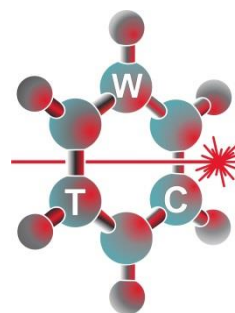




**LABORATORIUM
OCHRONA PRZED SKAŻENIAMI**



INSTRUKCJA DO ĆWICZENIA LABORATORYJNEGO

**BADANIE PENETRACJI TESTOWEGO AEROZOLU
PRZEZ WYSOKOSKUTECZNE FILTRY POWIETRZA
KLASY HEPA I ULPA**

Zakład Radiometrii i Monitoringu Skazań



OGÓLNE WARUNKI BEZPIECZEŃSTWA W LABORATORIUM

- 1. Zakład Ochrony Dróg Oddechowych Wojskowego Instytutu Chemii i Radiometrii jest akredytowanym laboratorium prowadzącym badania w dziedzinie indywidualnych i zbiorowych środków ochrony przed skażeniami.**
- 2. Przed wejściem do laboratorium, studenci pozostawiają wierzchnie okrycia oraz teczki w wyznaczonym miejscu.**
- 3. Przed rozpoczęciem zajęć należy zapoznać się z instrukcją przeciwpożarową znajdującą się w pomieszczeniu laboratoryjnym.**
- 4. Do pomieszczenia laboratoryjnego, studenci mogą wносить wyłącznie instrukcje do ćwiczeń laboratoryjnych, notatniki, kalkulatory oraz przybory do pisanie.**
- 5. Z pomieszczeń laboratorium zabrania się wynoszenia lub przestawiania jakiegokolwiek aparatury lub wyposażenia.**
- 6. W pomieszczeniach laboratoryjnych zabrania się używać otwartych źródeł ognia, palenia tytoniu i spożywania posiłków.**
- 7. Wszystkie prace związane z uruchomieniem aparatury i oprzyrządowania stanowiska do badań można wykonywać jedynie pod nadzorem prowadzącego zajęcia.**
- 8. W czasie ćwiczenia, bez zezwolenia prowadzącego, nie wolno przemieszczać się na inne stanowiska badawcze lub do innych pomieszczeń laboratorium.**
- 9. Włączanie/wyłączanie aparatury oraz obsługiwanie się nią może odbywać się dopiero po dokładnym zapoznaniu się z instrukcją stanowiskową, procedurą badawczą oraz instrukcjami obsługi aparatury.**
- 10. Każde nieprzewidziane wydarzenie (praca z wodorem), wypadek oraz skaleczenie powinno być natychmiast zgłoszone prowadzącemu zajęcia.**
- 11. Ćwiczenie laboratoryjne uważa się za zakończone, jeżeli prowadzący podpisze protokół z badań.**

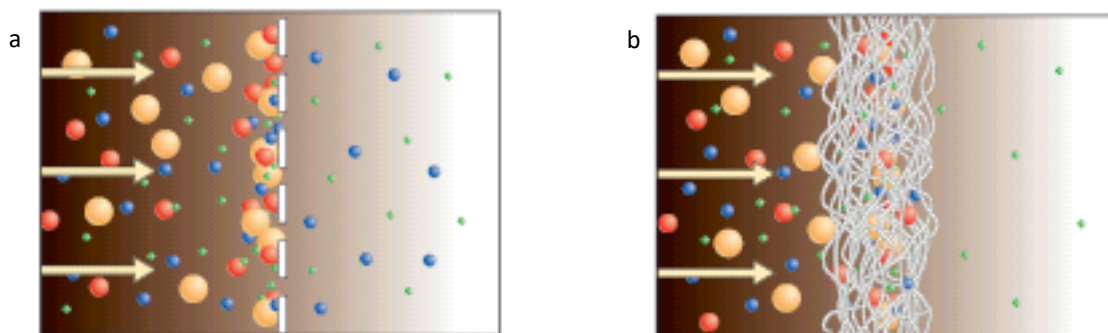
1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia laboratoryjnego jest wyznaczenie penetracji (skuteczności filtracji) wysokoskutecznych (klasy HEPA i ULPA) materiałów filtracyjnych, filtrów lub filtropochłaniaczy stosowanych w indywidualnej i zbiorowej ochronie dróg oddechowych względem testowego aerozolu opartego o olej DEHS.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

Filtracja zapyłonego gazu

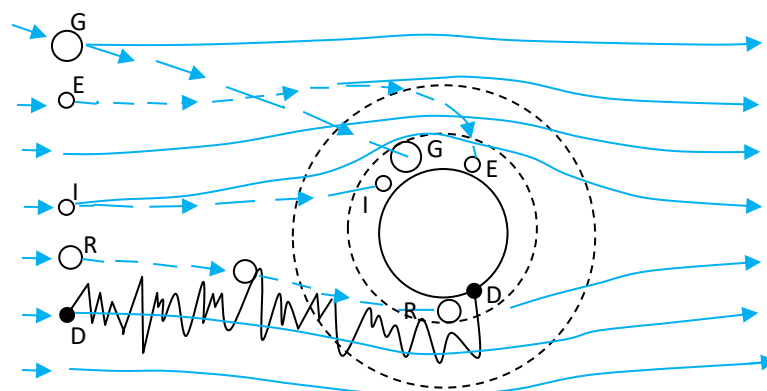
Proces filtracji gazu przez suche warstwy porowate utworzone z rozdrobnionych ciał stałych (np. włókien lub ziaren) jest procesem zmiennym w czasie. Jego istotą jest zatrzymywanie ziaren pyłu wewnątrz warstwy filtracyjnej i na jej powierzchni, a następnie oddzielanie pyłu od warstwy lub zagospodarowywanie go wraz z materiałem tworzącym warstwę filtracyjną (ryc.1).



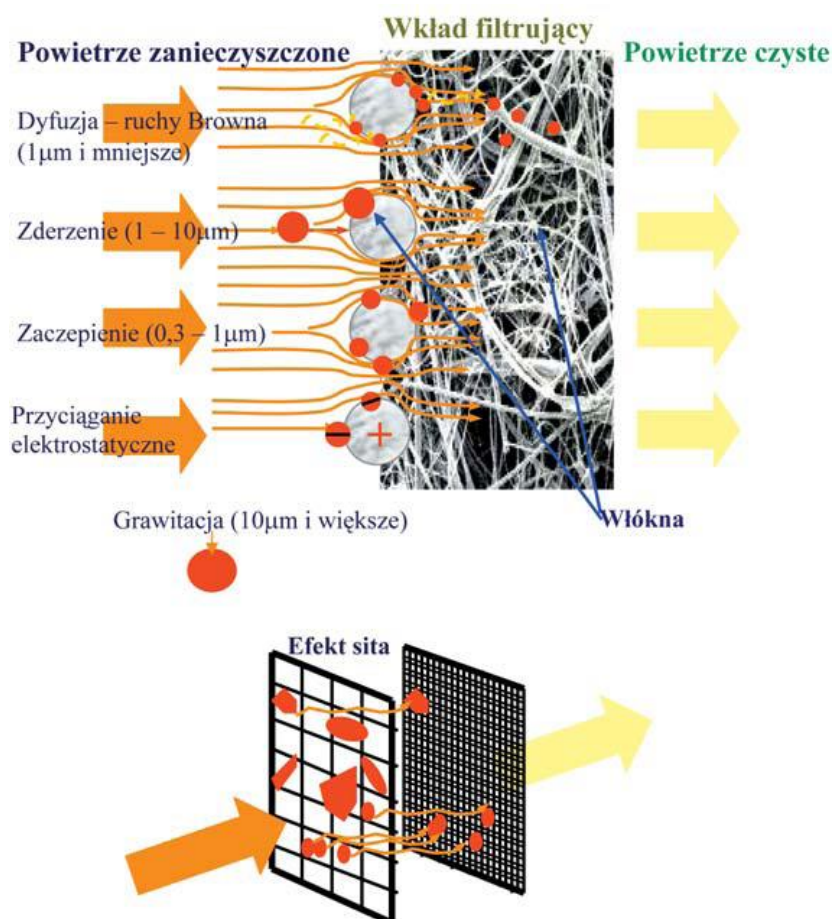
Ryc. 1. Filtracja: a) powierzchniowa, b) wgłębna (objętościowa)

Ilość zanieczyszczeń i wykorzystywany mechanizm filtracji decydują o tym, czy na przegrodzie zachodzi filtracja powierzchniowa, czy też wgłębna. Znaczenie mają tutaj rozmiary cząstek oraz prześwitów w przegrodzie filtracyjnej lub porów, jeżeli jest to ośrodek porowaty. **Filtracja powierzchniowa** (ryc.1a) zachodzi w przypadku znacznej ilości zanieczyszczeń w postaci cząstek stałych, zawartych w filtrowanym powietrzu. Na przegrodzie powstaje wówczas warstwa osadu (zanieczyszczeń), która następnie bierze udział w procesie filtracji. Z biegiem czasu warstwa ta rośnie, rosną również opory przepływu. **Filtracja wgłębna** (ryc.1b), zwana też **objętościową**, zachodzi natomiast w przypadku małej ilości cząstek stałych, które albo są zatrzymywane na przegrodzie filtracyjnej, albo wnikają do niej.

