pomiędzy zmiennymi niezależnymi można było uzyskać pewne, wstępne, informacje dotyczące współczynnika korelacji wielorakiej równania regresji. Jeśli współczynniki korelacji pomiędzy zmiennymi niezależnymi są dość duże, wówczas współczynnik korelacji wielorakiej jest zazwyczaj niewiele większy od największego współczynnika korelacji całkowitej ze zmienną zależną. Czyli, chcąc wyjaśnić tyle, ile jest tylko możliwe, zróżnicowania zmiennej zależnej, należy szukać zmiennych niezależnych, które nie są ze sobą powiązane, ale mają za to duże współczynniki korelacji ze zmienną zależną. Jeśli występują dwie mocno ze sobą powiązane zmienne niezależne, druga będzie w zasadzie wyjaśniała tyle samo zróżnicowania co pierwsza, ponieważ one na siebie silnie zachodzą. Jeśli są one nieskorelowane, każda będzie wyjaśniała inną część całkowitego zróżnicowania.

Analizując otrzymaną macierz korelacji można było zauważyć silne skorelowanie zmiennej niezależnej α ze zmiennymi d_w i $\exp H$, zmiennej $\exp H$ z M_p oraz zmiennej $\ln(\rho_w)$ z d_w .

Silna korelacja pomiędzy tymi zmiennymi nie powinna budzić zdziwienia. Jest oczywiste, że musi występować związek pomiędzy średnicą włókna d_w a jego masą właściwą ρ_w oraz pomiędzy grubością warstwy filtracyjnej H a masą powierzchniową włókniny (gramaturą) M_p . Związek pomiędzy współczynnikiem α , czyli gęstością upakowania włókniny, a zmiennymi d_w i $\exp H$ może być wyjaśniony przez definicję

tego współczynnika. Gęstość upakowania włókniny filtracyjnej jest to bowiem stosunek objętości włókien zawartych w filtrze do objętości materiału [58].

Należało spodziewać się, że ze względu na występującą korelację omawiane zmienne nie będą mogły wejść do równania regresji wielorakiej. Nie nastąpi bowiem wówczas przekroczenie wartości krytycznej poziomu istotności testu t Studenta lub obserwowany dla nich poziom istotności będzie bliski ustalonej z góry wartości granicznej lub ją przekroczy. Dodanie tych zmiennych do równania regresji prawdopodobnie nie poprawiłoby stopnia wyjaśniania zmiennej zależnej przez zmienne niezależne.

Natomiast zmienna zależna - tj. skuteczność filtracji - powinna zostać wyjaśniona przez takie zmienne niezależne jak:

d_w - średnica włókien,

ρ_w - gęstość włókien,

d_p - średnica ziaren,

M_p - masa powierzchniowa włókniny (gramatura).

Poniżej omówionej macierzy korelacji, na wydruku komputerowym znajduje się analiza danych metodą regresji krokowej.

I KROK OBLICZEŃ

W pierwszym kroku obliczeń do równania regresji wprowadzona została zmienna niezależna d_w .

Skorygowany współczynnik determinacji R_c^2 uwzględniający popełnianie błędu systematycznego podczas określania nieskorygowanej wartości R^2 został policzony według następującego wzoru:

$$R_c^2 = R^2 - \frac{k \cdot \varphi^2}{n - k - 1} = R^2 - \frac{k(1 - R^2)}{n - k - 1} = \quad (Z2.41)$$

$$= 0.37037 - \frac{1 \cdot (1 - 0.37037)}{144 - 1 - 1} = 0.36594$$

gdzie:

φ^2 współczynnik zbieżności, $\varphi^2 = 1 - R^2$

k ilość szacowanych parametrów w danym równaniu

n ilość obserwacji

R współczynnik korelacji wielorakiej

R^2 nieskorygowany współczynnik determinacji (oznaczalności)

R_c^2 skorygowany współczynnik determinacji

Dla otrzymanego równania regresji (zawierającego jedynie jedną zmienną objaśniającą) współczynnik korelacji wynosił $R=0.60858$.

Na podstawie znajomości wartości R_c^2 można stwierdzić, że zmienność zmiennej zależnej η wyjaśniona była w około 36.6% przez zmiany zmiennej niezależnej d_w ($R_c^2=0.36594$).

Znajdująca się na wydruku analiza wariancji służyła do przeprowadzenia testu F-Snedecora podczas weryfikacji hipotezy o istotności odchylen od zera współczynnika korelacji wielorakiej R. W tej części analizy zostały podane składniki wartości całkowitej sumy kwadratów odchylen zmiennej zależnej od jej średniej - suma kwadratów odchylen wyjaśnionych regresją oraz nie wyjaśnionych regresją (składnik resztowy).

Wykorzystany został następujący wzór na testowanie hipotezy zerowej o braku liniowego związku pomiędzy zmiennymi zależną i niezależną:

$$F = \frac{R^2(n-k-1)}{(1-R^2)k} = \frac{0.37037(144-1-1)}{(1-0.37037) \cdot 1} =$$
$$= \frac{\text{Mean Square Regression}}{\text{Mean Square Residual}} = 83.53066 \quad (\text{Z.2.42})$$

gdzie:

- k ilość szacowanych parametrów w danym równaniu
- n ilość obserwacji
- F statystyka F - Snedecora
- R² nieskorygowany współczynnik determinacji (oznaczalności)

Z tablicy rozkładu F-Snedecora odczytano wartość krytyczną F dla poziomu istotności $\alpha=0.05$:

$$F(\alpha, k, n-k-1)=F(0.05, 1, 142)=3.906 \quad (\text{Z.2.43})$$

Ponieważ $F > F(\alpha, k, n-k-1)$, na poziomie istotności $\alpha=0.05$ można było odrzucić hipotezę zerową o nieistotności odchylen od zera współczynnika korelacji wielorakiej R, a zatem istniała korelacja pomiędzy zmienną niezależną d_w a zmienną zależną η .

Otrzymano następujące równanie regresji:

$$\eta = -8.70122d_w + 104.04685 \quad (\text{Z.2.44})$$

Błąd standardowy współczynnika regresji B wynosił:

$$V(B) = 0.95204 \quad (\text{Z.2.45})$$

co stanowiło 10.9% wartości tego parametru. Uzyskany wynik można uznać za zadawalający. Mała wartość błędu standardowego oznaczała, że efekt oddziaływania na daną zmienną różnych czynników przypadkowych nie uwzględnionych w modelu był znikomy.

Test istotności parametru regresji ($|t|=9.140$, a $t_\alpha(0.05, 142)=1.98$, czyli $|t| > t_\alpha$) wskazywał, że na poziomie istotności 0.05 hipoteza zerowa o nieistotności odchylen od zera parametru regresji $H_0: \rho=0$ została odrzucona.

Odrzucając tą hipotezę można było stwierdzić, że zmienna niezależna d_w odgrywała istotną rolę w modelu regresji liniowej.

Można zatem wykorzystywać otrzymaną funkcję regresji jako narzędzie przy dokonywaniu prognozy wartości jednej cechy na podstawie wartości drugiej, skorelowanej z nią cechy.

Standaryzowany współczynnik regresji (Beta) dla d_w wynosił -0.60858 . Oznaczało to, że wzrost wielkości średnicy włókien o jedną jednostkę ($1 \mu\text{m}$) spowodował spadek skuteczności filtracji o 0.60858 jednostki (%).

Na wydruku komputerowym, poniżej omawianych wyników, znajduje się statystyka opisowa zmiennych niezależnych, które w pierwszym kroku obliczeń nie weszły do równania regresji. Podane zostały wartości standaryzowanych współczynników regresji (Beta In), jakie pojawiłyby się w przypadku, gdyby rozważana zmienna niezależna weszła do równania w następnym kroku obliczeń oraz częściowe współczynniki regresji (Partial), a także wyniki przeprowadzanego testu istotności t Studenta dla współczynników regresji. Analizując tą część obliczeń można przewidzieć, że w następnym kroku obliczeń do równania regresji wejdzie zmienna o największym współczynniku korelacji częściowej przy jednoczesnym odrzuceniu hipotezy o zerowej wartości współczynnika regresji ($\ln(\rho_w)$).

II KROK OBLICZEŃ

W drugim kroku obliczeniowym wprowadzono do analizy kolejną zmienną objaśniającą $\ln(\rho_w)$. Sposób i kolejność wykonywanych obliczeń były podobne jak w przypadku występowania w równaniu regresji tylko jednej zmiennej niezależnej.

Wprowadzenie jej spowodowało wzrost wyjaśniania zmienności przedziałowej skuteczności filtracji. Wartość skorygowanego współczynnika determinacji wynosił 0.66818 , czyli zmienność η została wyjaśniona w około 66.8% .

Dla otrzymanego równania regresji (zawierającego dwie zmienne objaśniające) współczynnik korelacji wynosił $R=0.82026$.

Mozna zauważyć, że wraz z dodaniem do równania regresji kolejnej zmiennej objaśniającej wzrósł stopień wyjaśniania zmiennej objaśnianej oraz wartość współczynnika korelacji.

Przy pomocy testu F-Snedecora, na poziomie istotności $\alpha=0.05$, odrzucono hipotezę zerową o nieistotności odchylen od zera współczynnika korelacji wielorakiej R.

Otrzymane równanie regresji przyjęło postać

$$\eta = -15.08241d_w - 1256.76353 \ln(\rho_w) + 9834.78565 \quad (Z2.46)$$

Błąd standardowy współczynnika regresji B wynosił

- dla zmiennej niezależnej d_w :

$$V(B) = 0.88698 \quad (Z2.47)$$

co stanowiło 5.88% wartości tego parametru. W drugim kroku obliczeniowym została uzyskana niższa wartość błędu standardowego niż w pierwszym kroku obliczeń.

- dla zmiennej niezależnej $\ln(\rho_w)$:

$$V(B) = 110.07934 \quad (Z2.48)$$

Stanowiło to 8.76% wartości współczynnika regresji przy zmiennej $\ln(\rho_w)$.

Test t Studenta istotności parametru (współczynnika) regresji zarówno dla zmiennej niezależnej d_w jak i $\ln(\rho_w)$ wskazywał, że na poziomie istotności 0.05 hipoteza zerowa o nieistotności odchylen od zera współczynników regresji $H_0: \rho=0$ została odrzucona:

- dla zmiennej niezależnej d_w :

$$|t|=17.004, \text{ a } t_{\alpha}(0.05, 141)=1.98, \text{ czyli } |t| > t_{\alpha} \quad (Z2.49)$$

- dla zmiennej niezależnej $\ln(\rho_w)$:

$$|t|=11.417, \text{ a } t_{\alpha}(0.05, 141)=1.98, \text{ czyli } |t| > t_{\alpha} \quad (Z2.50)$$

Odrzucając tą hipotezę można było stwierdzić, że obie omawiane zmienne niezależne odgrywały istotną rolę w modelu regresji liniowej.

Standaryzowany współczynnik regresji Beta dla d_w wynosił -1.05490. Oznaczało to, że wzrost wielkości średnicy włókien o jedną jednostkę (1 μm) spowoduje spadek skuteczności filtracji o 1.05490 jednostki (%), pod warunkiem, że druga zmienna niezależna będzie miała stałe wartości.

Natomiast współczynnik Beta dla $\ln(\rho_w)$ wynosił -0.70827. Oznaczało to, że wzrost wielkości $\ln(\rho_w)$ o jedną jednostkę spowoduje spadek skuteczności filtracji o 0.70827 jednostki (%), przy zachowaniu warunku niezmienności pierwszej zmiennej niezależnej.

Tak jak w przypadku pierwszego kroku obliczeniowego, tak samo w każdym kolejnym kroku obliczeń na wydruku znajduje się statystyka opisowa zmiennych niezależnych, które w danym kroku obliczeń nie weszły do równania regresji. Analizując tą część obliczeń można przewidzieć, że w trzecim kroku obliczeń do równania regresji wejdzie średnica ziaren d_p , tzn. zmienna niezależna o największym współczynniku korelacji częściowej przy jednoczesnym odrzuceniu hipotezy o zerowej wartości współczynnika regresji.

III KROK OBLICZEŃ

W trzecim kroku obliczeniowym wprowadzono do analizy zmienną objaśniającą d_p .

Wprowadzenie jej spowodowało wzrost wyjaśniania zmienności przedziałowej skuteczności filtracji. Wartość skorygowanego współczynnika determinacji wynosiła 0.77685, czyli zmienność η została wyjaśniona w około 77.7%.

Dla otrzymanego równania regresji (zawierającego trzy zmienne objaśniające) współczynnik korelacji wynosił $R=0.88404$.

Przy pomocy testu F-Snedecora, na poziomie istotności $\alpha=0.05$, odrzucono hipotezę zerową o nieistotności odchylen od zera współczynnika korelacji wielorakiej R.

Otrzymano następujące równanie regresji:

$$\eta = -15.08241d_w - 1256.76353 \cdot \ln(\rho_w) - 19.75741d_p + 9840.24923 \quad (Z2.51)$$

Błąd standardowy współczynnika regresji B wynosił:

- dla zmiennej niezależnej d_w :

$$V(B) = 0.72738 \quad (Z2.52)$$

co stanowiło 4.8% wartości tego parametru. W trzecim kroku obliczeniowym została uzyskana niższa wartość błędu standardowego niż w drugim kroku obliczeń przy niezmięnionej wartości współczynnika regresji.

- dla zmiennej niezależnej $\ln(\rho_w)$:

$$V(B)=90.27236 \quad (Z2.53)$$

Stanowiło to 7.18% wartości współczynnika regresji przy zmiennej $\ln(\rho_w)$. Także dla tej zmiennej w trzecim kroku obliczeń uzyskano niższą wartość odchylenia standardowego.

- dla zmiennej niezależnej d_p :

$$V(B)=2.36717 \quad (Z2.54)$$

Stanowiło to 11.98% wartości współczynnika regresji dla d_p .

Test t Studenta istotności parametru (współczynnika) regresji dla zmiennych niezależnych d_w , $\ln(\rho_w)$ oraz d_p wskazywał, że na poziomie istotności 0.05 hipoteza zerowa o nieistotności odchylen od zera współczynników regresji $H_0: \rho=0$ została odrzucona, ponieważ:

- dla zmiennej niezależnej d_w :

$$|t|=20.735, \text{ a } t_{\alpha}(0.05, 140)=1.98, \text{ czyli } |t| > t_{\alpha} \quad (Z2.55)$$

- dla zmiennej niezależnej $\ln(\rho_w)$:

$$|t|=13.922, \text{ a } t_{\alpha}(0.05, 140)=1.98, \text{ czyli } |t| > t_{\alpha} \quad (Z2.56)$$

- dla zmiennej niezależnej d_p :

$$|t|=8.346, \text{ a } t_{\alpha}(0.05, 140)=1.98, \text{ czyli } |t| > t_{\alpha} \quad (Z2.57)$$

Odrzucając hipotezę zerową można było stwierdzić, że wszystkie omawiane zmienne niezależne odgrywały istotną rolę w modelu regresji liniowej.

Standaryzowany współczynnik regresji Beta dla d_w wynosił -1.05490. Oznaczało to, że wzrost wielkości średnicy włókien o jedną jednostkę (1 μm) spowoduje spadek skuteczności filtracji o 1.05490 jednostki (%), pod warunkiem, że pozostałe zmienne niezależne będą miały stałe wartości.

Natomiast współczynnik Beta dla $\ln(\rho_w)$ wynosi -0.70827. Oznaczało to, że wzrost wielkości $\ln(\rho_w)$ o jedną jednostkę spowoduje spadek skuteczności filtracji o 0.70827 jednostki (%), przy zachowaniu warunku niezmienności pozostałych zmiennych niezależnych. Były to takie same wartości współczynnika Beta, jakie otrzymano w drugim kroku obliczeniowym.

Współczynnik Beta dla d_p wynosił -0.32971. Oznaczało to, że wzrost wielkości d_p o jedną jednostkę (1 μm) spowoduje spadek skuteczności filtracji o 0.32971 jednostki (%), przy zachowaniu warunku niezmienności pozostałych zmiennych niezależnych.

Analizując statystykę opisową zmiennych niezależnych, które w danym kroku obliczeń nie weszły do równania regresji, można przewidzieć, że w czwartym kroku obliczeń do równania regresji wejdzie masa powierzchniowa włókniny (gramatura) - M_p .

IV KROK OBLICZEŃ

W czwartym kroku obliczeniowym wprowadzono do analizy zmienną objaśniającą M_p .

Spowodowało to wzrost wyjaśnienia zmienności przedziałowej skuteczności filtracji. Wartość skorygowanego współczynnika determinacji wynosiła 0.81881, czyli zmienność η została wyjaśniona w około 81.9%.

Dla otrzymanego równania regresji (zawierającego cztery zmienne objaśniające) współczynnik korelacji wyniósł $R=0.90768$.

Przy pomocy testu F-Snedecora, na poziomie istotności $\alpha=0.05$, odrzucono hipotezę zerową o nieistotności odchylen od zera współczynnika korelacji wielorakiej R.