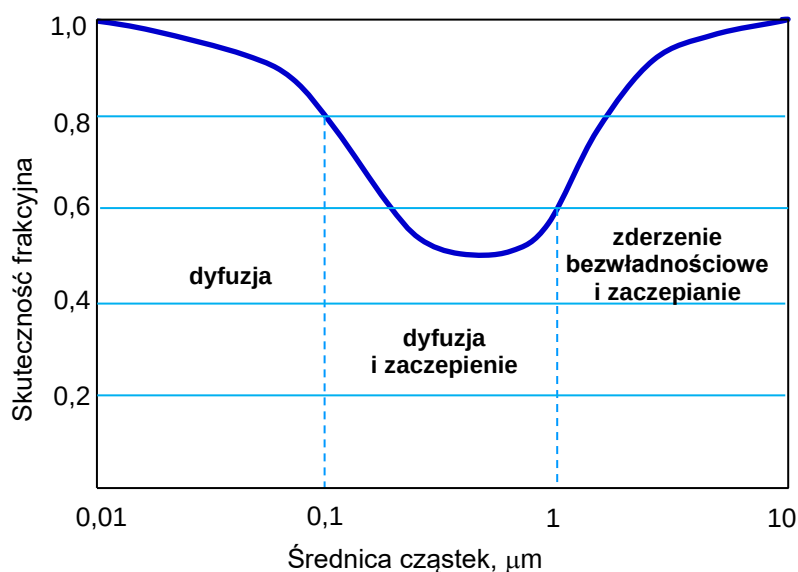
Podczas przepływu zapyłonego gazu między elementami tworzącymi warstwę filtracyjną - **elementami filtracyjnymi** - ziarna pyłu mogą zderzać się z powierzchnią tych elementów w wyniku dyfuzji, bezwładności, zaczepienia o element przy jego opływie, grawitacyjnego opadania czy elektrostatycznego oddziaływania ziaren i elementów (ryc. 2 - 4).



Ryc. 2. Zderzenia ziaren pyłu z pojedynczym elementem filtracyjnym wskutek:
D - dyfuzji (ruchów Browna), **I** - bezwładności, **E** - oddziaływania elektrostatycznego,
G - grawitacji, **R** - zaczepienia



Ryc. 3. Elementy filtracji zanieczyszczeń



Ryc. 4. Skuteczność frakcyjna zatrzymywania zanieczyszczeń powietrza na powierzchni filtracyjnej w zależności od mechanizmu oddzielania i wielkości cząstek

Całkowity efekt procesu filtracji jest wypadkową wszystkich zjawisk składających się na ten proces. Znajomość przebiegu każdego ze zjawisk oraz jego wpływu na separację pyłu pozwala zarówno na właściwe zaprojektowanie procesu odpylania, a zwłaszcza na dobór rodzaju i warunków użytkowania materiału filtracyjnego, jak i w konsekwencji na określenie parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych filtru oraz współpracujących z nim urządzeń.

W analizie fizycznej procesu filtracji rozważa się na ogół kolejno zagadnienia:

- ☞ opływu pojedynczych elementów i ich grup;
- ☞ zderzeń ziaren pyłu z elementami filtracyjnymi jako skutku poszczególnych rodzajów zjawisk i sił oddziałujących na ziarna;
- ☞ współoddziaływania wielu rodzajów zjawisk na prawdopodobieństwo zderzeń i zatrzymywania ziaren na powierzchni elementów (a więc i na skuteczność procesu separacji) w początkowej fazie filtracji traktowanej jako proces ustalony;
- ☞ zmienność struktury warstwy wskutek gromadzenia się w niej i na jej powierzchni pyłu i wpływ tej zmienności na skuteczność filtracji rzeczywistej a więc będącej procesem nieustalonym oraz na hydraulikę tego procesu (zwłaszcza na opory przepływu gazu w warstwie filtracyjnej);
- ☞ spójności warstwy filtracyjnej z nagromadzonym w niej pyłem i wynikające stąd warunki regeneracji warstwy.

Opływ elementów filtracyjnych

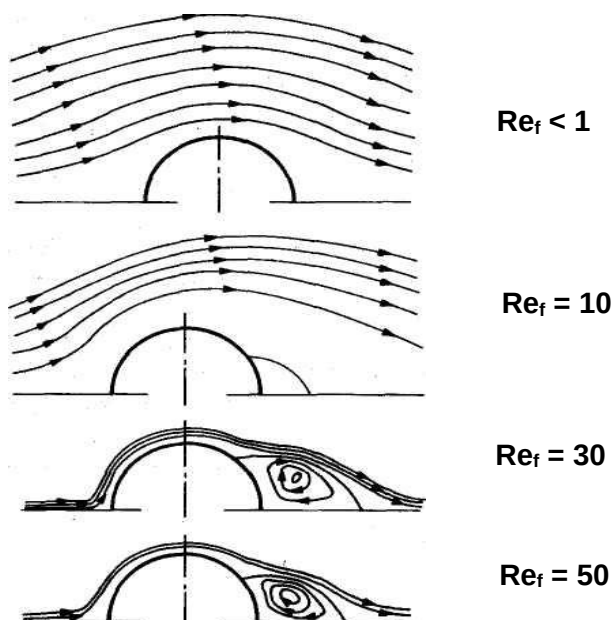
Podstawowym warunkiem wstępnym procesu filtracji jest względny ruch gazu transportującego pył i elementów tworzących warstwę filtracyjną.

Elementy filtracyjne stanowią przeszkody dla strugi gazu są przez niego opływane. Ukształtowanie linii prądu wokół elementu filtracyjnego (np. kuli lub walca) zależy od wartości liczby Reynoldsa. Charakteryzuje ona opływ elementów filtracyjnych i można ją zapisać jako $Re_f = v_0 d_f / \mu_g$, gdzie d_f jest wymiarem charakterystycznym elementu (np. średnicą kuli lub walca), a v_0 prędkością gazu w strefie niezaburzonego przepływem gazu. Prędkość ta jest co do wartości taka sama, jak gęstość strumienia gazu napływającego na powierzchnię warstwy filtracyjnej, zwana w skrócie **gęstością strumienia filtracji q_f** .

Dla znacznych wartości Re_f (większych od 2000) zmiany linii prądu powodowane istnieniem przeszkody można zaobserwować w odległości około $2d_f$ przed walcem, natomiast promienie krzywizn tych linii w bezpośrednim sąsiedztwie przeszkody są stosunkowo małe.

Dla niewielkich wartości Re_f (co ma miejsce zwłaszcza w wysokoskutecznych filtrach zbudowanych z bardzo małych elementów o wymiarach rzędu $1\ \mu m$ i działających przy prędkościach napływu rzędu $1\ mm/s$) zmiany linii prądu występują w znacznej odległości od przeszkody. Według Daviesa dla $Re_f = 0,2$ odchylenia linii prądu wynoszą 3% i występować mogą już w odległości $100 d_f$ przed przeszkodą.

Na ryc. 5 przedstawiono kształt linii prądu przy opływie walca dla różnych wartości liczb Reynoldsa:



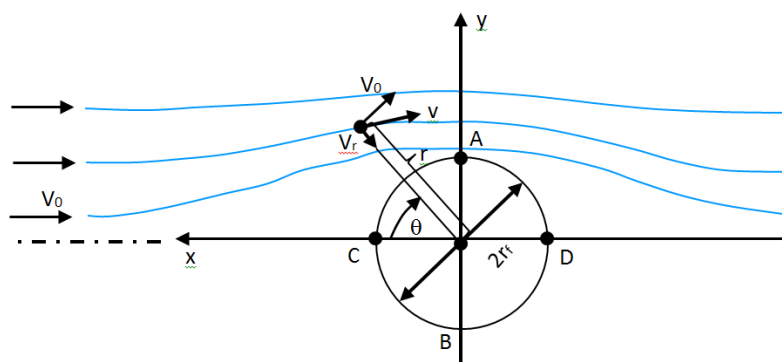
Ryc. 5. Opływ walca przy różnych wartościach liczby Reynoldsa Re_f

Zakresy wartości liczby Reynoldsa charakteryzującej opływ elementów tworzących warstwę filtracyjną zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1: Zakresy wartości liczby Reynoldsa Re_f przy filtracji powietrza o temperaturze mieszczącej się w zakresie 20-500°C

Rodzaj materiału filtracyjnego	Średnica elementów filtracyjnych (rzęd wielkości)	Zakres prędkości gazu mm/s	Re_f
Papier, bibuły i kartony	1-10	1-10	$10^{-4} - 10^{-2}$
Tkaniny i włókniny	1-100	1-100	$10^{-4} - 1$
Spieki porowate	10-100	1-10	$10^{-3} - 10^{-1}$
Siatki i pianki	100-1000	100-1000	$1 - 10^2$
Złoża ziarniste	1000	1-100	$10^{-1} - 10^2$

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 **laminarnym i przejściowym** (do $Re_f = 10^2$). Większe wartości liczby Reynoldsa (do rzędu 10^3) mogą wystąpić wówczas, gdy gaz ma lepkość znacznie mniejszą od powietrza. Punktem wyjścia do analiz ruchu gazu i zawartych w nim ziaren pyłu wewnątrz warstw filtracyjnych jest matematyczny opis dla wyidealizowanych przypadków opływu pojedynczego walca o nieskończonej długości (przedstawiającego pojedyncze włókno) lub pojedynczej kuli (przedstawiającej pojedynczy element złoża ziarnistego), znajdujących się w nieograniczonej przestrzeni gazu poruszającego się względem nich z prędkością v_0 (określoną w strefie niezaburzonego opływu ruchu gazu). W celu uproszczenia opisu układ taki przedstawiono we współrzędnych biegunowych (ryc.6).



Ryc. 6. Współrzędne linii prądu

W przypadku opływu pojedynczego walca **równanie ciągłości ruchu** ma postać

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0$$

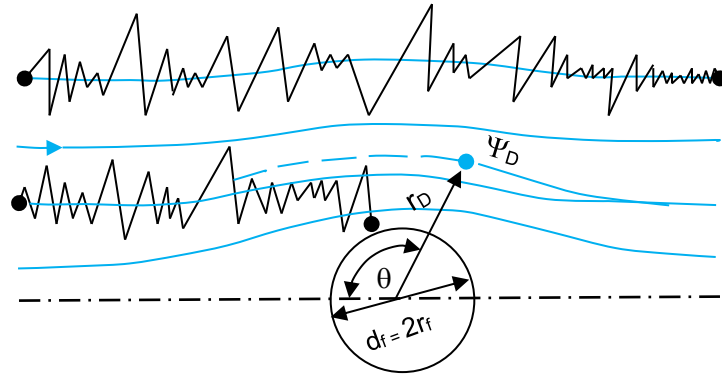
Dla dużych wartości Re strumień gazu omywającego poziomy walec może być z wystarczającą dokładnością opisany za pomocą równań ruchu dwuwymiarowego nieściśliwego ośrodka z pominięciem tarcia. Składowe prędkości ruchu gazu określone jako **funkcja potencjału ruchu** $\Psi = \Psi(r, \theta)$ mają postać - składowa promieniowa.

Dyfuzja

W procesie filtracji zjawiska dyfuzji są jedną z przyczyn zderzeń ziaren pyłu z powierzchniami elementów tworzących warstwy filtracyjne. Ich znaczenie jest szczególnie istotne dla **ziaren submikronowych**. Wraz ze wzrostem wielkości (już powyżej $0,5 \mu m$) i masy ziaren rośnie, bowiem ich bezwładność. Są one równocześnie uderzane przez coraz większą ilość cząsteczek gazu, a tym samym ruchy Browna słabną, stają się drgające, a dla ziaren większych od $20 \mu m$ - niezauważalne.

W procesie filtracji zjawisko dyfuzji i związane z tym ruchy ziaren nakładają się na zjawisko przepływu gazu w warstwie filtracyjnej. Bardzo drobne ziarna pyłu, przemieszczające się wraz ze strugami gazu, będą poruszały się dodatkowo ruchami Browna, stąd tory ich ruchu mogą znacznie odbiegać od kształtu linii prądu także w strefie opływu elementów filtracyjnych. Poszczególne ziarna znajdujące się w strudze gazu napływającego na element filtracyjny będą miały różne możliwości zderzania się z powierzchnią tego elementu.

Prawdopodobieństwo dyfuzyjnego zderzenia ziarna pyłu z powierzchnią elementu filtracyjnego zależy od wartości współczynnika dyfuzji pyłu w gazie D , a więc wielkości ziarna i własności termodynamicznych gazu. Zależy również od prędkości gazu i związanego z tym czasu przemieszczania się ziarna w sąsiedztwie elementu oraz od początkowego położenia ziarna względem elementu (ryc. 7), jak również od geometrycznej struktury złoża filtracyjnego.



Ryc. 7. Możliwości zderzenia w wyniku dyfuzji podczas opływu pojedynczego elementu filtracyjnego

Można, więc wokół każdego elementu filtracyjnego wyobrazić sobie strefę (warstwę) przepływającego gazu, w której będzie istniało prawdopodobieństwo zderzeń, przy czym granice tej warstwy wyznacza z jednej strony powierzchnia elementu, a z drugiej umowna powierzchnia (w gazie), dla której prawdopodobieństwo zderzeń dąży do zera. Strefę tę można określić także, jako warstwę gazu, w której stężenie pyłu w gazie zmniejsza się ku powierzchni elementu w kierunku ruchu gazu wskutek dyfuzyjnego osadzania się pyłu na powierzchni elementu. Strefa ta jest określona powierzchnią lub w symetrycznym układzie linią prądu $\psi_D = \psi(r_D)$, gdzie $r_D = f(\theta)$ jest odległością od środka elementu filtracyjnego.

Ogólne równanie wymiany masy w warunkach nieustalonych - **prawo Ficka** - określa zmienność stężenia w czasie i przestrzeni

$$\frac{\partial S}{\partial t} = D \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}$$

gdzie S może być stężeniem bardzo drobnego, podlegającego dyfuzji pyłu w gazie, x grubością warstwy gazu otaczającego element filtracyjny.

Szybkość dyfuzji ziaren (odniesiona do jednostki powierzchni elementu filtracyjnego) i wynikająca stąd **szybkość zmian stężenia pyłu** w warstwie gazu otaczającego element) można określić zależnością

$$\frac{dS}{dt} = D \frac{S_0 - S_1}{x'} = \frac{dn}{dt} = D \frac{n_0 - n_1}{x'}$$

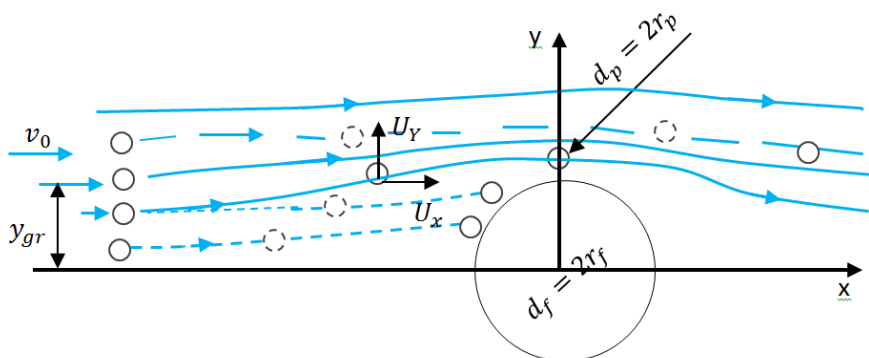
gdzie: S_0, n_0 - początkowe stężenie lub ilość ziaren pyłu w gazie w strefie niezaburzonego przepływu lub w strefie gdzie nie występuje gradient stężenia,

$S_1; n_1$ - stężenie lub ilość ziaren pyłu w gazie przy powierzchni elementu, przy czym S_1 i n_1 dążą do zera;

x' - grubość warstwy gazu, w której występuje gradient stężenia pyłu powodowany dyfuzyjnym osadzaniem się go.

Zderzenia inercyjne

Jeśli bezwładność ziarna pyłu wynikająca z jego masy i prędkości jest odpowiednio duża, to w sferze opływu przeszkody, jaką stanowi element filtracyjny, tor ruchu tego ziarna może dość istotnie odchylić się od kształtu linii prądu gazu – ryc.8.