Otrzymano następujące równanie regresji:

$$\eta = -15.10665d_w - 1227.09610 \ln(\rho_w) - 19.75741d_p + 291.20608M_p + 9590.89593 \quad (Z2.58)$$

Błąd standardowy współczynnika regresji B wyniósł:

- dla zmiennej niezależnej d_w :

$$V(B) = 0.65546 \quad (Z2.59)$$

co stanowiło 4.34% wartości tego parametru. W czwartym kroku obliczeniowym dla zmienionej wartości współczynnika regresji została uzyskana niższa wartość błędu standardowego niż w drugim i trzecim kroku obliczeń:

- dla zmiennej niezależnej $\ln(\rho_w)$:

$$V(B) = 81.50623 \quad (Z2.60)$$

Stanowiło to 6.64% wartości współczynnika regresji przy zmiennej $\ln(\rho_w)$. Także dla tej zmiennej w trzecim kroku obliczeń uzyskano niższą wartość błędu standardowego, przy zmienionej wartości współczynnika regresji.

- dla zmiennej niezależnej d_p :

$$V(B) = 2.13306 \quad (Z2.61)$$

Stanowiło to 10.80% wartości współczynnika regresji przy zmiennej d_p . Była to niższa wartość niż w trzecim kroku obliczeniowym przy takiej samej wartości współczynnika regresji.

- dla zmiennej niezależnej M_p :

$$V(B) = 50.37482 \quad (Z2.62)$$

Stanowiło to 17.30% wartości współczynnika regresji przy zmiennej M_p .

Otrzymane małe wartości błędów standardowych oznaczały, że efekt oddziaływania na daną zmienną różnych czynników przypadkowych nie uwzględnionych w modelu był niewielki.

Test t Studenta istotności parametru (współczynnika) regresji dla zmiennych niezależnych d_w , $\ln(\rho_w)$, d_p oraz M_p wskazuje, że na poziomie istotności 0.05 hipoteza zerowa o nieistotności odchylen od zera współczynników regresji $H_0: \rho=0$ została odrzucona, ponieważ:

- dla zmiennej niezależnej d_w :

$$|t| = 23.048, \text{ a } t_{\alpha}(0.05, 140) = 1.98, \text{ czyli } |t| > t_{\alpha} \quad (Z2.63)$$

- dla zmiennej niezależnej $\ln(\rho_w)$:
 $|t|=15.055$, a $t_{\alpha}(0.05, 140)=1.98$, czyli $|t| > t_{\alpha}$ (Z.2.64)
- dla zmiennej niezależnej d_p :
 $|t|=9.262$, a $t_{\alpha}(0.05, 140)=1.98$, czyli $|t| > t_{\alpha}$ (Z.2.65)
- dla zmiennej niezależnej M_p :
 $|t|=5.781$, a $t_{\alpha}(0.05, 140)=1.98$, czyli $|t| > t_{\alpha}$ (Z.2.66)

Odrzucając hipotezę zerową można stwierdzić, że wszystkie omawiane zmienne niezależne odgrywały istotną rolę w modelu regresji liniowej.

Standaryzowany współczynnik regresji Beta dla d_w wynosił -1.05659 . Oznaczało to, że wzrost wielkości średnicy włókien o jedną jednostkę ($1 \mu\text{m}$) spowoduje spadek skuteczności filtracji o 1.05659 jednostki (%), pod warunkiem, że pozostałe zmienne niezależne będą miały stałe wartości.

Natomiast współczynnik Beta dla $\ln(\rho_w)$ wynosi -0.69155 . Oznacza to, że wzrost wielkości $\ln(\rho_w)$ o jedną jednostkę spowoduje spadek skuteczności filtracji o 0.69155 jednostki (%), przy zachowaniu warunku niezmienności pozostałych zmiennych niezależnych.

Współczynnik Beta dla d_p wynosił -0.32971 . Oznaczało to, że wzrost wielkości d_p o jedną jednostkę ($1 \mu\text{m}$) spowoduje spadek skuteczności filtracji o 0.32971 jednostki (%), przy zachowaniu warunku niezmienności pozostałych zmiennych niezależnych. Była to taka sama wartość współczynnika Beta, jaką otrzymano w trzecim kroku obliczeniowym dla zmiennej d_p .

Współczynnik Beta dla M_p wynosił $+0.20655$. Oznaczało to, że wzrost wielkości M_p o jedną jednostkę (kg/m^2) spowoduje wzrost skuteczności filtracji o 0.20655 jednostki (%), przy zachowaniu warunku niezmienności pozostałych zmiennych niezależnych.

Statystyka opisowa zmiennych niezależnych, które w czwartym kroku obliczeń nie weszły do równania regresji obejmowała zmienne: $\exp H$ oraz α .

W przypadku obu tych zmiennych, wyniki przeprowadzonego testu t Studenta dotyczącego istotności parametru (współczynnika) regresji wskazywały, że na poziomie istotności 0.05 nie można było odrzucić hipotezy zerowej o nieistotności odchylen od zera współczynników regresji $H_0: \rho=0$.

Zatem zmienne niezależne $\exp H$ oraz α nie odgrywały istotnej roli w modelu regresji liniowej i nie mogły być włączone do równania regresji. Zostało to wcześniej zasygnalizowane przy omawianiu macierzy korelacji. Zauważono bowiem silne skorelowanie pary zmiennych niezależnych: α ze zmiennymi d_w i $\exp H$, zmiennej $\exp H$ z M_p oraz zmiennej $\ln(\rho_w)$ z d_w .

Mimo skorelowania $\ln(\rho_w)$ z d_w obie te zmienne zostały uwzględnione w równaniu regresji. Ich wzajemne skorelowanie nie wpłynęło zatem istotnie na ostateczny wynik. Natomiast w przypadku zmiennych α oraz $\exp H$ nie miały one liczącego się wpływu na zmienną zależną, ponieważ stojące przy nich parametry regresji nieistotnie różniły się od zera. Wskazywał na to wynik zastosowanego w czwartym kroku obliczeniowym testu istotności t Studenta podczas analizy zmiennych nie wchodzących do równania regresji.

Ponizej, w Tabeli Z2.2, przedstawiono przedziały ufności dla poszczególnych współczynników regresji obliczone ze wzoru:

$$P\{b_i - t_{\alpha} s_{b_i} < \beta_i < b_i + t_{\alpha} s_{b_i}\} = 1 - \alpha \quad (Z2.67)$$

gdzie:

- b_i i- ta składowa estymatora \mathbf{b} ,
- s_{b_i} błąd standardowy oceny estymatora \mathbf{b} ,
- t_{α} wartość zmiennej t Studenta dla $n-k-1$ stopni swobody i dla ustalonego z góry współczynnika ufności $1-\alpha=1-0.95$, $t_{\alpha}(0.05, 140) = 1.98$,
- α poziom istotności,
- β_i i-ta składowa wektora β współczynników regresji.

Tabela Z2.2. Przedziały ufności dla współczynników regresji i wyrazu wolnego równania regresji w ostatnim kroku obliczeń

Zmienne niezależne i wyraz wolny	Współczynniki regresji	Średni błąd standardowy	Przedział ufności	
			dolna granica	górną granica
d_w	-15.10665	0.65546	-16.40446	-13.80884
$\ln(\rho_w)$	-1227.09610	81.50623	-1388.47850	-1065.71370
d_n	-19.75741	2.13306	-23.98087	-15.53395
M_n	291.20608	50.37482	191.46394	390.94822
wyraz wolny	9590.89593	631.30279	8340.9164	10840.8750

Podane w Tabeli Z2.2 przedziały ufności z prawdopodobieństwem 0.95 pokrywają nieznaną wartość współczynników regresji liniowej.

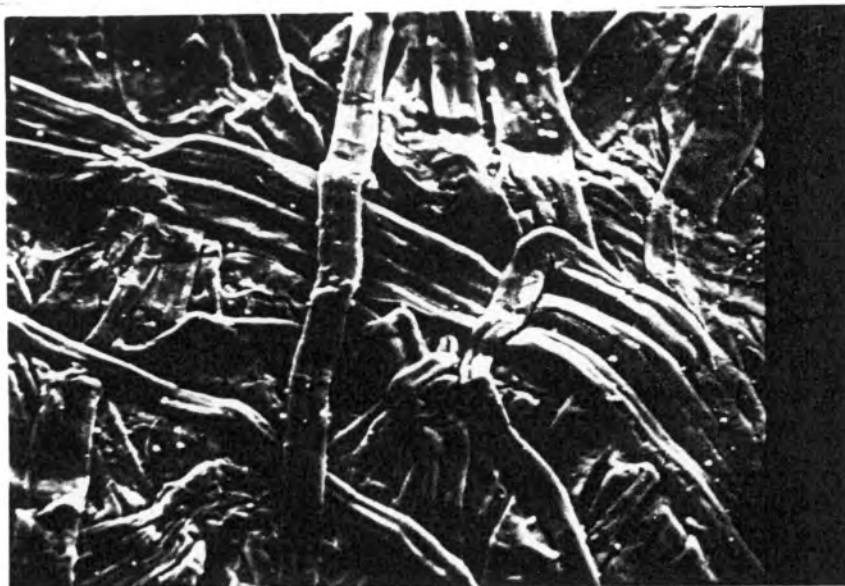
ZAŁĄCZNIK 3

Zdjęcia mikroskopowe oraz próbki włókien filtracyjnych

Włókno celulozowe sosnowe (karton)

SKALA:

500:1



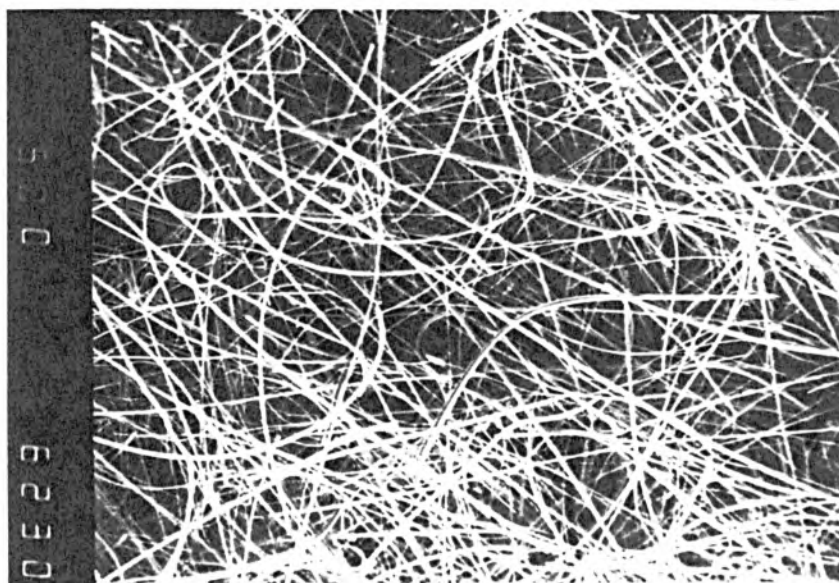
1000:1



2500:1

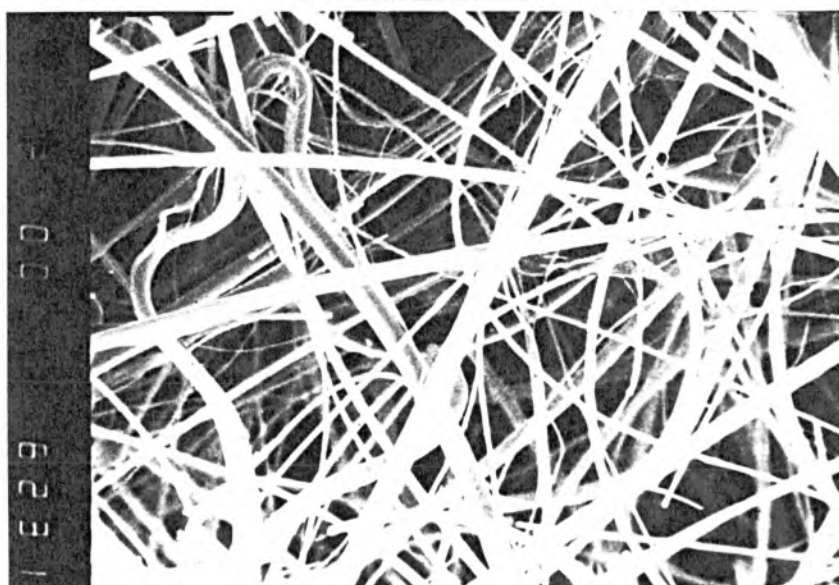


I PL/60/SP

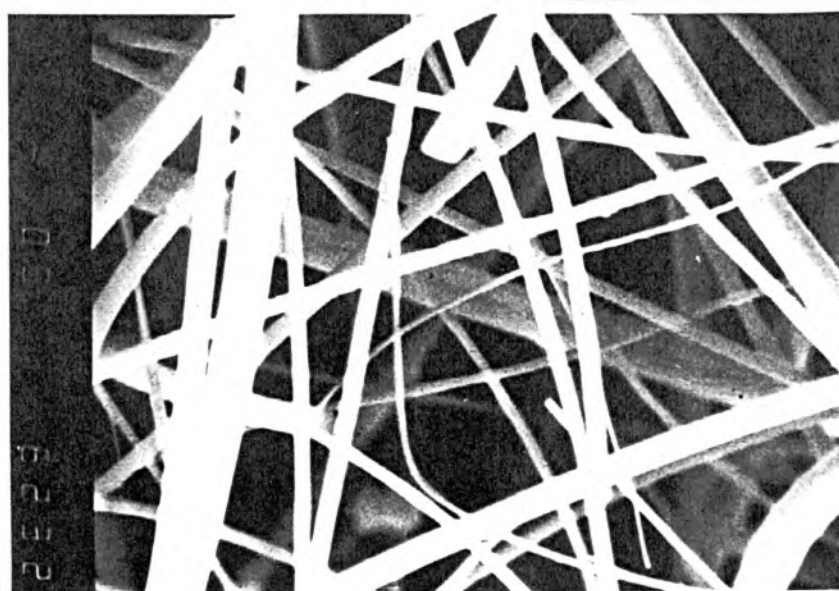


SKALA:

500:1



1000:1

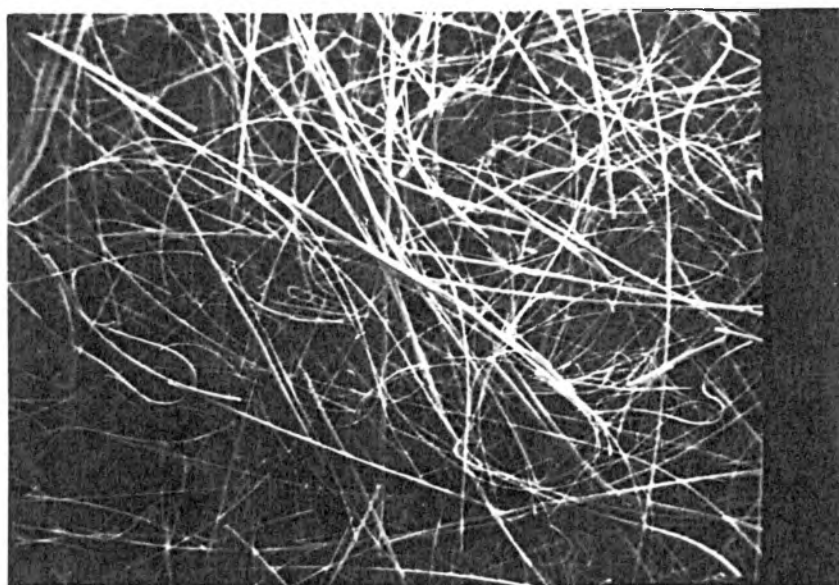


2500:1

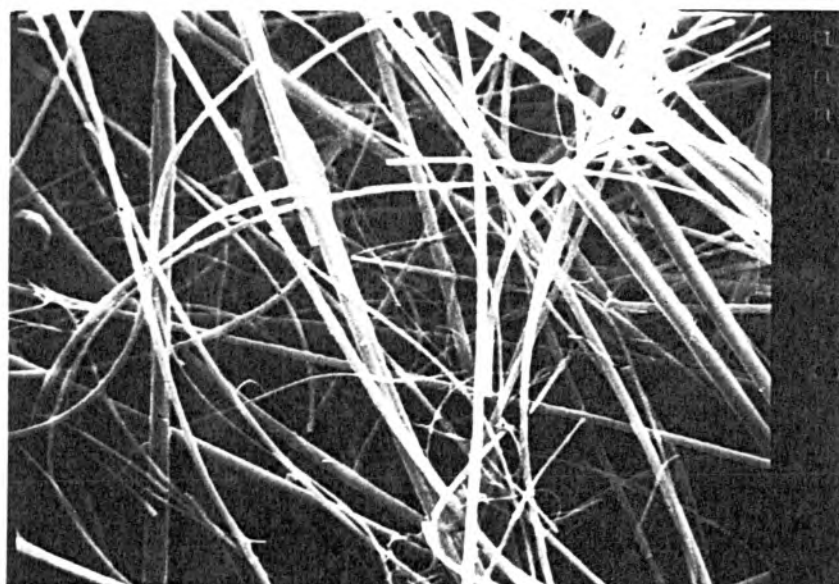
I PL/60/RK

SKALA:

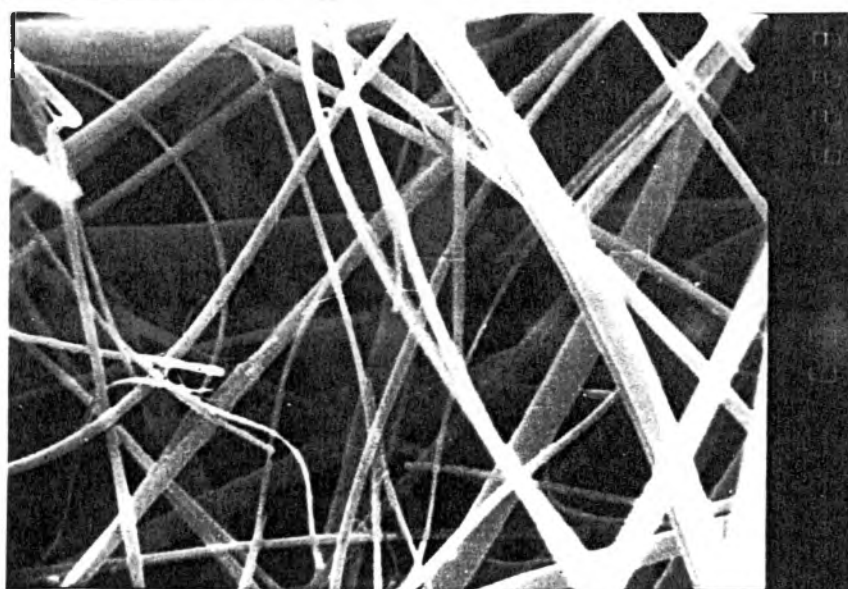
500:1



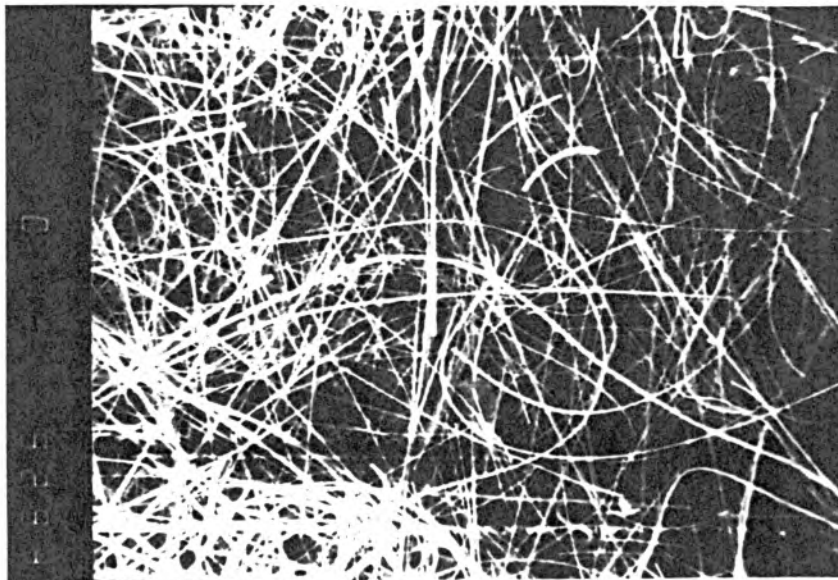
1000:1



2500:1

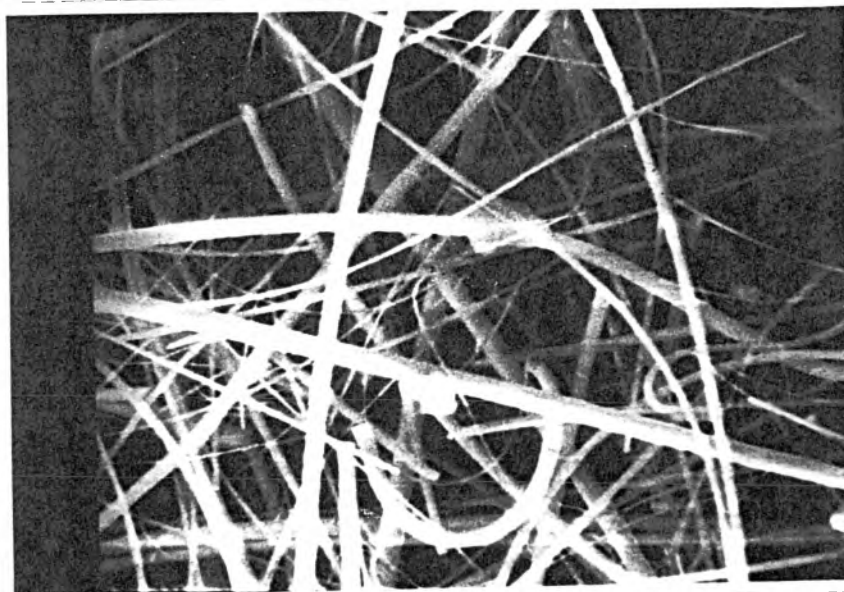


I PL/80/SP

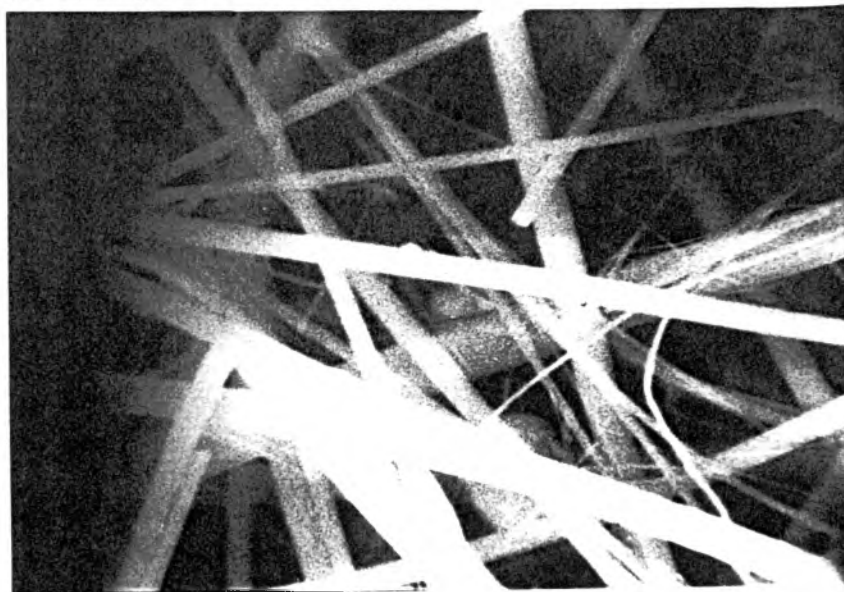


SKALA:

500:1



1000:1

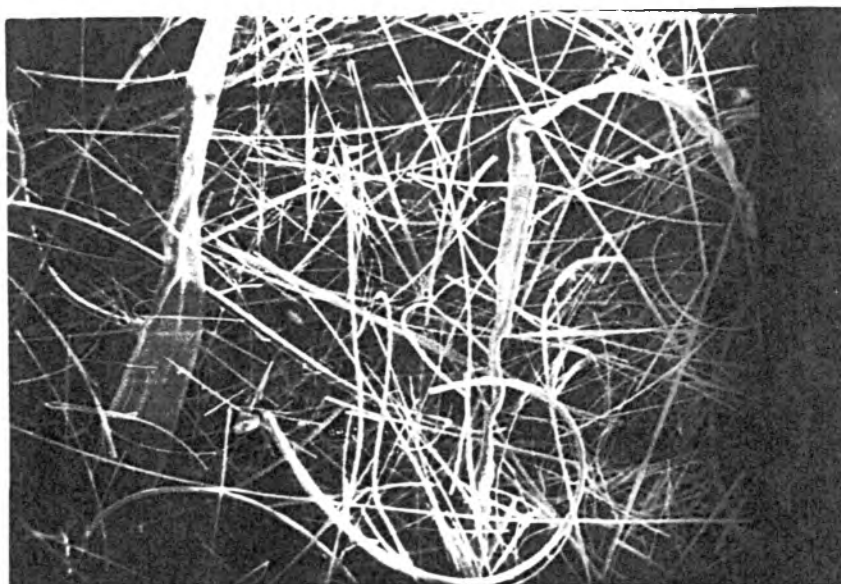


2500:1

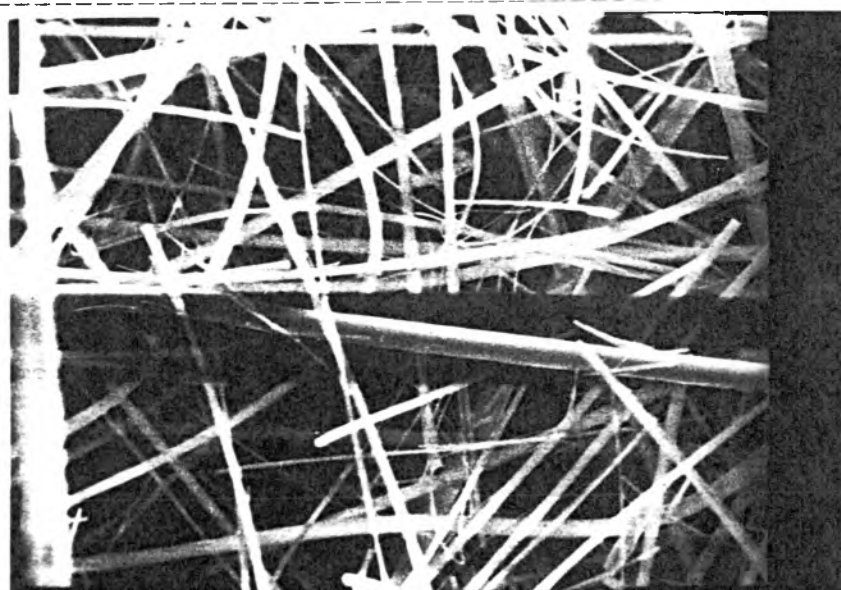
I PL/80/RK

SKALA:

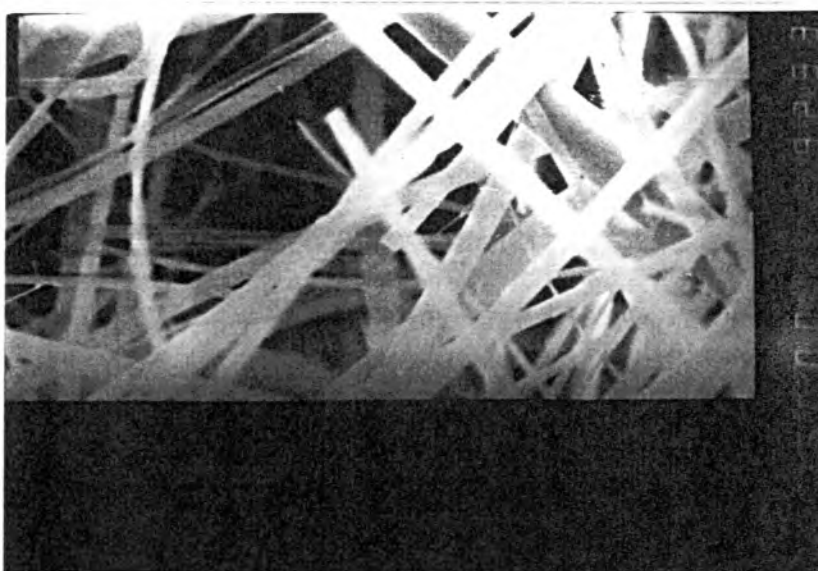
500:1



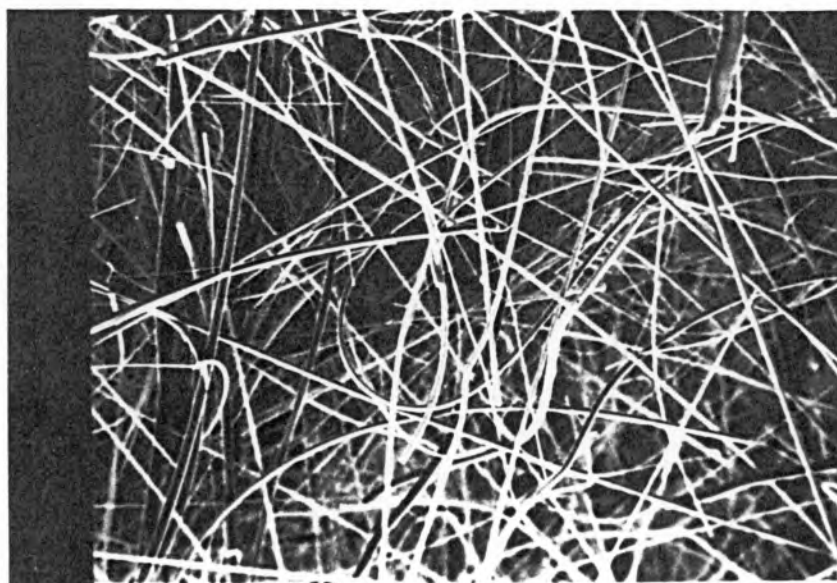
1000:1



2500:1



IS/60/SP

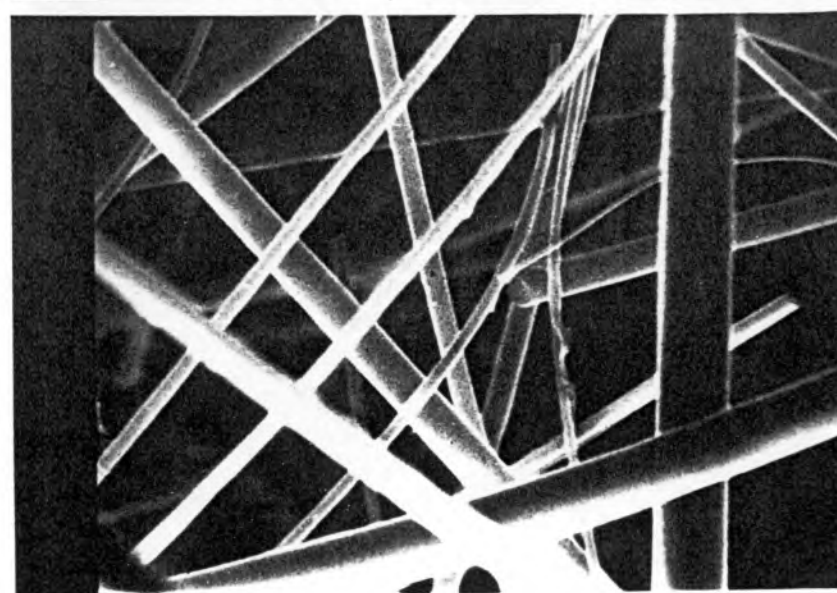


SKALA:

500:1



1000:1

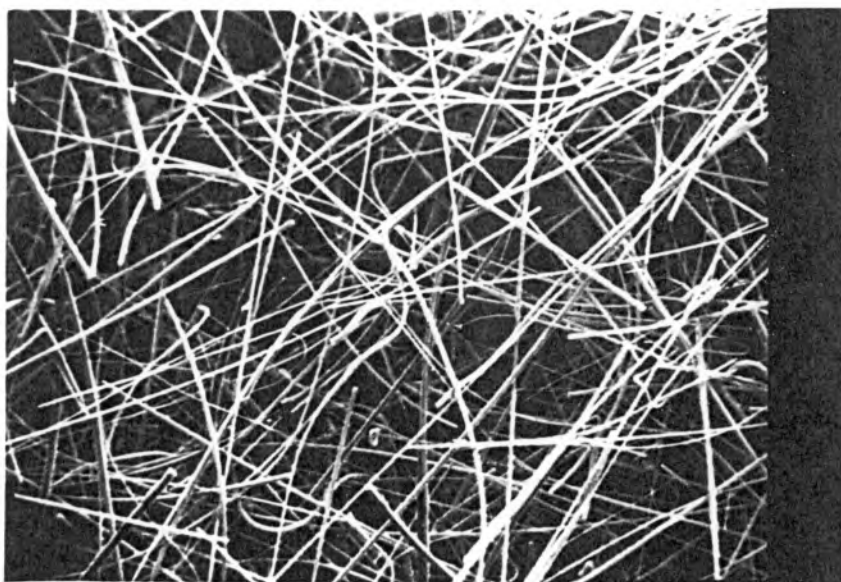


2500:1

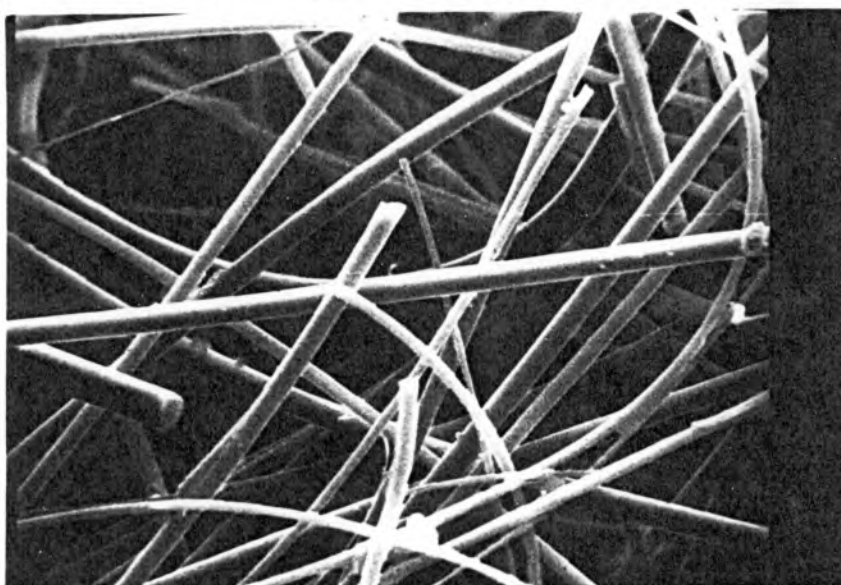
IS/60/RK

SKALA:

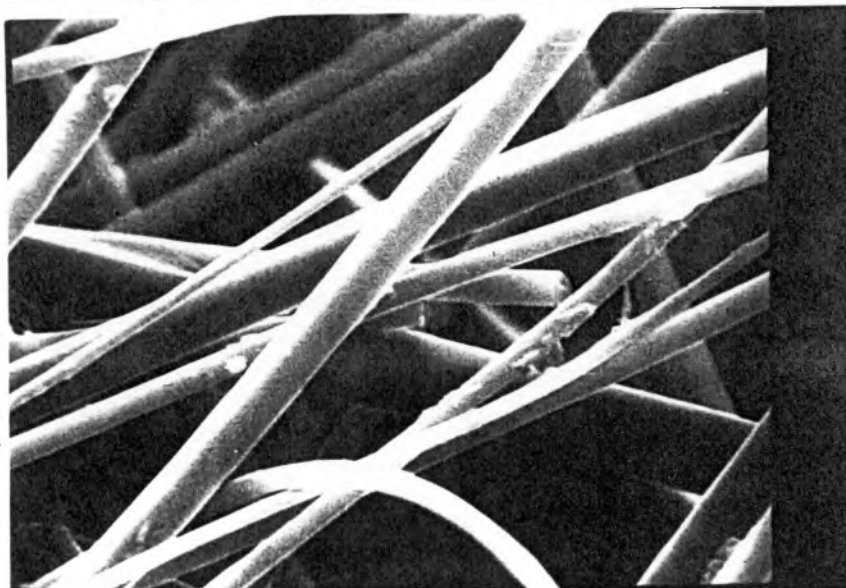
500:1



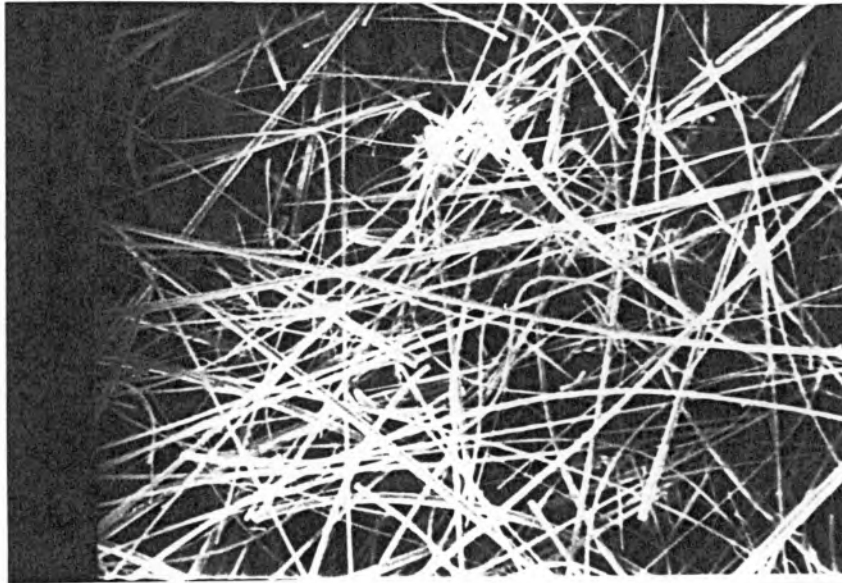
1000:1



2500:1

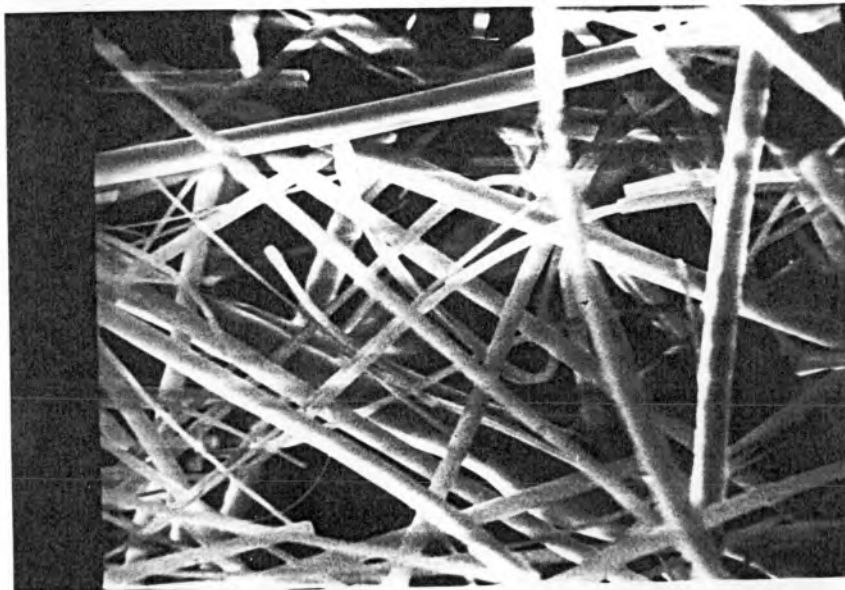


IS/80/SP

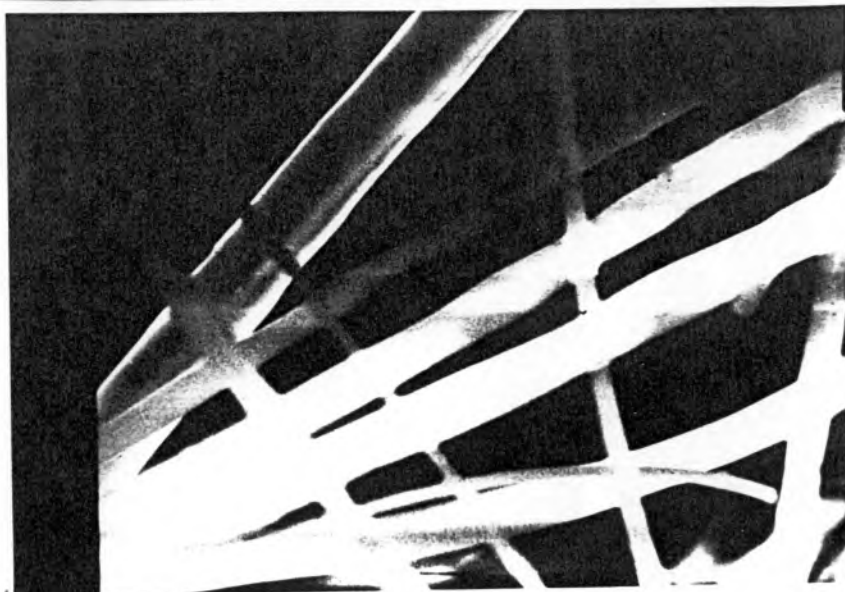


SKALA:

500:1



1000:1



2500:1

IS/80/RK

SKALA:

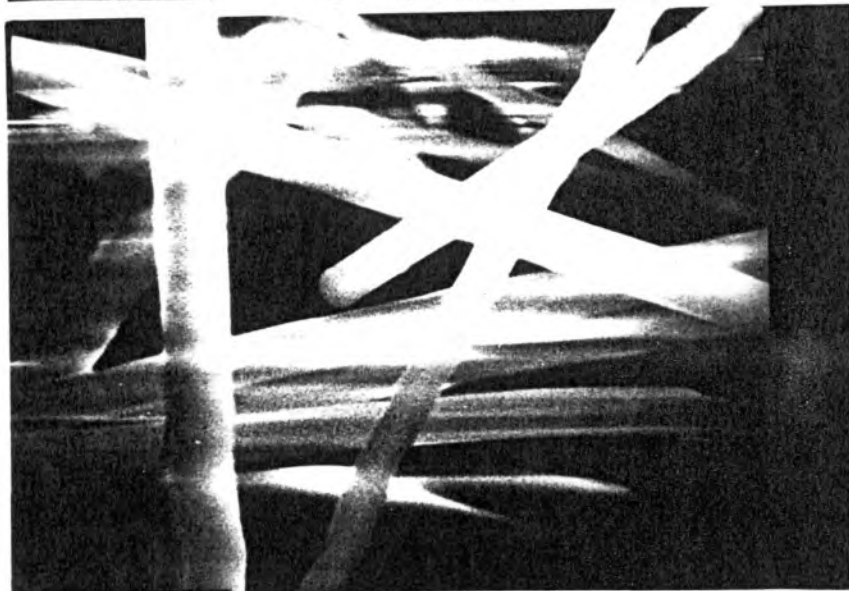
500:1



1000:1

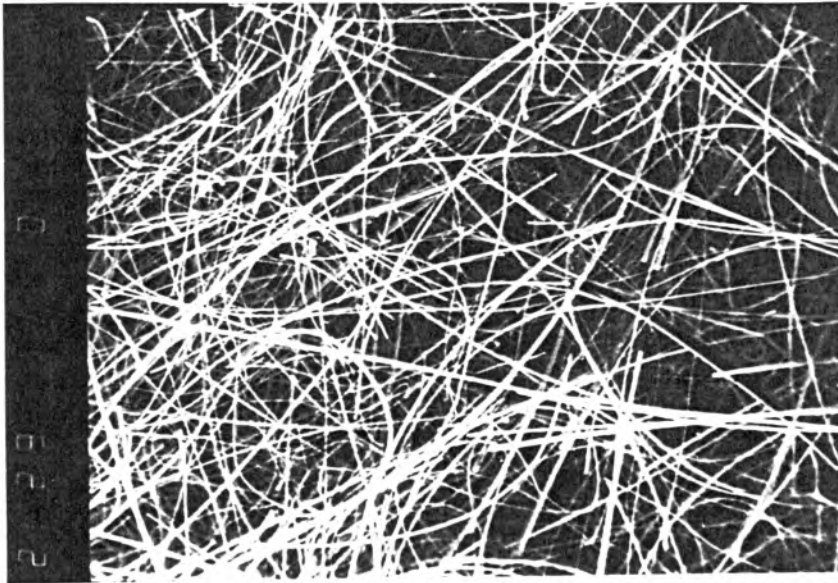


2500:1

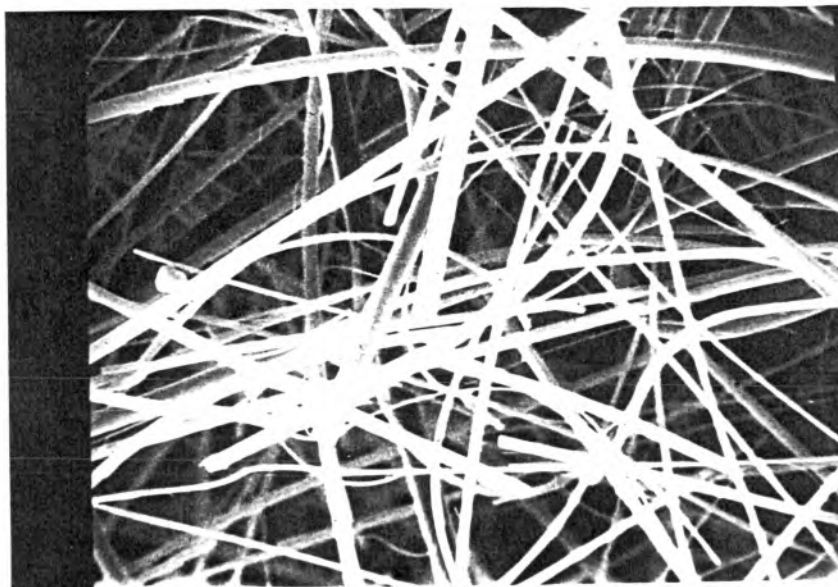


II PL/60/SP

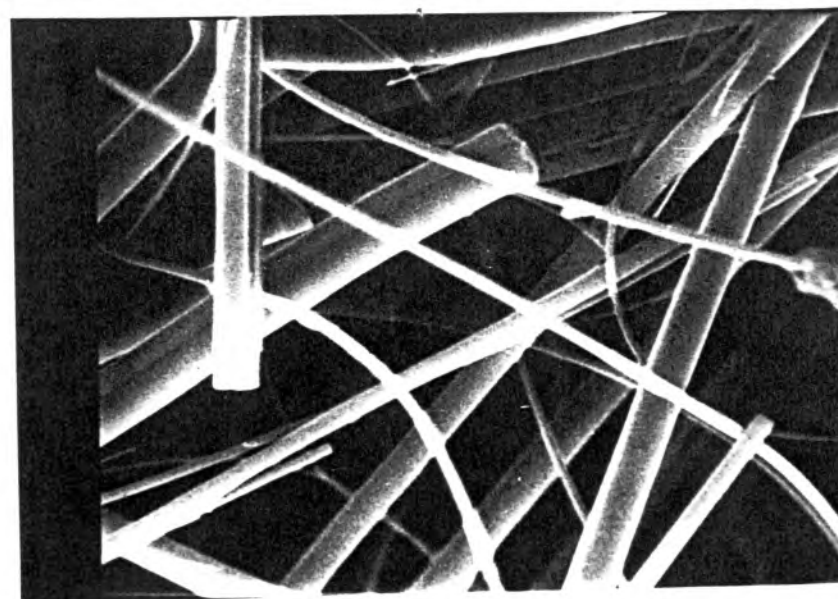
SKALA:



500:1



1000:1

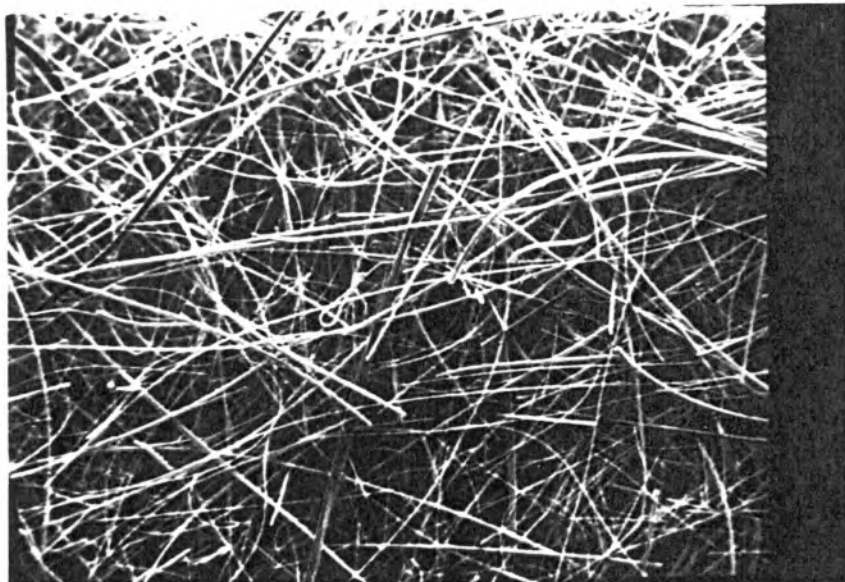


2500:1

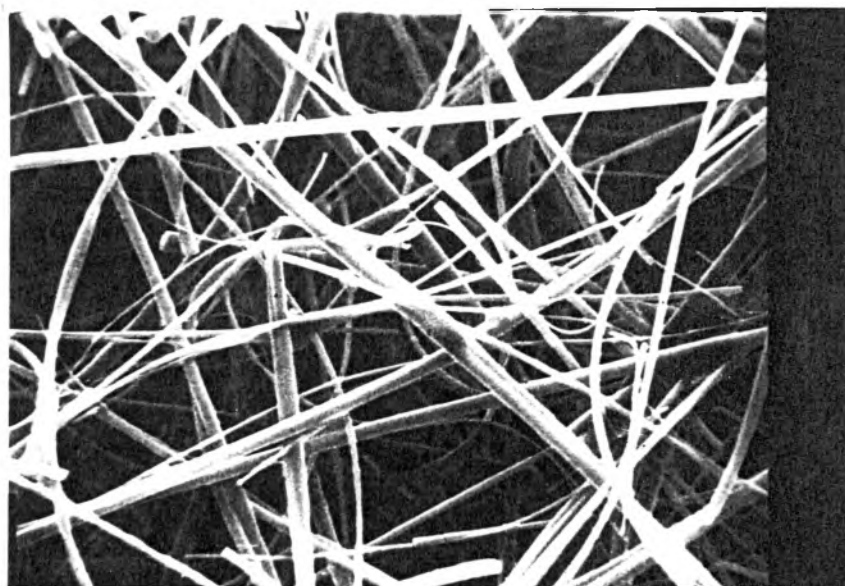
II PL/60/RK

SKALA:

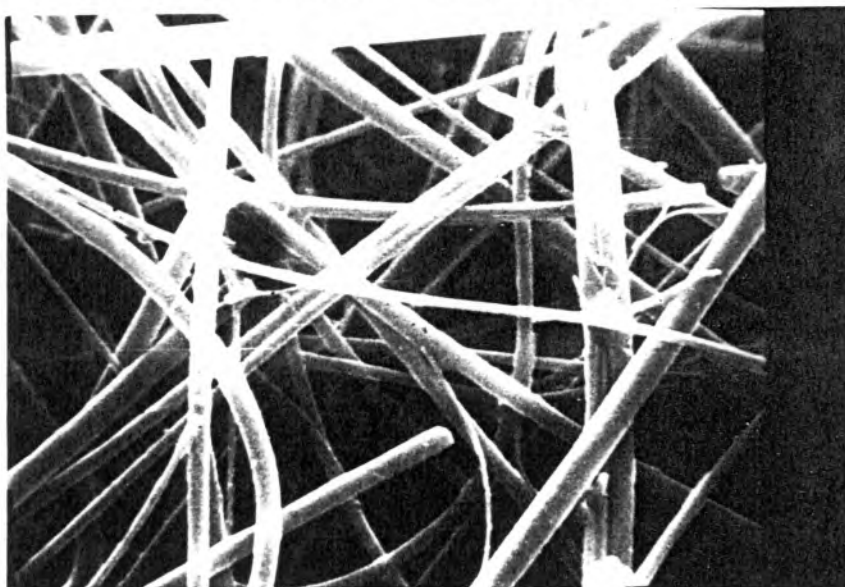
500:1



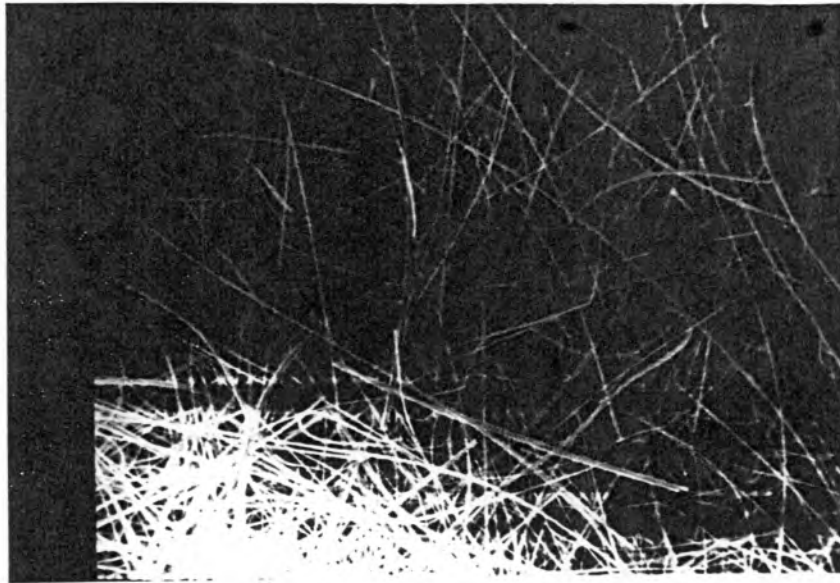
1000:1



2500:1

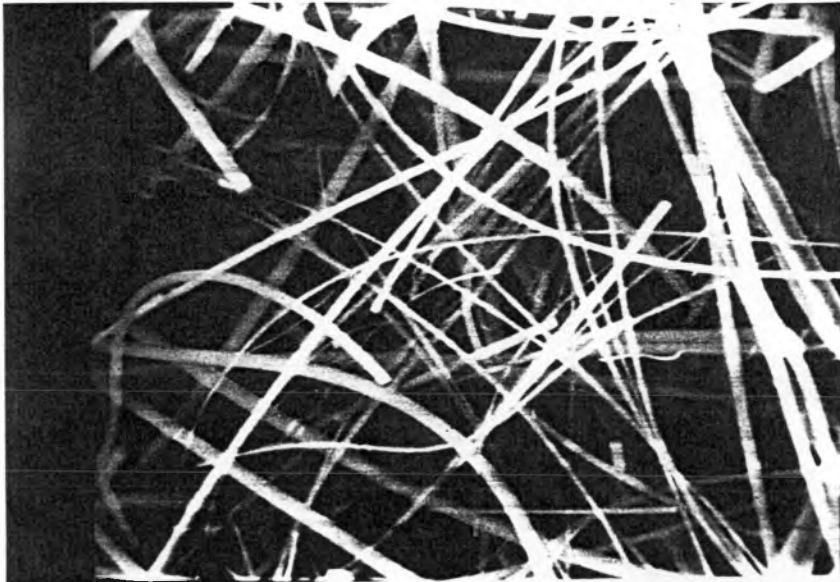


II PL/80/SP

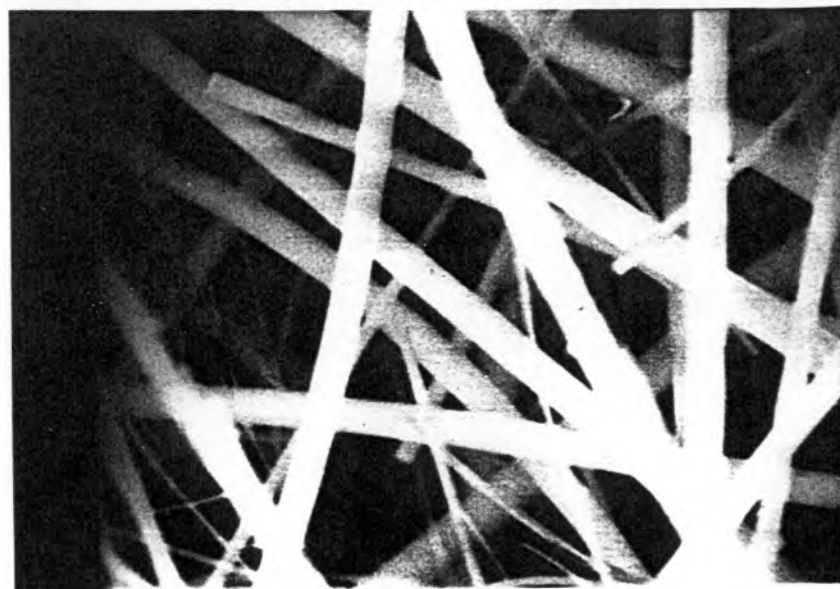


SKALA:

500:1



1000:1

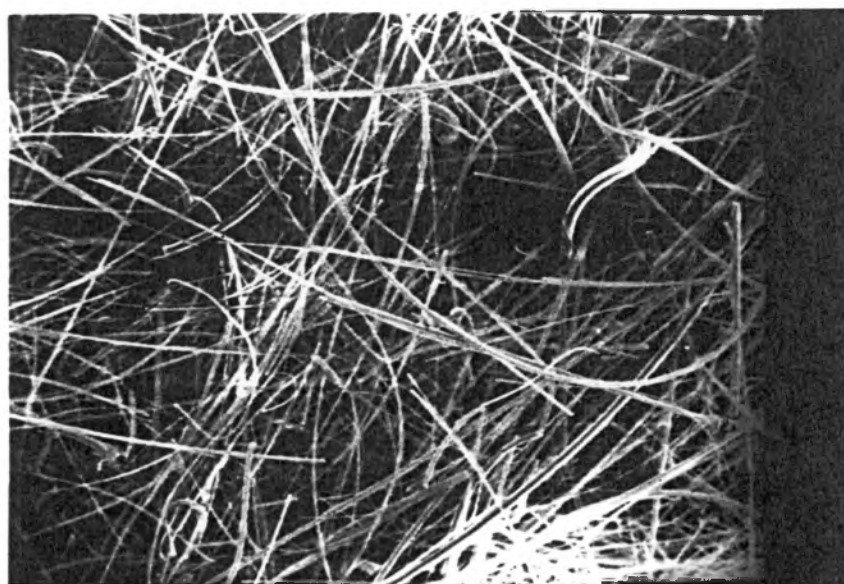


2500:1

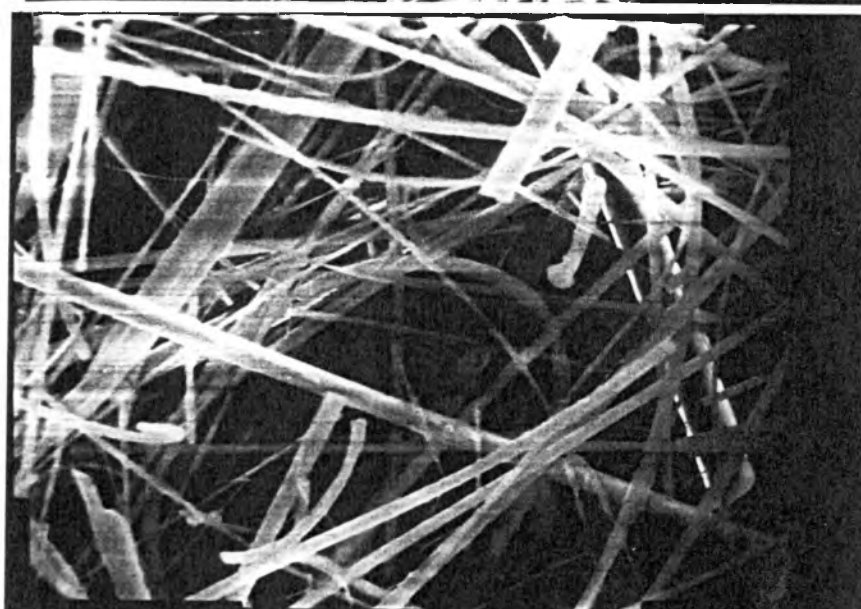
II PL/80/RK

SKALA:

500:1



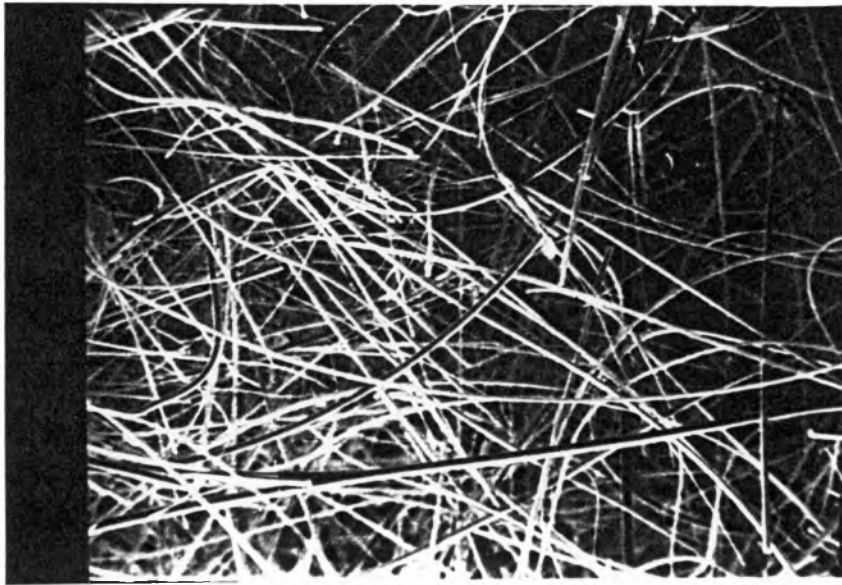
1000:1



2500:1

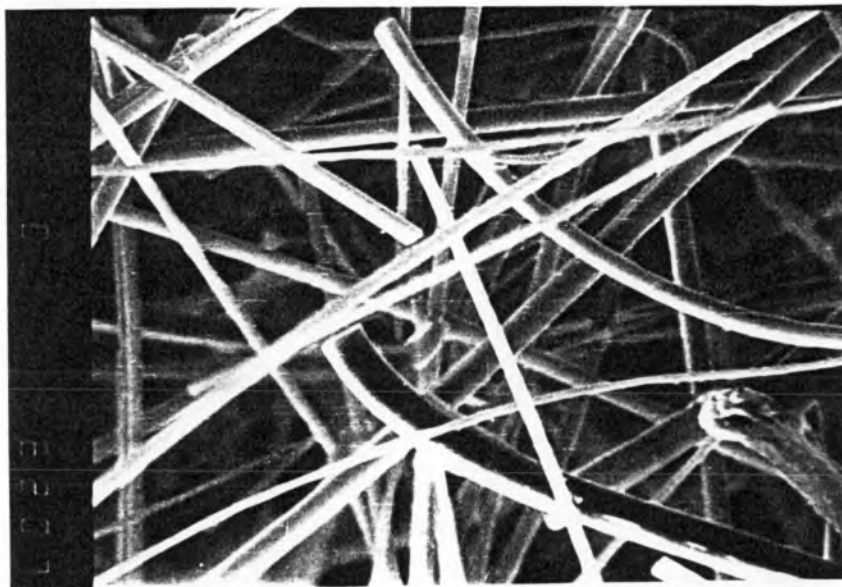


II S/60/SP

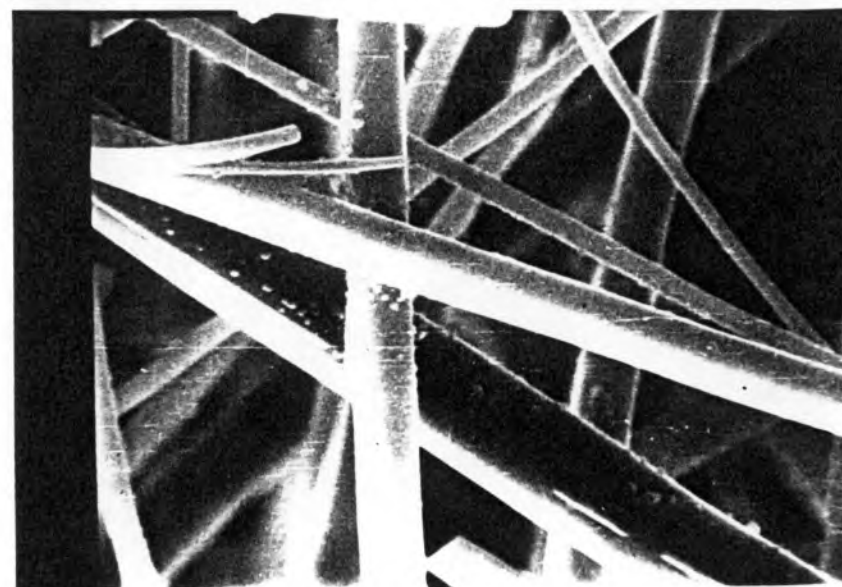


SKALA:

500:1



1000:1

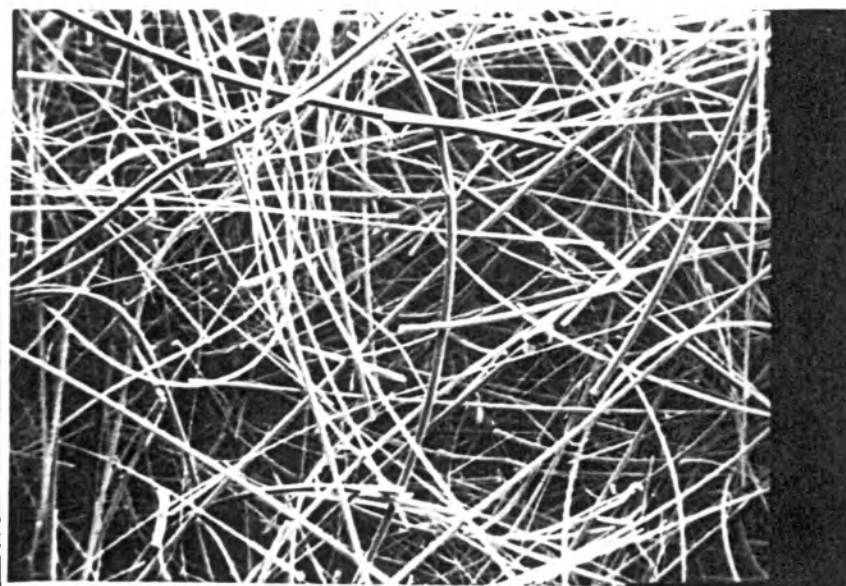


2500:1

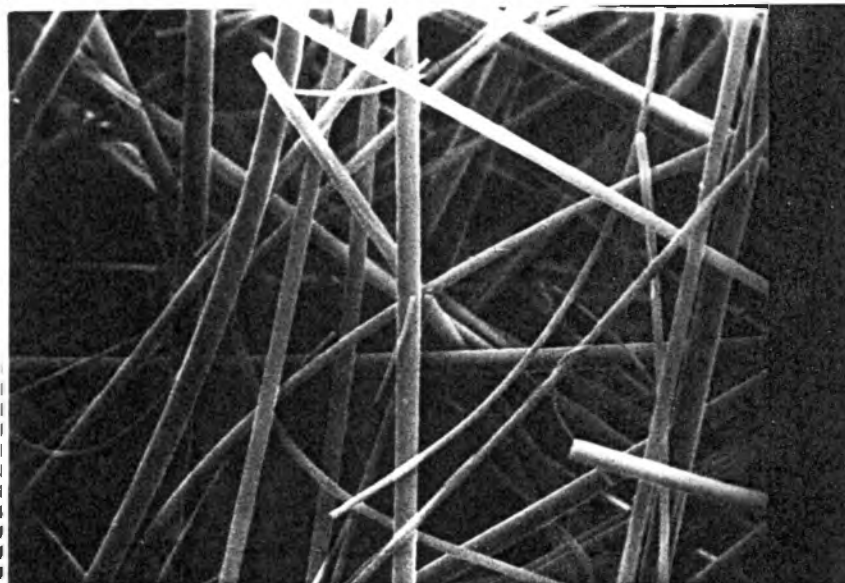
II S/60/RK

SKALA:

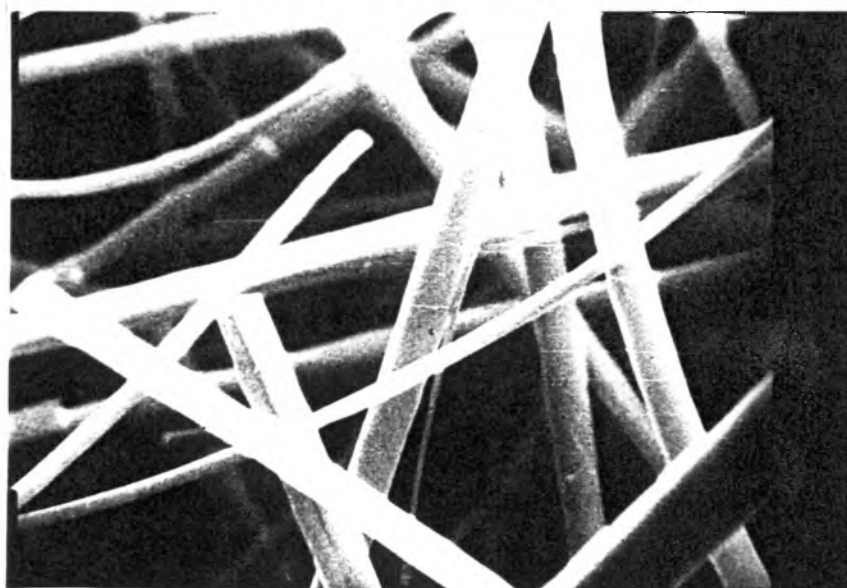
500:1



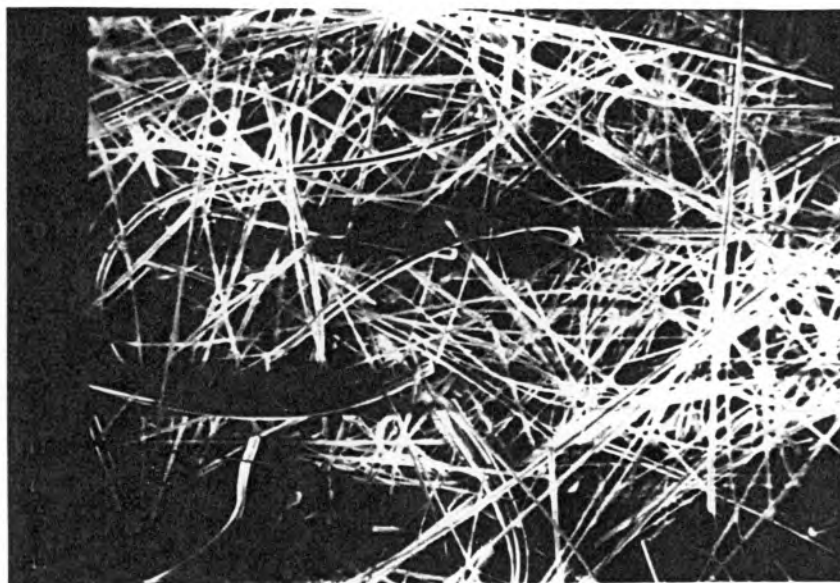
1000:1



2500:1

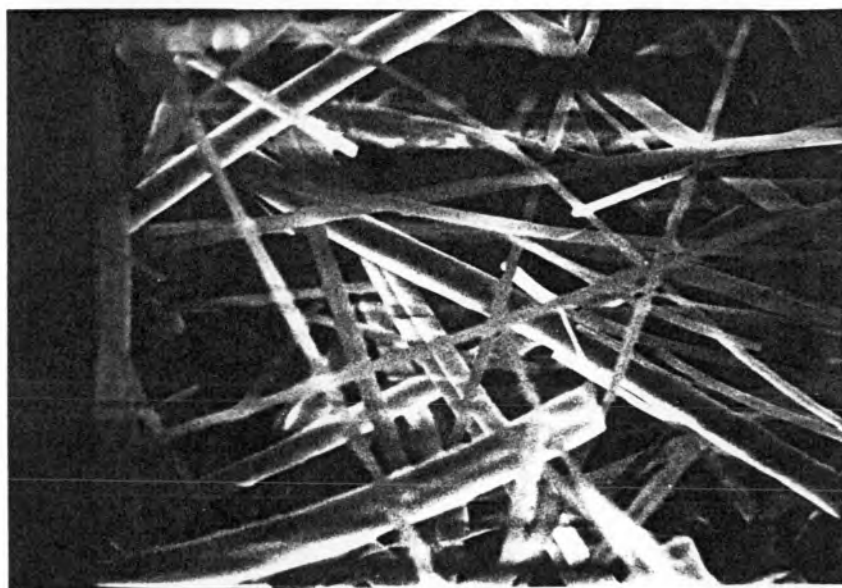


II S/80/SP

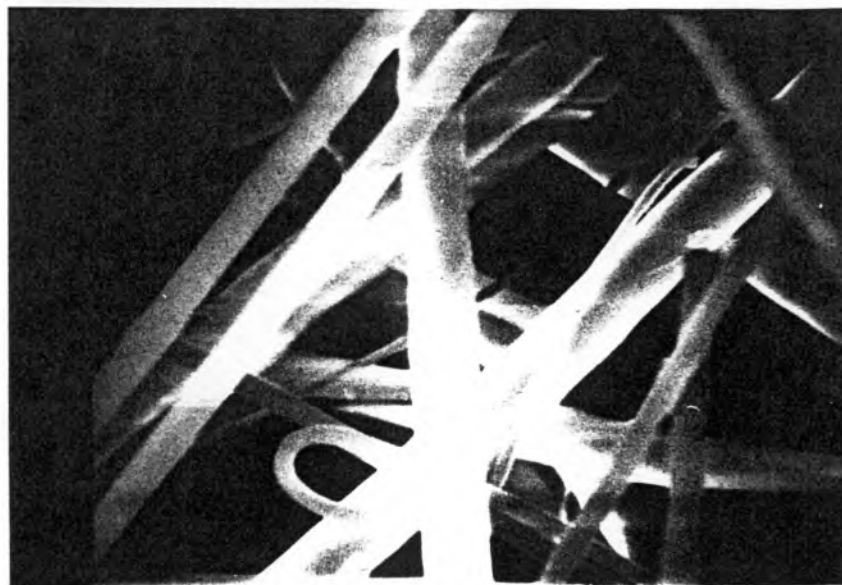


SKALA:

500:1



1000:1

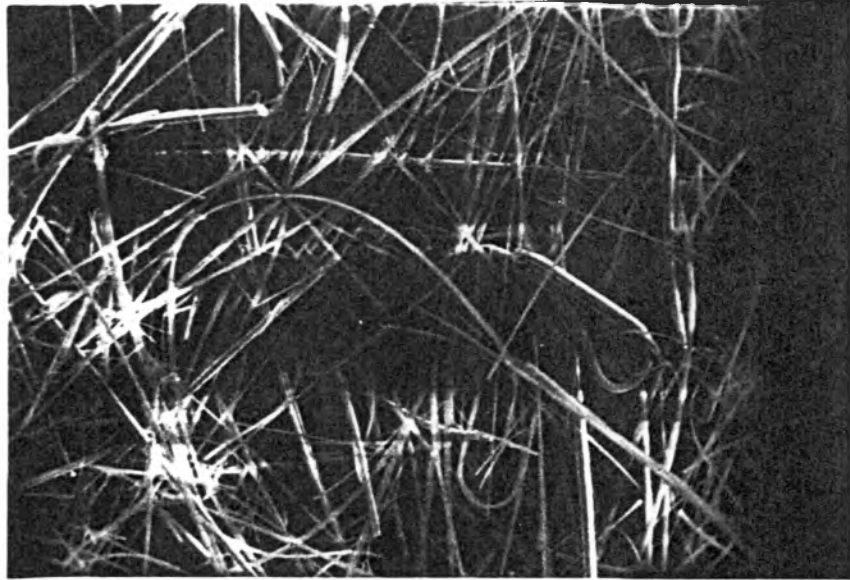


2500:1

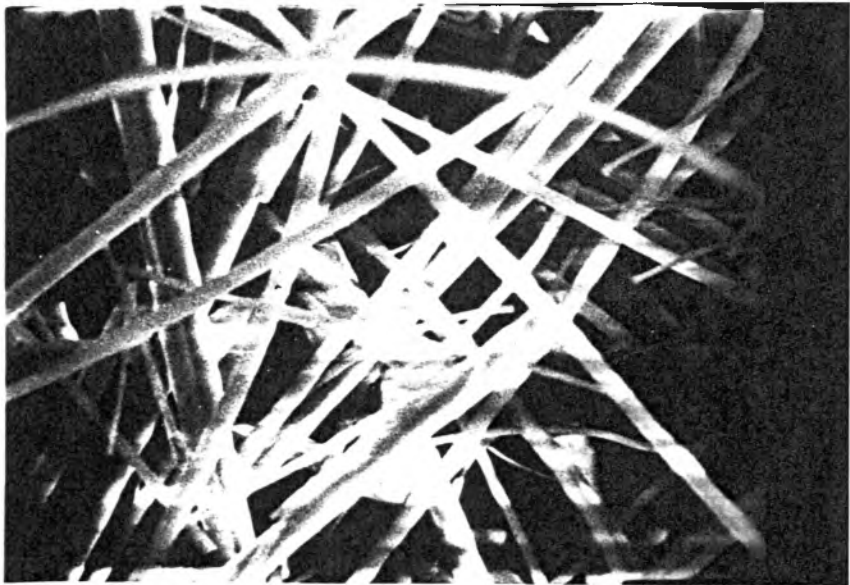
II S/80/RK

SKALA:

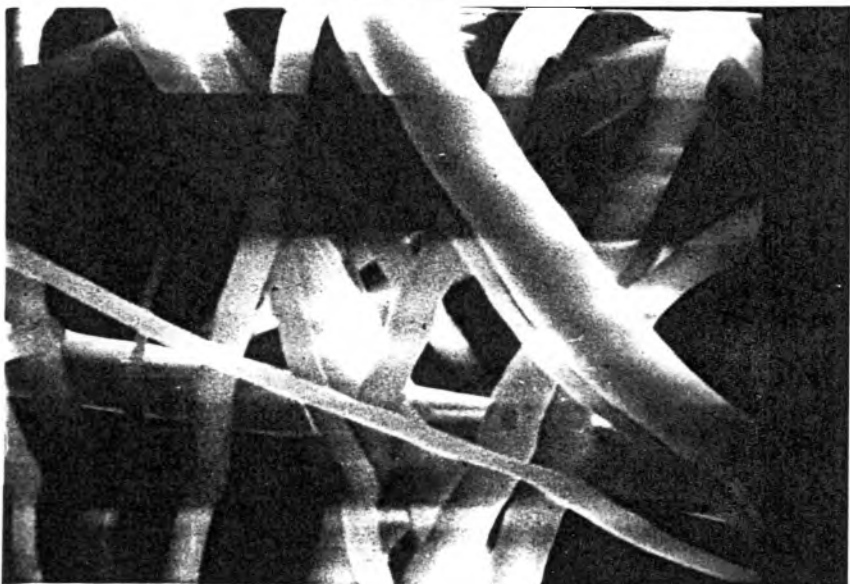
500:1



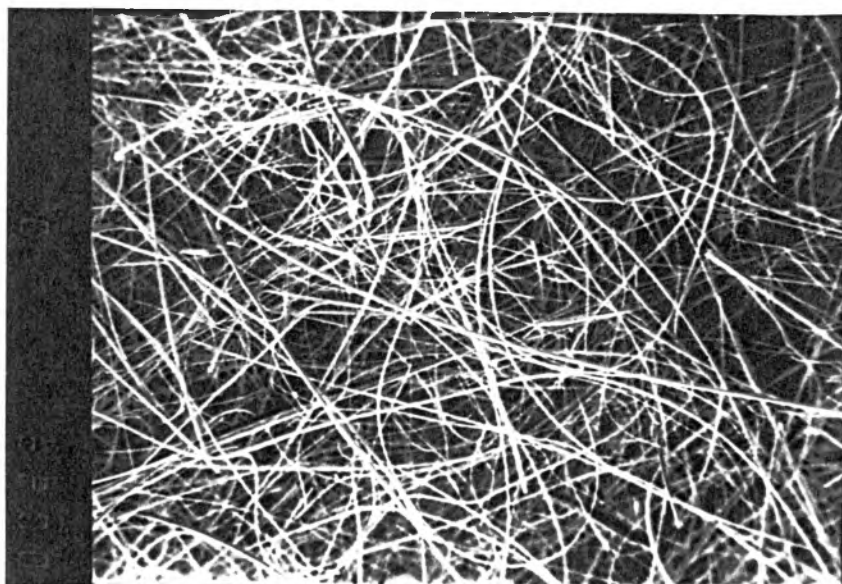
1000:1



2500:1

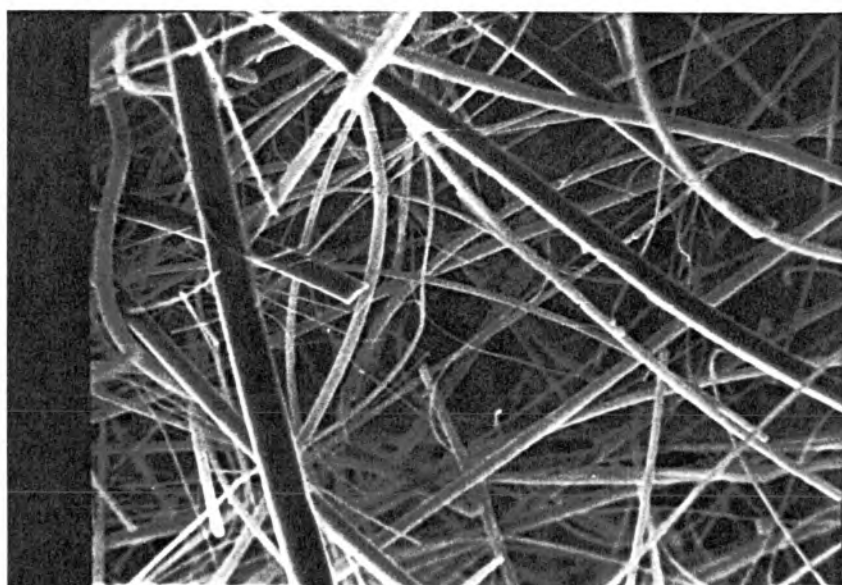


III PL/60/SP

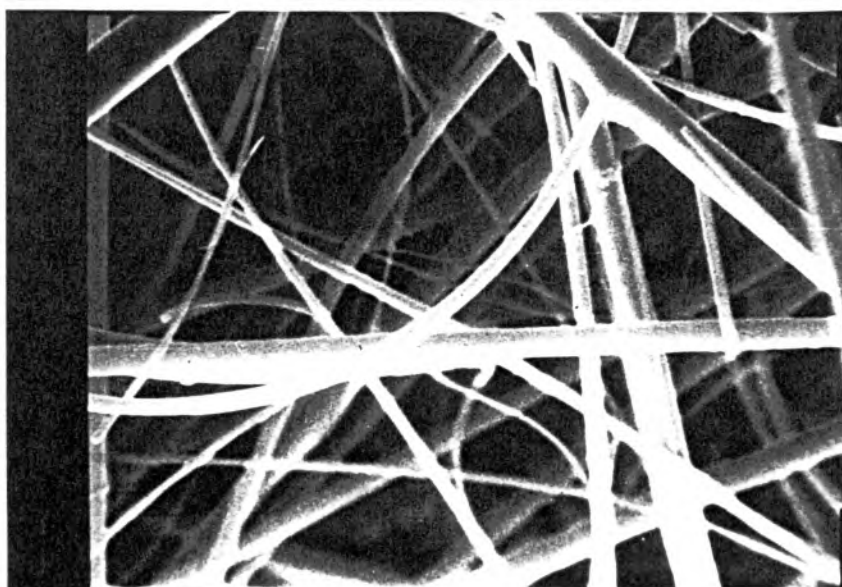


SKALA:

500:1



1000:1

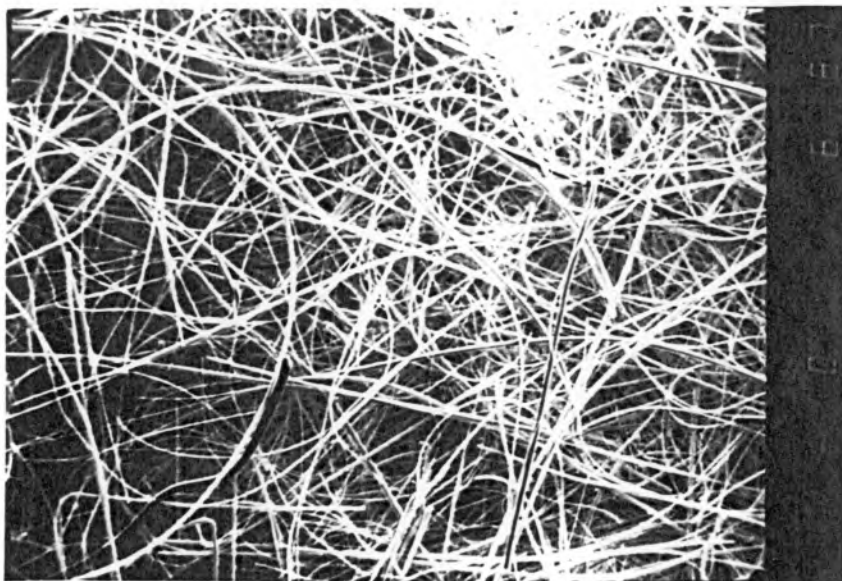


2500:1

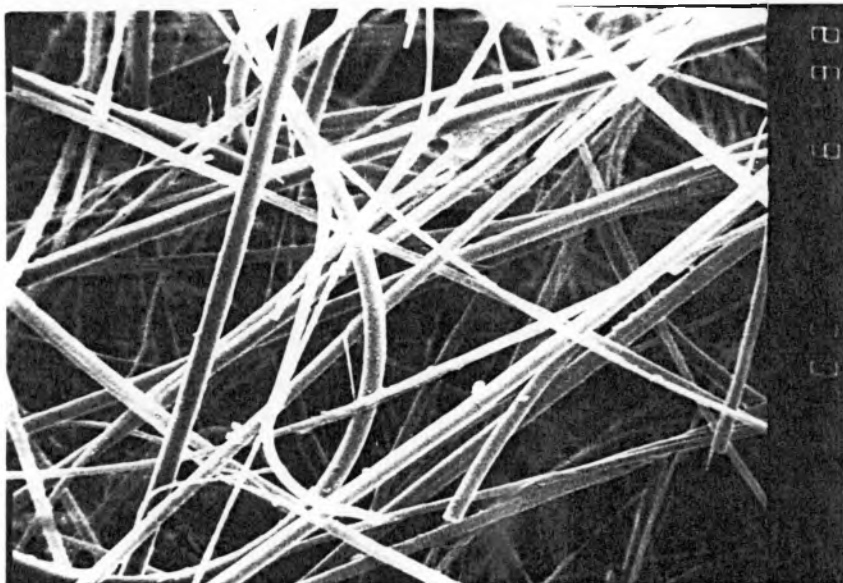
III PL/60/RK

SKALA:

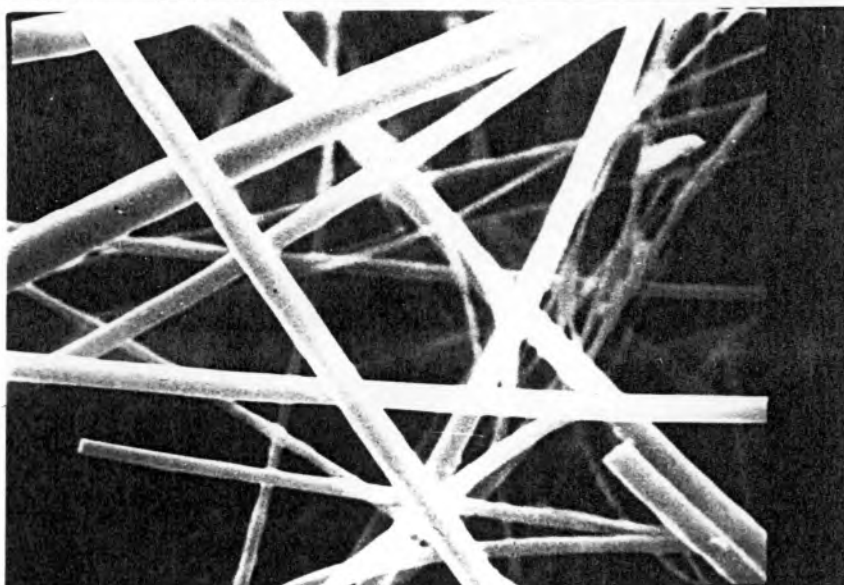
500:1



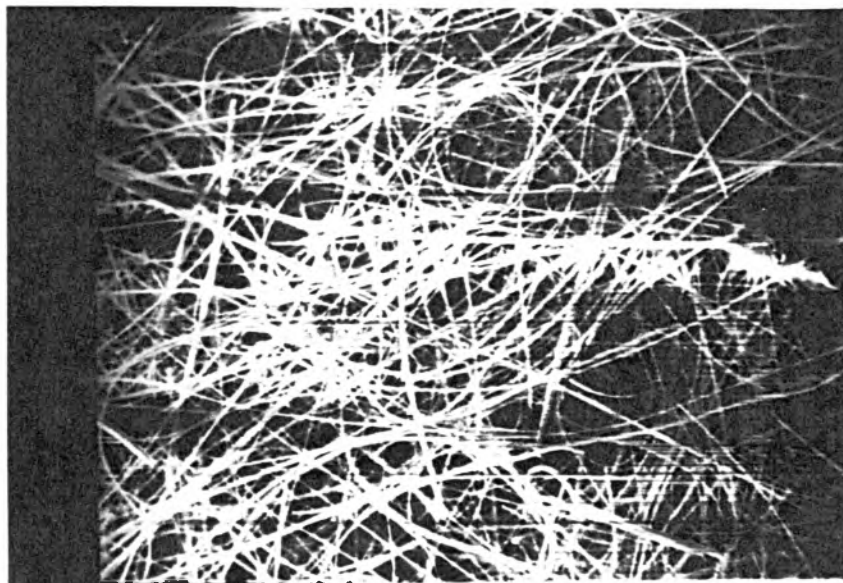
1000:1



2500:1

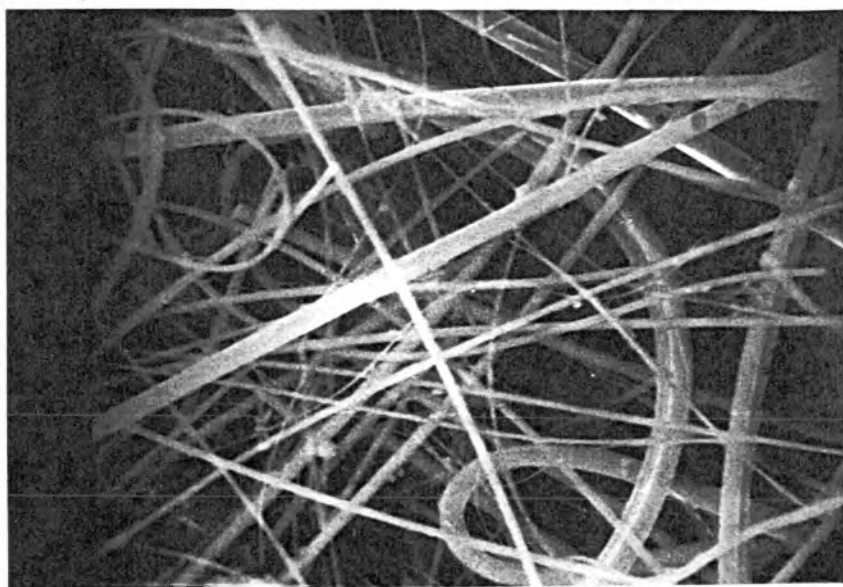


III PL/80/SP

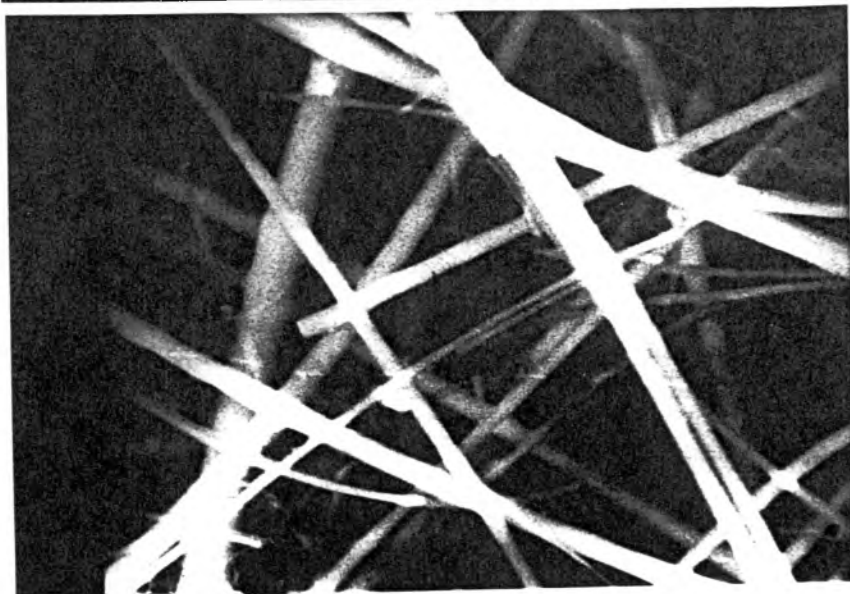


SKALA:

500:1



1000:1

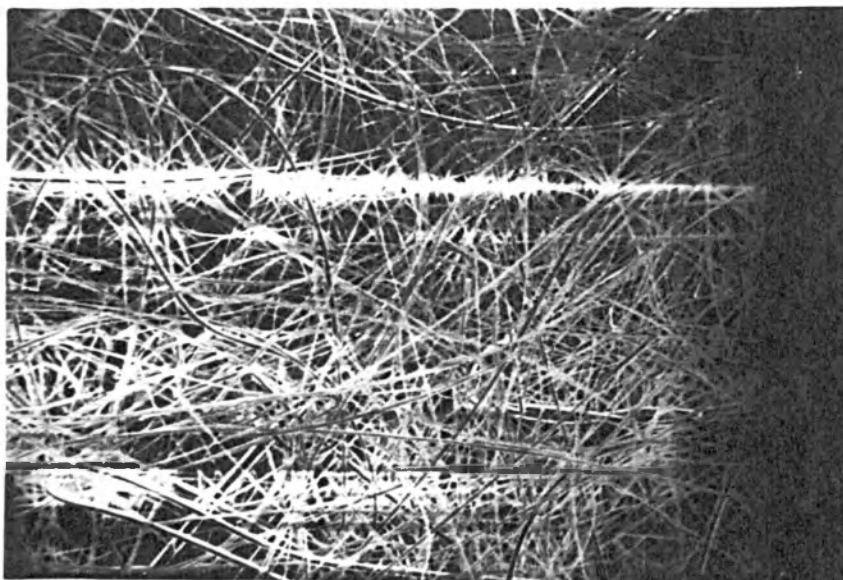


2500:1

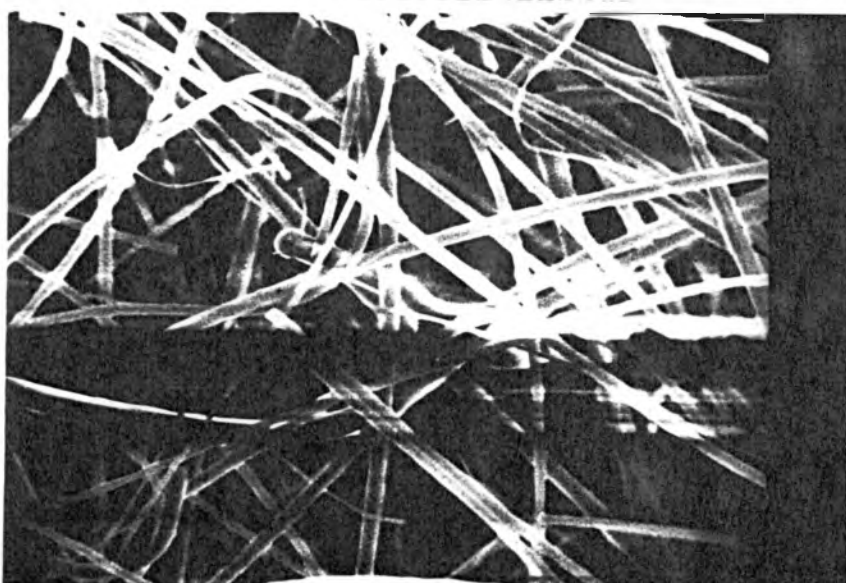
III PL/80/RK

SKALA:

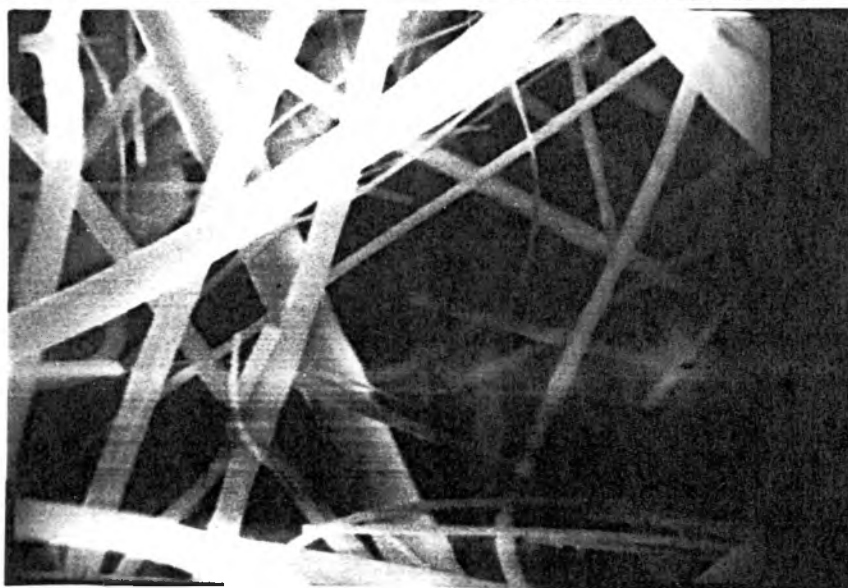
500:1



1000:1



2500:1

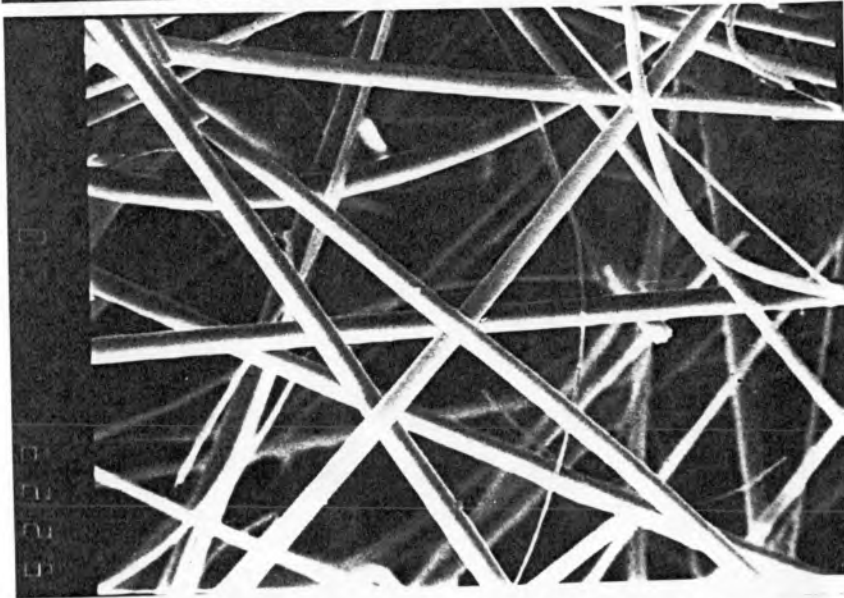


III S/60/SP

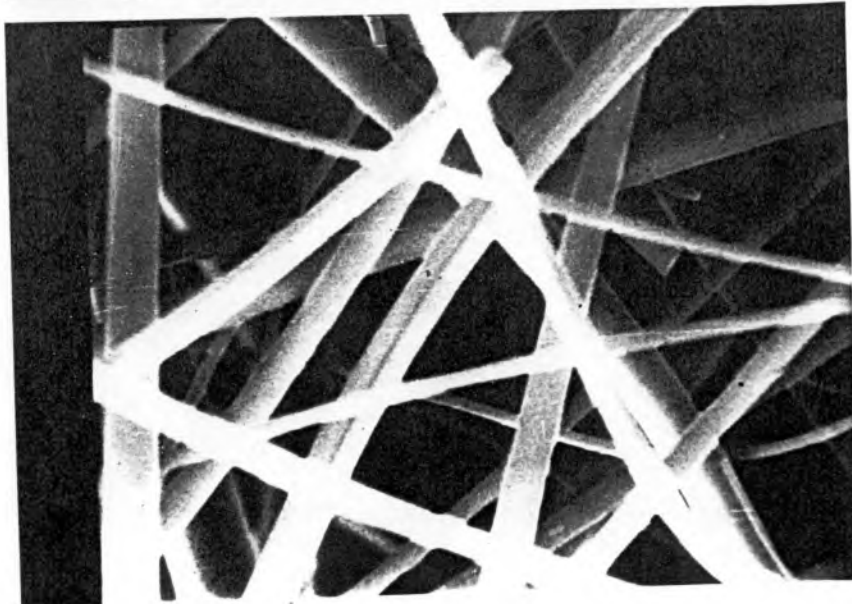


SKALA:

500:1



1000:1

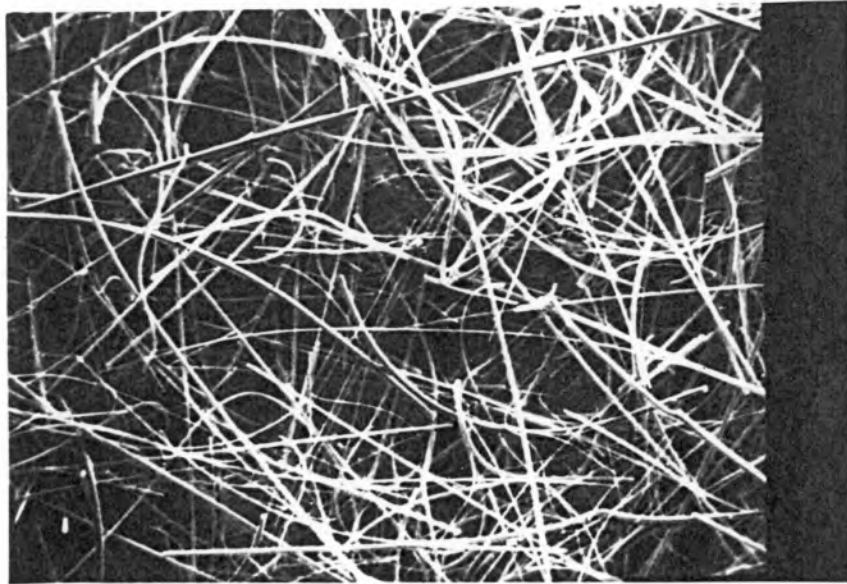


2500:1

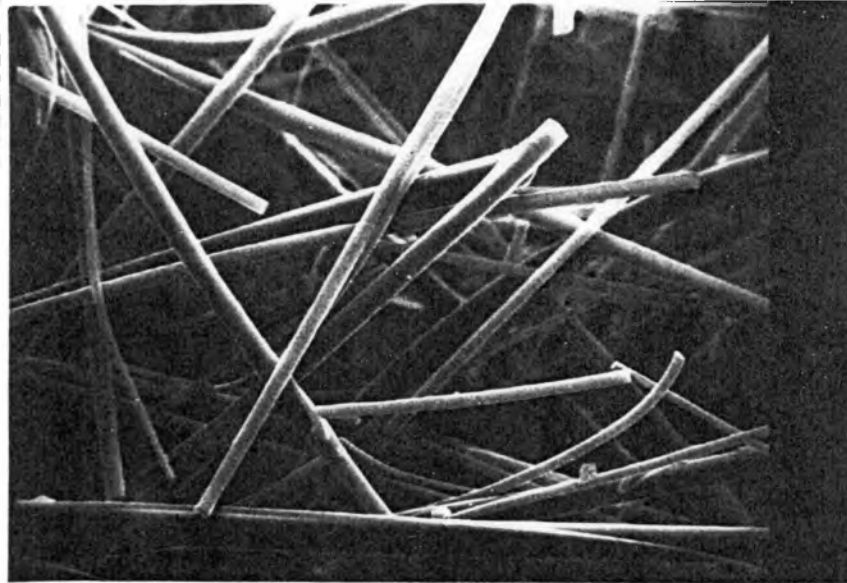
III S/60/RK

SKALA:

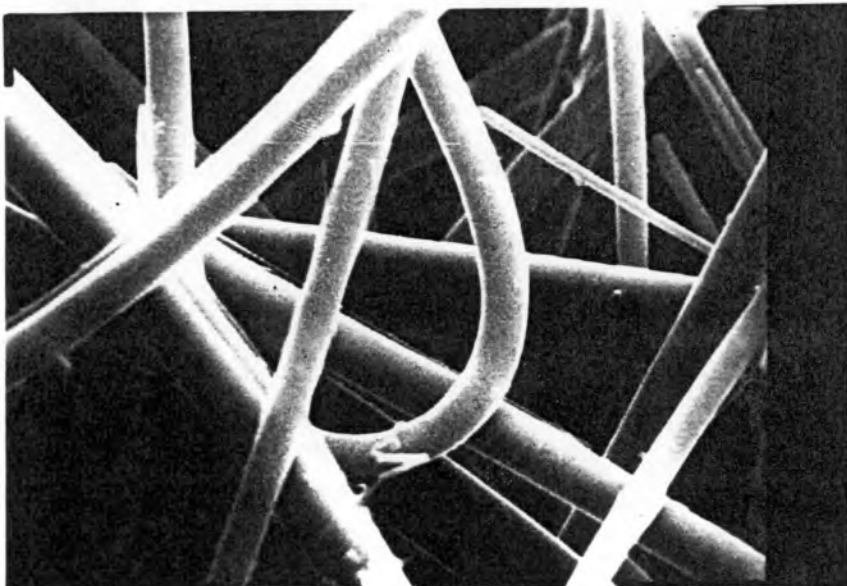
500:1



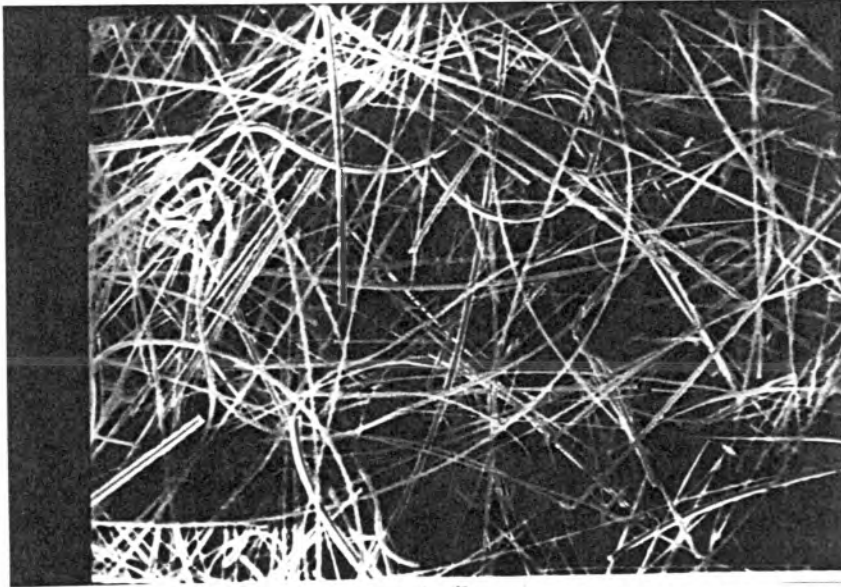
1000:1



2500:1

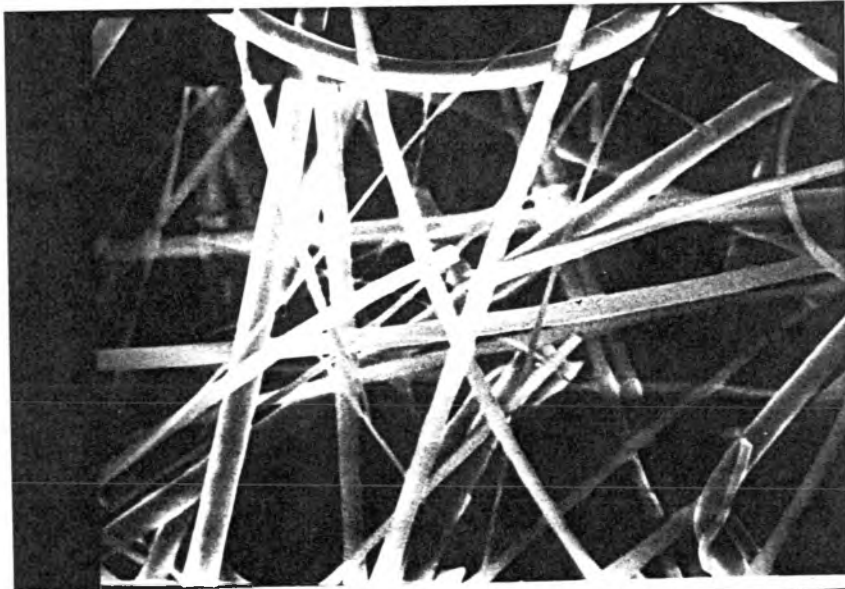


III S/80/SP

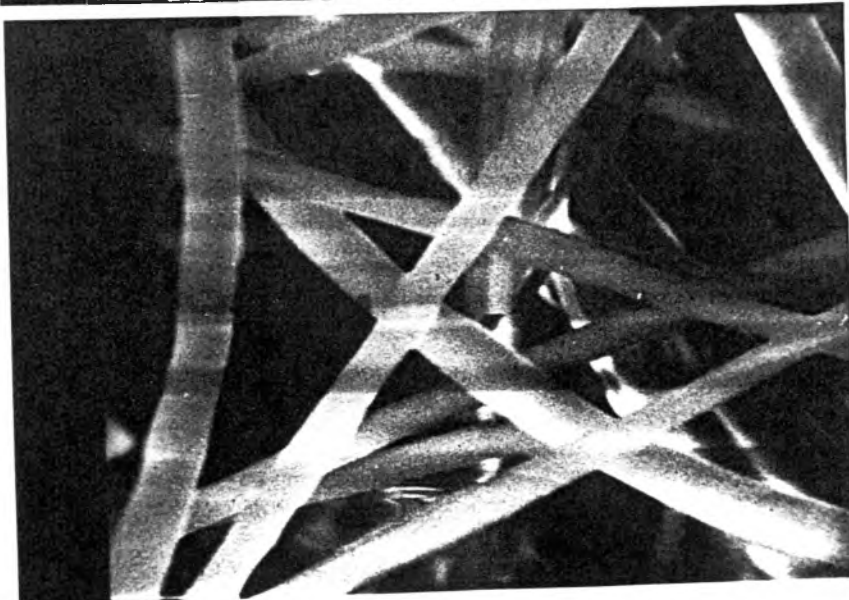


SKALA:

500:1



1000:1

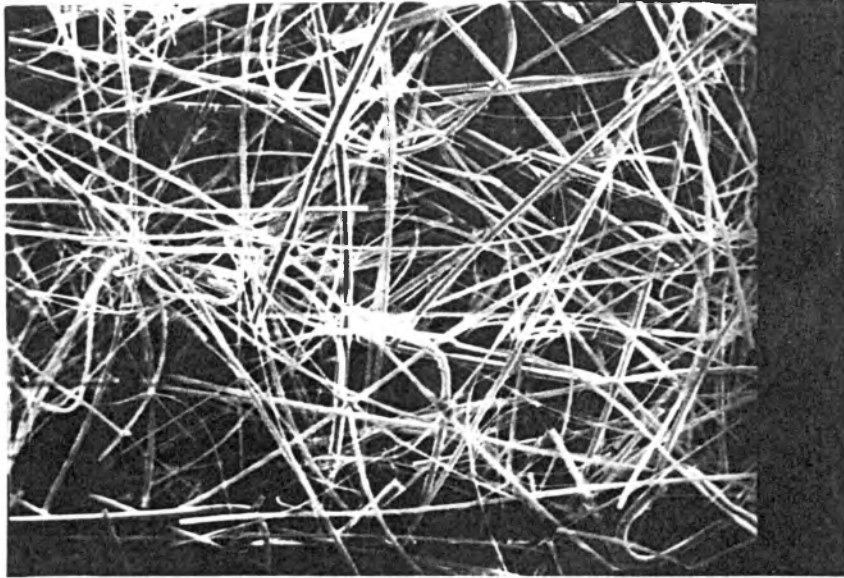


2500:1

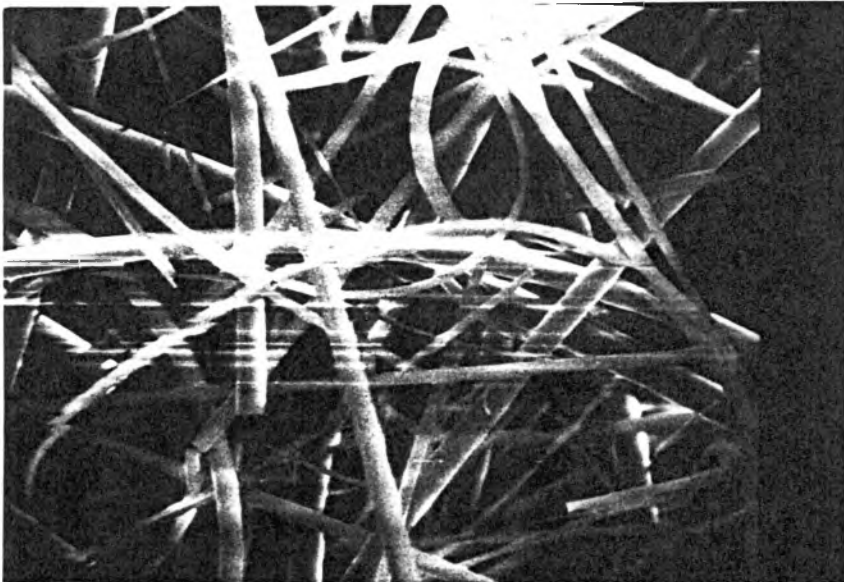
III S/80/RK

SKALA:

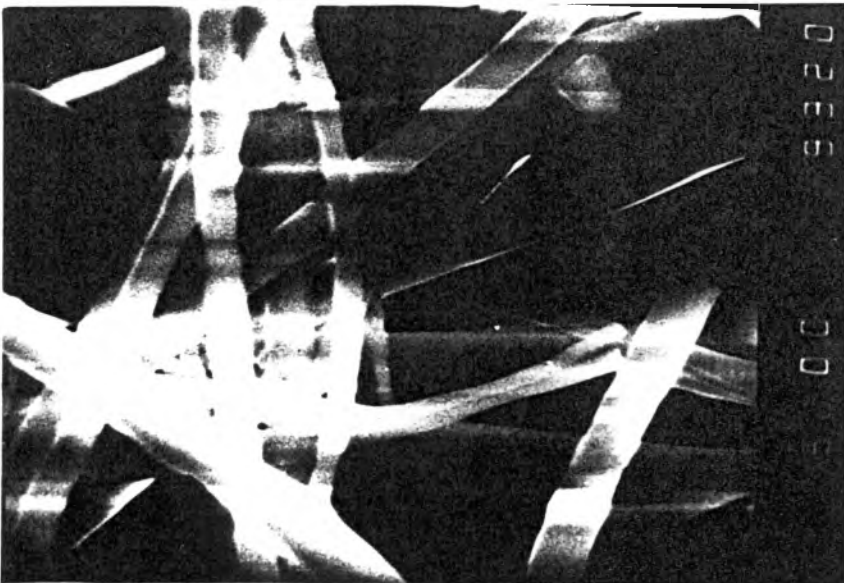
500:1



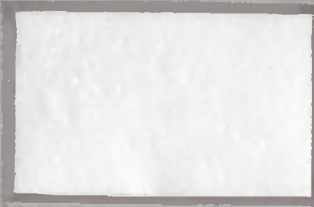
1000:1



2500:1







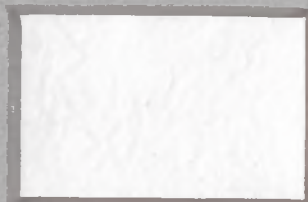
I PL/60/SP



I PL/80/SP



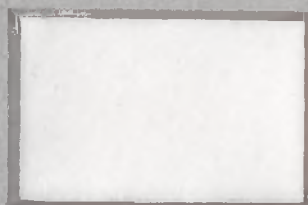
I PL/60/RK



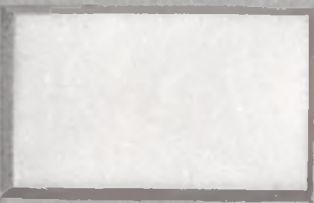
I PL/80/RK



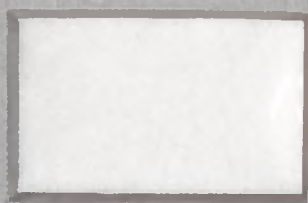
I S/60/SP



I S/80/SP

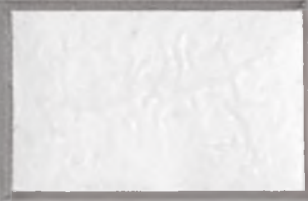


I S/60/RK

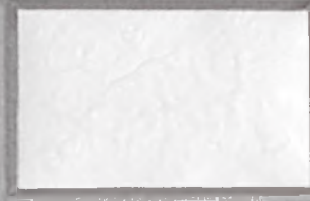


I S/80/RK

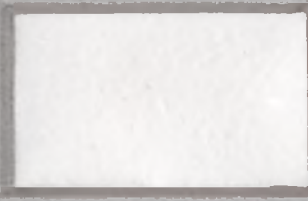




II PL/60/SP



II PL/80/SP



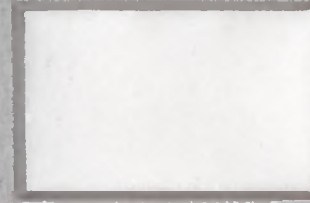
II PL/60/RK



II PL/80/RK



II S/60/SP



II S/80/SP

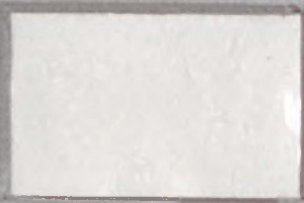


II S/60/RK

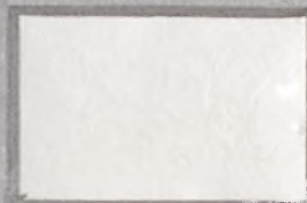


II S/80/RK

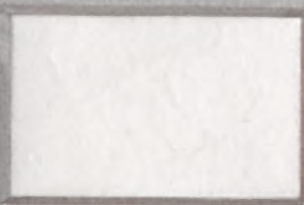




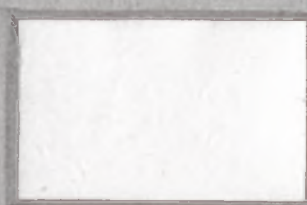
III PL/60/SP



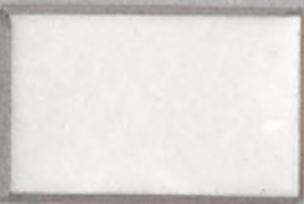
III PL/80/SP



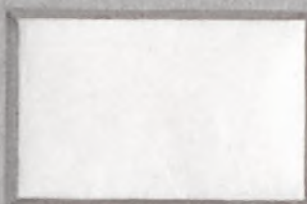
III PL/60/RK



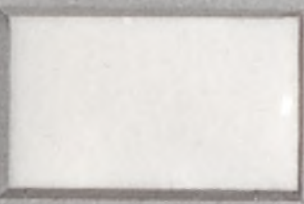
III PL/80/RK



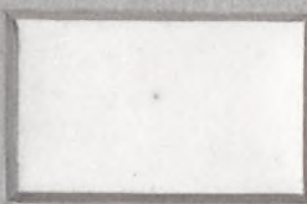
III S/60/SP



III S/80/SP



III S/60/RK



III S/80/RK