Ryc. 8. Możliwości zderzeń inercyjnych

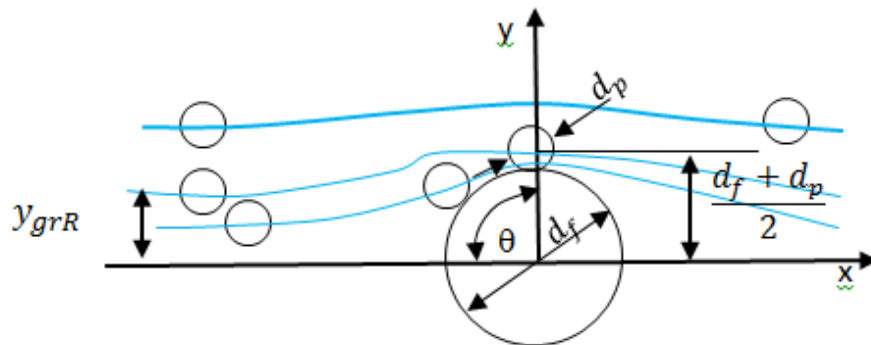
Jednakże tylko część spośród napływających wraz z gazem ziaren ma szansę zderzyć z powierzchnią elementu. Będą to ziarna zawarte w strudze gazu o wymiarze $2y_{gr}$. Ziarna, które znajdują się na zewnątrz tej strugi, takiej szansy nie mają.

Mechanizm zaczepienia

Ziarno pyłu może zderzyć się z elementem filtracyjnym poruszając się także wzdłuż linii prądu gazu (ryc. 9), a więc bez wpływu bezwładności¹. Sytuacja taka, tzn. zaczepienie, może zaistnieć w przypadku małych ziaren pyłu o niewielkiej gęstości, poruszających się z niewielkimi prędkościami, a więc gdy osadzanie dyfuzyjne i inercyjne są pomijalnie małe ($Pe \rightarrow \infty$, $Stk \rightarrow 0$).

W skrajnym przypadku zaczepieniu podlegać może ziarno, które zetknie się stycznie z powierzchnią elementu filtracyjnego, a więc zbliży się doń na odległość $(d_f + d_p)/2$.

¹ W rzeczywistości wpływ dyfuzji, sił bezwładności i zaczepienia nakładają się na oddziaływanie innych mechanizmów zderzeń



Ryc. 9. Mechanizm zaczepienia

Grawitacyjne osiadanie

W przypadku gdy zapyłony gaz przepływa przez warstwę filtracyjną z bardzo małą prędkością, tory ruchu i prędkość ziaren pyłu są kształtowane również przez siłę ciężenia.

Według Straussa grawitacyjne osiadanie ziaren na powierzchni elementów filtracyjnych może być już dostrzegalne 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 .

W opisie grawitacyjnego osiadania Lee proponuje, aby w celu określenia relacji między wpływami bezwładności i grawitacji posługiwać się **parametrem osadzania grawitacyjnego G** , definiowanym jako stosunek liczb Stokesa i Frouda

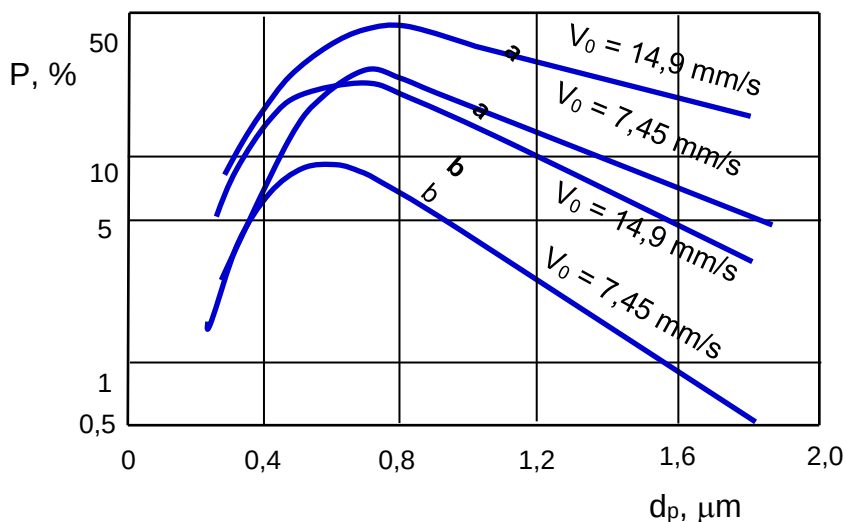
$$G = \frac{Stk}{2Fr}$$

gdzie $Fr = \frac{m_p v^2}{2m_p g h}$ liczba Frouda, określająca stosunek energii kinetycznej ziarna do

jego energii potencjalnej, dla złoża kulistych elementów jest obliczana przy założeniu $h = d_f/4$

$$G = \frac{Stk}{2Fr} = \frac{d_p^2 g \rho_p Cu}{18 \mu_g v_0}$$

Cu – poprawka Cunninhgama



Ryc. 10. Penetracja dioktyloftalanu poprzez ziarniste złożę przy przepływie gazu: (a) – z góry do dołu; (b) – z dołu do góry

Oddziaływanie elektrostatyczne

W przeprowadzonych wyżej rozważaniach ograniczono się do oceny możliwości zderzeń ziaren pyłu z elementami filtracyjnymi wynikających wyłącznie z oddziaływań mechanicznych i termodynamicznych.

Tymczasem na charakter ruchu ziaren pyłu w sąsiedztwie elementów filtracyjnych, a w efekcie i na prawdopodobieństwo zderzeń, wpływać mogą także siły elektrostatycznego oddziaływania zarówno między samymi ziarnami, jak i między ziarnami a elementami filtracyjnymi.

Każde ziarno pyłu i kropla cieczy poruszająca się wraz z gazem jest obdarzona ładunkiem elektrycznym. 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.

Jak wynika z badań Kunkela i Loeba bezwzględny ładunek elektryczny ziaren rośnie wraz z ich wymiarami według zależności przebiegającej między liniową, a kwadratową oraz proporcjonalnie do pierwiastka kwadratowego z powierzchni zewnętrznej ziarna.

W naturalnie naelektryzowanych aerozolach (pyłowo-gazowych i kropłowo-gazowych) istnieje na ogół równowaga ładunków dodatnich i ujemnych. Sumy ładunków dodatnio i ujemnie naładowanych ziaren są podobne. Przewaga sumy ładunków jednego znaku nad sumą ładunków drugiego nie przekracza 20%. O przewadze jednego z ładunków decyduje rodzaj materiału fazy rozproszonej, sposób jej powstawania i transportu.

Elementy tworzące warstwę filtracyjną mogą być również obdarzone ładunkiem. Może on powstawać wskutek tarcia między nimi, gdyż większość elementów podlega ruchom w trakcie filtracji. Ładunek filtracyjny może być także utworzony w sposób trwały w wyniku specjalnej preparacji materiałów filtracyjnych lub może być indukowany na elementach filtracyjnych pod wpływem sztucznie utworzonego pola elektrycznego, bądź jonizacji gazu.

Naładowane ziarna i elementy filtracyjne mogą się przyciągać lub odpychać. Siła ich wzajemnego oddziaływania F_e jest funkcją

$$F_e = F(Q, q, r, S_n, \epsilon_f, \epsilon_p, \epsilon_0)$$

gdzie: Q i q - ładunki elektryczne elementu filtracyjnego i ziarna pyłu,

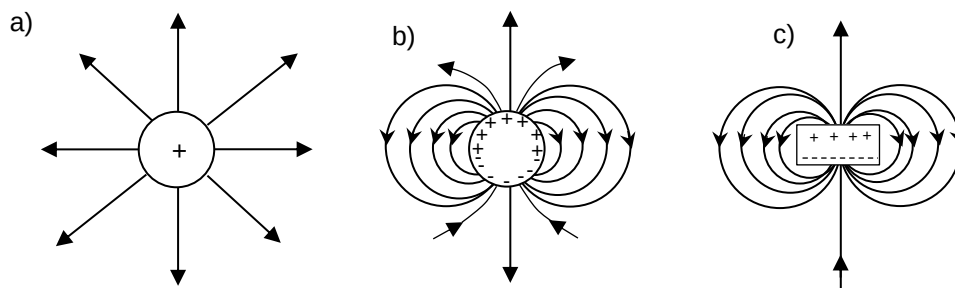
r - odległość między nimi,

S_n - stężenie ilościowe pyłu (lub kropeł) w gazie;

$\epsilon_f, \epsilon_p, \epsilon_0$ - stałe dielektryczne odpowiednio: elementu filtracyjnego, pyłu i próżni; wartość tej ostatniej wynosi $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

Można przyjąć, że większość ziaren pyłu, zwłaszcza drobnych, jest naładowana jedno-biegunowo (unipolarnie), tzn. ma ładunek jednego znaku, natomiast ładunek elektryczny na poszczególnych elementach filtracyjnych może być rozłożony w różny sposób - jedno-biegunowo (unipolarnie), jak i dwubiegunowo (dipolarnie) (ryc.11).

Elementy naładowane dwubiegunowo mogą tworzyć tzw. **dipole elektryczne**.



Ryc. 11. Schemat rozmieszczenia ładunków i przebiegu linii pola elektrycznego dla elementów naładowanych: a) unipolarnie, b), c) dipolarnie

Podczas ruchu ziaren pyłu w sąsiedztwie elementu filtracyjnego zaistnieć mogą cztery podstawowe przypadki oddziaływania elektrostatycznego i wystąpić związane z tym siły:

1. Ziarna i element filtracyjny są naładowane - występują wtedy siły kulombowskiego przyciągania lub odpychania F_{ec} , których wielkość zależy od rodzaju (znaku) i wielkości ładunków ziaren i elementu. Ładunki można wówczas traktować jako punktowe.

2. Naładowany element filtracyjny indukuje na powierzchni ziaren ładunek o znaku przeciwnym - powstaje wówczas siła kulombowskiego przyciągania F_{ei} , która staje się jeszcze jedną siłą zewnętrzną działającą na ziarna.
3. Naładowane ziarna indukują na elemencie ładunek o znaku przeciwnym – powstaje wówczas siła F_{em} , która powoduje dodatkowe oddziaływanie między ziarnem a elementem.
4. Ziarna obdarzone ładunkiem jednego znaku odpychają się wzajemnie z siłą F_{es} . Jest to tzw. *efekt ładunku przestrzennego*

Siła oddziaływania między naładowanym ziarnem i naładowanym elementem F_e przy stałych ładunkach jest sumą

$$F_e = F_{ec} + F_{ei} + F_{em} + F_{es}$$

$$F_{ec} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$F_{ei} = -\left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2}\right) - \frac{d_p^3 Q^2}{16\pi\epsilon_0 r^5}$$

$$F_{em} = \frac{q_2 d_f}{8\pi\epsilon_0 r^3} - \frac{2q^2 d_f r}{4\pi\epsilon_0 (4r_2 - d_f^2)^2}$$

$$F_{es} = -\frac{q^2 d_f^3 S_n}{24\epsilon_0 r^2}$$

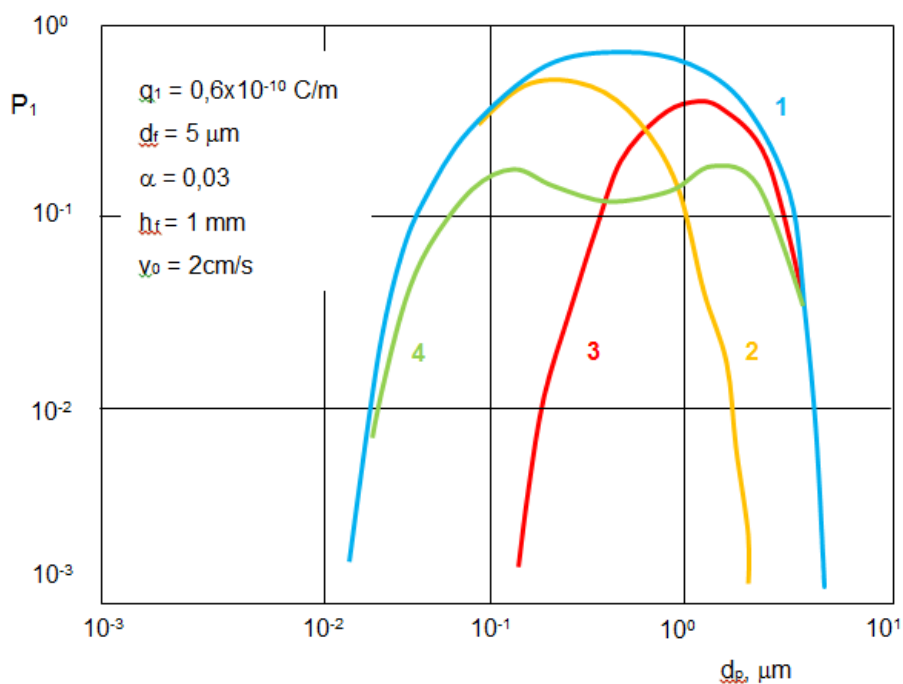
Jeśli kulisty element filtracyjny znajduje się pod stałym napięciem U , wówczas łączną siłę oddziaływania F_{eu} między tym elementem a ziarnem o średnicy d_p i ładunku q (uwzględniając także siłę F_{et} powodowaną przez ładunki indukowane na elemencie przez inne ziarna otaczające go w promieniu r_i) można określić jako sumę

$$F_{eu} = F'_{ec} + F'_{ei} + F_{em} + F_{es} + F_{et}$$

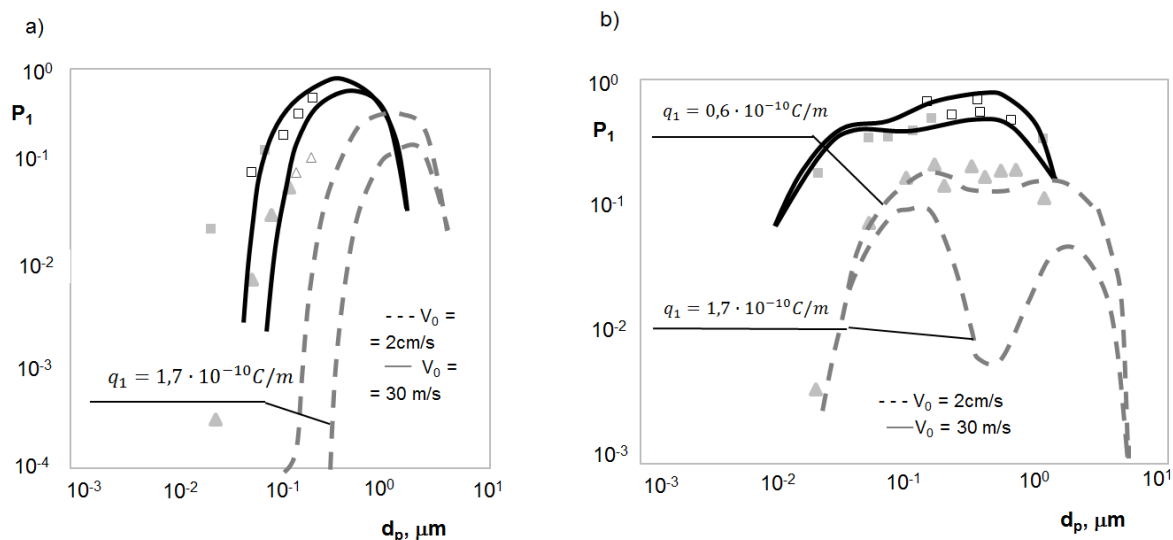
$$F'_{ec} = \frac{Uq d_f}{2r^2}$$

$$F'_{ei} = -\left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p - 2}\right) \frac{U^2 d_f^2 \pi \epsilon_0 d_p^3}{4r^5}$$

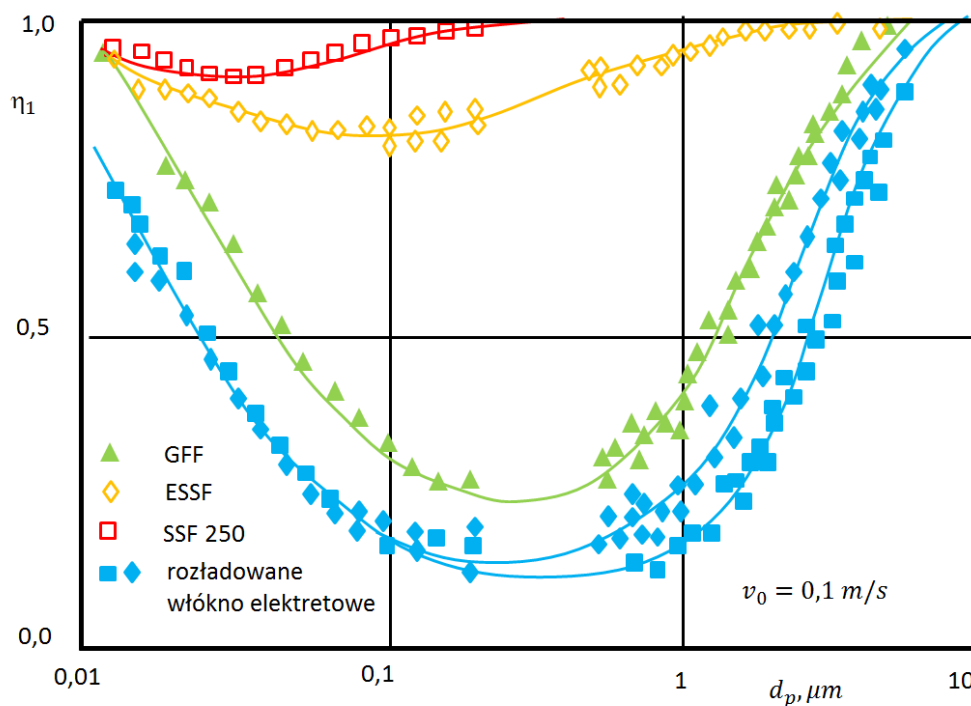
$$F'_{et} = -\frac{q^2 d_f^2 \pi S_n r_i^2}{8\pi\epsilon_0 r^2}$$



Ryc. 12. Penetracja pyłu przez włóknistą warstwę filtracyjną przy różnych uwarunkowaniach elektrostatycznych: 1 – nienaładowane włókna i ziarna pyłu; 2 – naładowane włókna i nienaładowane ziarna; 3 – naładowane włókna i naładowane ziarna ($q = e$); 4 – włókna i ziarna naładowane ładunkiem równowagowym



Ryc. 13. Penetracja pyłów NaCl i DEHS przez filtr elektretowy typu SPUN 808: (a) dla ziaren obdarzonych pojedynczym ładunkiem elektrycznym; (b) dla ziaren w stanie równowagi ładunków

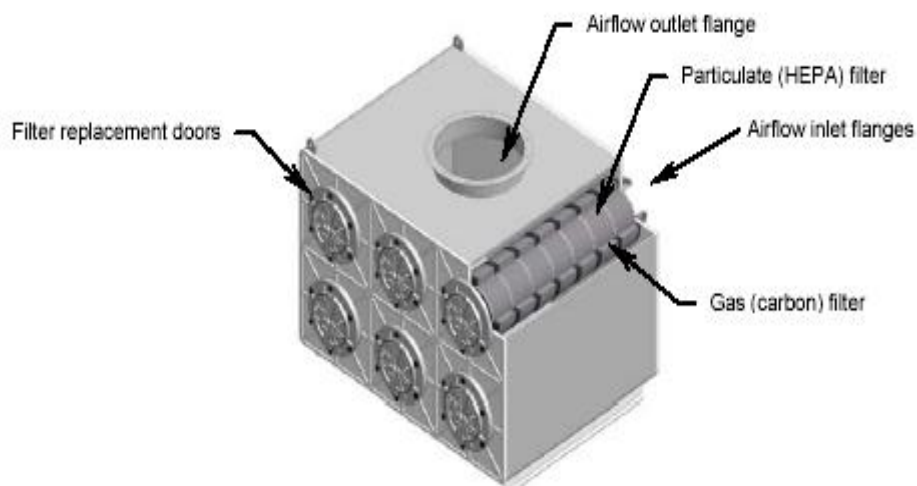


Ryc. 14. Przedziałowa skuteczność odpylania w filtrach elektretowych typu Split (SSF 250) i Spun (ESSF9) naładowanych i sztucznie rozładowanych oraz filtru z konwencjonalnego włókna szklanego (GFF) przy separacji ziaren o ładunku równowagowym

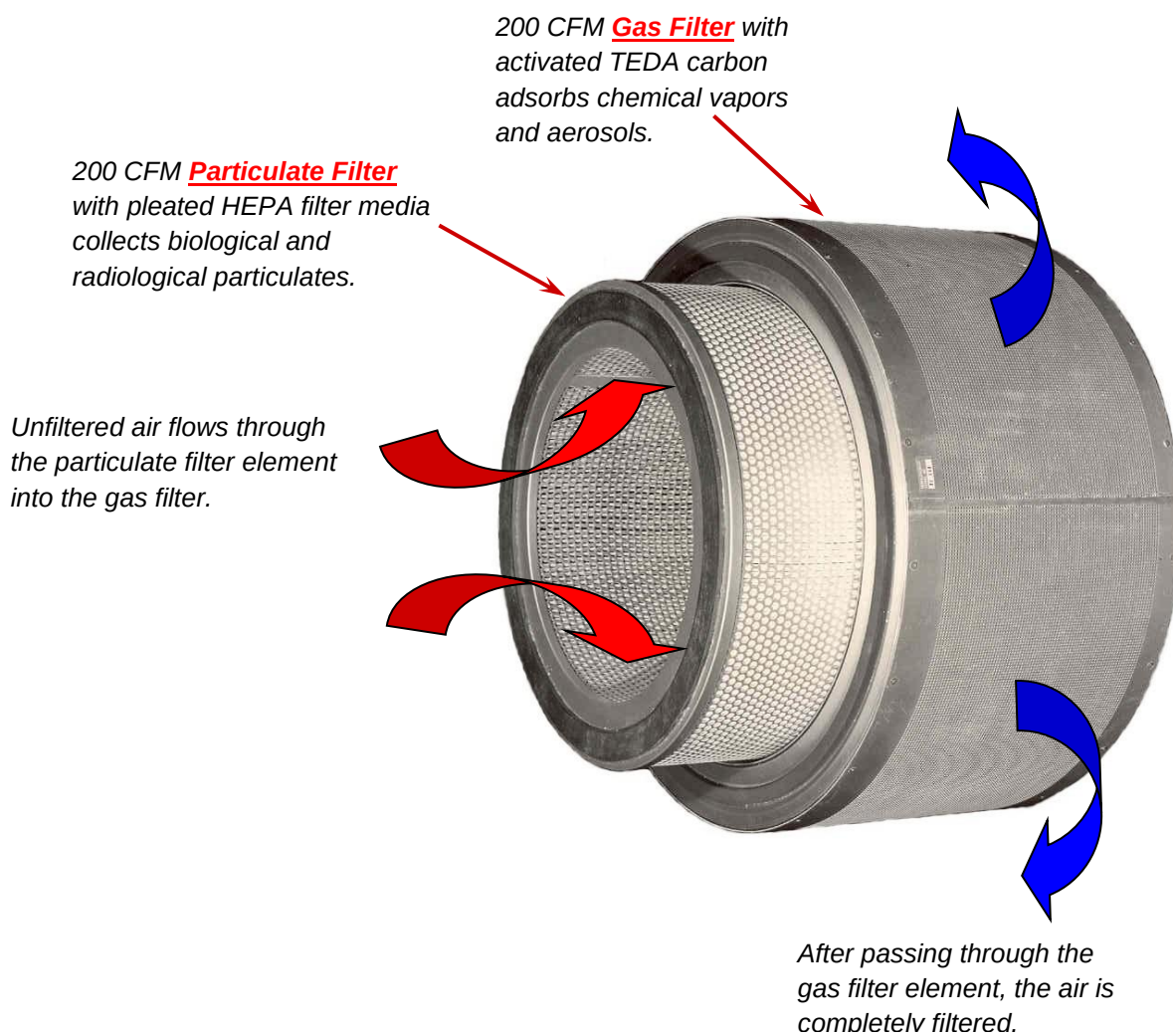
Rozwiązania praktyczne

Postęp technologii w dziedzinie materiałów filtracyjnych i filtrów do oczyszczania powietrza z aerozoli pozwala na konstruowanie urządzeń zdolnych do zatrzymywania cząstek wielkości nawet $0,1 \mu m$, czyli o rozmiarach wirusów ($0,01-0,1 \mu m$), bakterii ($0,1-2 \mu m$) i sporów ($10-15 \mu m$), jednocześnie istnieje konieczność zastosowania wysokospecjalistycznej aparatury pozwalającej na określenie skuteczności filtracji na poziomie 99,9999% przy rozmiarach fazy rozproszonej na poziomie $0,1-2 \mu m$.

W rozwiązaniach praktycznych stosuje się wkłady filtracyjne z wysokoskutecznych materiałów filtracyjnych:



Ryc.15. Filtropochłaniacz XH8400MCRF z wkładem filtracyjnym klasy HEPA



Ryc.16. Filtropochłaniacz M98 z wkładem filtracyjnym klasy HEPA

3. PRZEBIEG ĆWICZENIA

Procedurę ćwiczenia opracowano na podstawie wymagań i opisu przebiegu badań zawartych w normie PN-EN 1822-5:2002. Wysokoskuteczne filtry powietrza (HEPA i ULPA). Część 5: Określanie skuteczności filtra

3.1. Specyficzne definicje i skróty

- **Medium filtracyjne** - płaski, niepofałdowany materiał filtracyjny;
- **Pakiet filtracyjny** – materiał filtracyjny, uformowany w postaci jednorodnych, pojedynczych fałd;
- **Penetracja** – stosunek stężenia liczbowego cząstek za filtrem do ich stężenia przed filtrem.
- **Skuteczność** - stosunek stężenia liczbowego cząstek przed filtrem do ich stężenia za filtrem.
- **Skuteczność frakcyjna** - skuteczność dla cząstek o danej średnicy. Wartości skuteczności przedstawione w funkcji wymiarów (o danych średnicach dają krzywą skuteczności frakcyjnej)
- **Minimalna skuteczność filtra** – skuteczność filtra obliczona na poziomie ufności 95 %, tj. skuteczność obliczona dla najmniej korzystnej wartości granicznej dla 95 % przedziału ufności dla rzeczywistej liczby cząstek (dolna granica 95 % przedziału ufności zliczeń cząstek przed badanym filtrem, górna granica 95 % przedziału ufności zliczeń cząstek za badanym filtrem).
- **Przeciek** - punkt w filtrze, w którym skuteczność miejscowa jest niższa niż dana wartość graniczna;
- **Filtr EPA** (Efficient Particulate Air filter) – skuteczny filtr powietrza klasy od E10 do E12 - tabela 1;
- **Filtr HEPA** (High Efficient Particulate Air filter) - wysokoskuteczny filtr powietrza klasy od H 13 do H 14 - tabela 1;
- **Filtr ULPA** (Ultra Low Penetration Air filter) - filtr powietrza o bardzo niskiej penetracji, klasy od U 15 do U 17 tabela 1,

Tabela 1: Klasyfikacja filtrów powietrza typu E, H i U wg. PN EN 1822-1:2009

Grup filtrów	Klasa filtru	Wartość całkowita		Wartość miejscowa	
		skuteczność [%]	penetracja [%]	skuteczność [%]	penetracja [%]
E (EPA)	E10	≥ 85	≤ 15	-	-
	E11	≥ 95	≤ 5	-	-
	E12	$\geq 99,5$	$\leq 0,5$	-	-
H (HEPA)	H13	$\geq 99,95$	$\leq 0,05$	$\geq 99,75$	$\leq 0,25$
	H14	$\geq 99,995$	$\leq 0,005$	$\geq 99,975$	$\leq 0,025$
U (ULPA)	U15	$\geq 99,9995$	$\leq 0,0005$	$\geq 99,9975$	$\leq 0,0025$
	U16	$\geq 99,99995$	$\leq 0,00005$	$\geq 99,99975$	$\leq 0,00025$
	U17	$\geq 99,999995$	$\leq 0,000005$	$\geq 99,9999$	$\leq 0,0001$

- **Wymiar cząstki najbardziej penetrującej (MPPS)** – wymiar cząstki, dla której krzywa skuteczności frakcyjnej osiąga minimum (patrz tabela 1).

3.2. Środki ostrożności

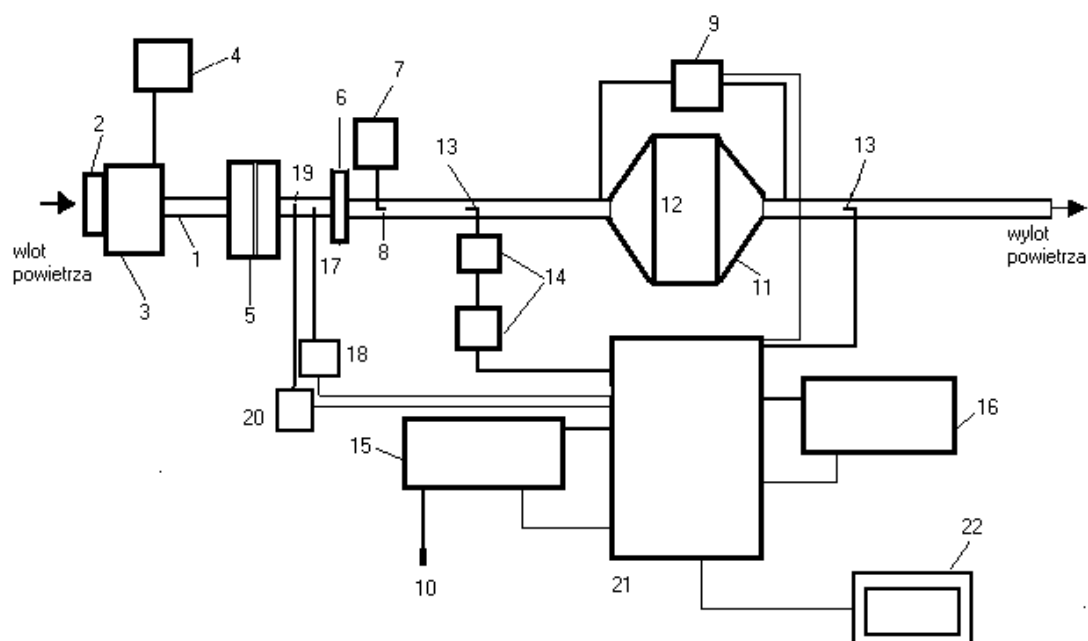
Nie przewiduje się stosowania specjalnego ubioru ani środków ochrony indywidualnej.

3.3. Warunki środowiskowe

Pomiar wykonuje się w temperaturze otoczenia (23 ± 5)⁰C, przy wilgotności względnej powietrza poniżej 75 %.

3.4. Wyposażenie i materiały pomocnicze

Badanie penetracji (skuteczności filtracji) aerozolu przez wysokoskuteczne filtry powietrza klasy HEPA i ULPA oraz filtry i filtropochłaniacze stosowane w urządzeniach filtrowentylacyjnych ochrony zbiorowej wykonuje się na stanowisku, którego schemat przedstawiono na ryc.17.



Ryc. 17. Schemat stanowiska do badania skuteczności filtracji (penetracji) filtrów HEPA i ULPA

Oznaczenia na rys.17.

- 1) rurociąg ϕ 200;
- 2) filtr wstępny do oczyszczania powietrza do badań;
- 3) wentylator z regulacją obrotów;
- 4) regulator obrotów wentylatora (regulacja prędkości przepływu powietrza do stanowiska);
- 5) zespół filtrów (HEPA H11 + ULPA U17) do oczyszczania powietrza do badań;

- 6) zwężka pomiarowa do wstępnego określania objętościowej prędkości przepływu powietrza przez badany filtr;
- 7) generator aerozolu polidispersyjnego z regulacją ilości podawanego aerozolu (wymienny – zależnie od klasy badanego filtra i wartości prędkości przepływu przez filtr);
- 8) sonda do podawania aerozolu z generatora do układu pomiarowego;
- 9) przetwornik różnicy ciśnień do pomiaru oporu przepływu powietrza przez badany filtr/filtropochłaniacz (wymienny – zależnie od przewidywanej wielkości oporu filtra);
- 10) czujnik do pomiaru temperatury i wilgotności względnej otoczenia
- 11) uchwyt badanego filtra / filtropochłaniacza – wymienny, zależnie od wymiarów badanego obiektu;
- 12) badany filtr / filtropochłaniacz;
- 13) sondy pomiarowe do poboru próbek aerozolu przed i za filtrem;
- 14) system rozcieńczania aerozolu przed filtrem (1 lub 2 rozcieńczalniki 1 : 100)
- 15) licznik cząstek do określania stężenia cząstek aerozolu przed badanym filtrem/filtropochłaniaczem w poszczególnych kanałach pomiarowych;
- 16) licznik cząstek do określania stężenia cząstek aerozolu za badanym filtrem/filtropochłaniaczem w poszczególnych kanałach pomiarowych;
- 17) czujnik temperatury i wilgotności względnej powietrza w układzie pomiarowym;
- 18) przetwornik temperatury i wilgotności względnej powietrza w układzie pomiarowym;
- 19) czujnik termooanemometru;
- 20) przetwornik termooanemometru
- 21) szafa sterownicza zawierająca zespół zaworów przełączających, zespół filtrów absolutnych, Enode procesor do podłączenia przetworników czujników zewnętrznych i liczników cząstek;
- 22) centrala do sterowania, kontroli i zapisywania danych, zawierająca program Facility Net.

Szczegółowe rozwiązania stanowiska do badań skuteczności filtracji przedstawiono na poniższych fotografiach:



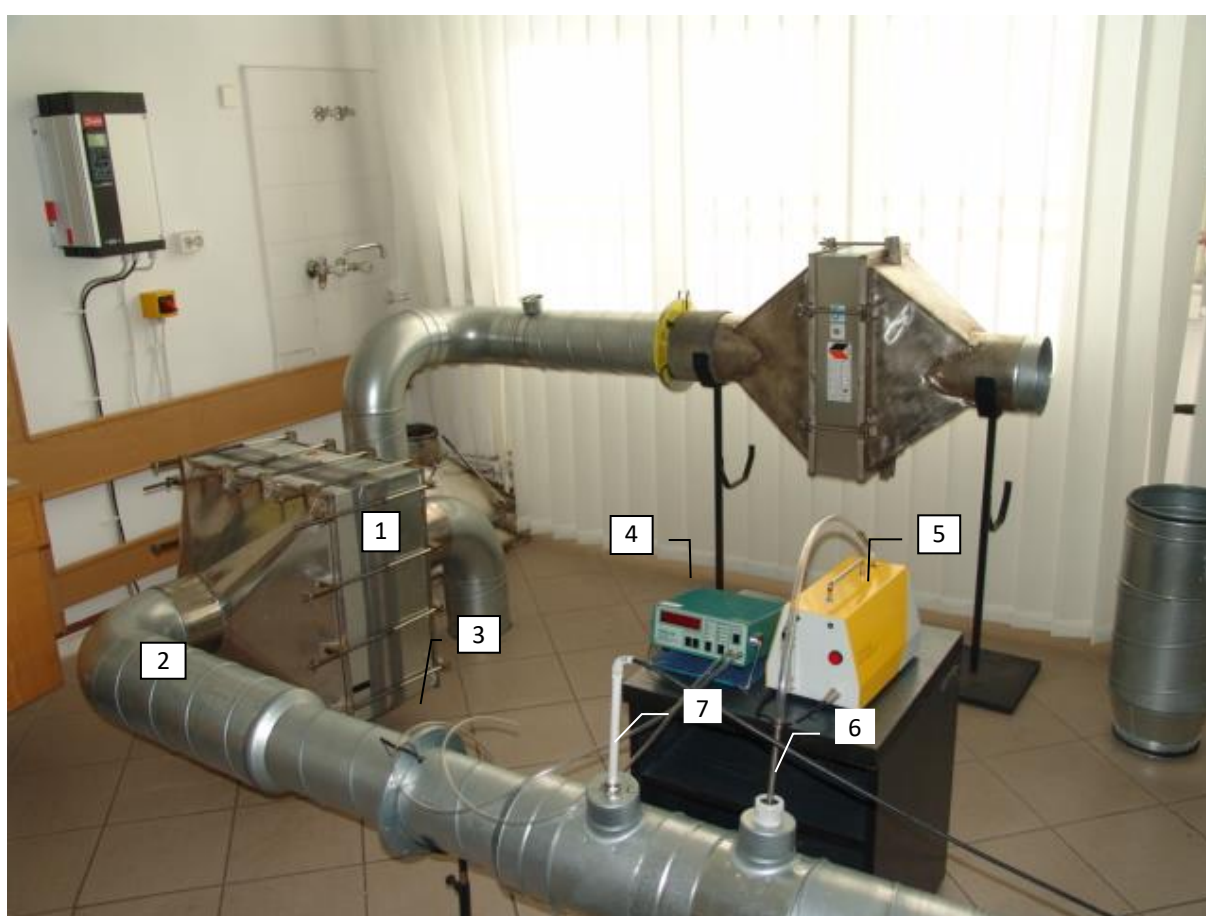
Ryc.18. Widok ogólny stanowiska



Ryc.19. Wentylator z filtrem wstępnym



Ryc.20. Falownik do regulacji obrotów (wydatku) wentylatora

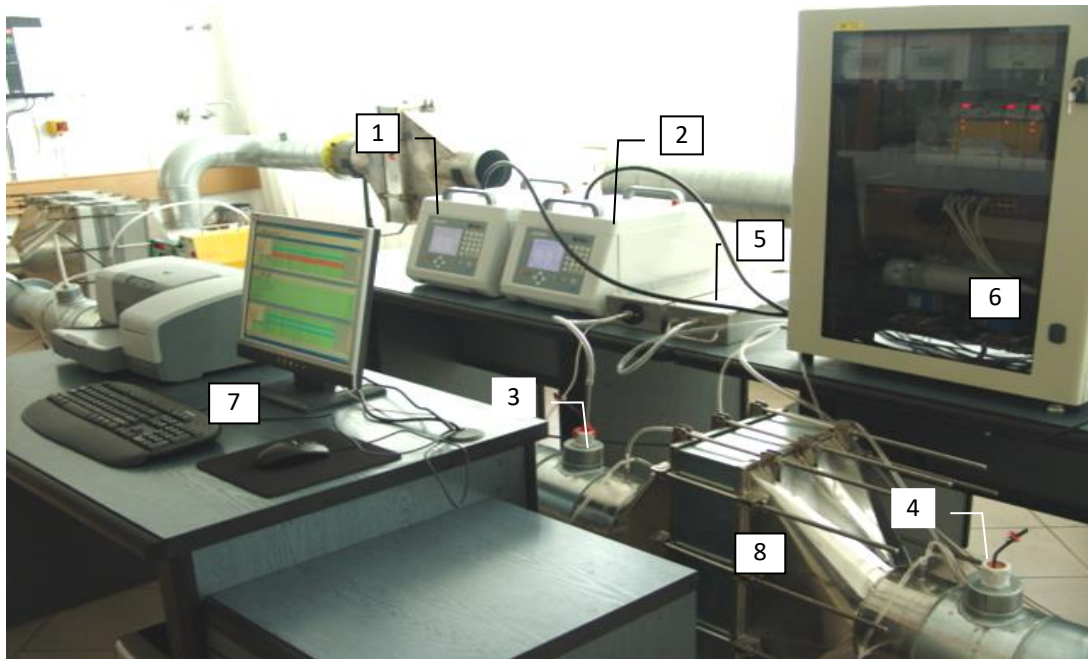


Ryc.21. Elementy stanowiska

1-zespół filtrów (HEPA + ULPA); 2-rurociąg ϕ 200; 3-zwężka pomiarowa; 4-manometr różnicowy zwężki pomiarowej 5-generator aerozolu polidispersyjnej mgły olejowej; 6-sonda aerozolu; 7-czujnik temperatury i wilgotności powietrza w rurociągu



Ryc. 22. Badany filtr klasy HEPA w uchwycie



Ryc. 23. Elementy stanowiska

1-laserowy licznik cząstek –przed filtrem; 2- laserowy licznik cząstek –za filtrem;
 3-sonda do pobierania próbek aerozolu przed filtrem; 4-sonda do pobierania próbek aerozolu
 za filtrem; 5-układ rozcieńczalników (1:100); 6-szafa sterownicza; 7-komputer sterujący;
 8-badany filtr w uchwycie

Tabela 2. Wyposażenie stanowiska badawczego

Lp.	Nazwa wyposażenia
1	Licznik cząstek Lasair II-110, nr 37360
2	Licznik cząstek Lasair II-110, nr 42082
3	Wentylator MBA 220, Venture Industries
4	Regulator obrotów wentylatora- przetwornica częstotliwości
5	Zespół filtrów (H11 + U17)
6	Generator aerozolu ATM-225/E, (60-250) l/h
7	Generator aerozolu ATM-225/ES, (10-130) l/h
8	Rozcieńczalnik TDA-D100, ATI
9	Rozcieńczalnik TDA-D100, ATI
10	Przetwornik różnicy ciśnień P92, (0-500) Pa
11	Przetwornik różnicy ciśnień P92, (0-2) kPa
12	Czujnik i przetwornik temperatury i wilgotności względnej powietrza w układzie pomiarowym HD2012TC/2/5
13	Czujnik i przetwornik termoanemometru D12-65V
14	Szafa sterownicza zawierająca zespół zaworów przełączających, zespół filtrów absolutnych, Enode procesor do podłączenia przetworników czujników zewnętrznych i liczników cząstek
15	Centrala do sterowania, kontroli i zapisywania danych, zawierająca program Facility Net

Odczynniki:

- olej DEHS,
- alkohol izopropylowy.

3.5. Przywołane instrukcje użytkowania przyrządów i instrukcje stanowiskowe

Instrukcja obsługi licznika cząstek Lasair II-110, PMS – I/II/23

Instrukcja obsługi generatora aerozolu ATM 225E, ATM 225E/S, TOPAS – I/II/34

Instrukcja obsługi rozcieńczalnika aerozolu TDA-D100, ATI – I/II/11

Instrukcja: Budowa i konfiguracja systemu do pomiaru integralności filtrów – I/II/26

Instrukcja obsługi programu Facility Net (Pharmaceutical Net) – I/II/25

Instrukcja obsługi przetwornicy częstotliwości VLT 6004, Danfoss – I/II/59

Instrukcja obsługi termoanemometru Velocicalc Plus – I/II/15

3.6. Sposób wykonania ćwiczenia. Dokumentowanie poszczególnych etapów badania.

3.6.1. Sprawdzenie warunków wykonania pomiaru

Zmierzyć temperaturę i wilgotność powietrza atmosferycznego, sprawdzając, czy są zgodne z wymaganiami pkt. 3.3:

- temperatura = $(23 \pm 5)^{\circ}\text{C}$,
- wilgotność względna poniżej 75 %.

Wyniki pomiaru zapisać w protokole z badań.

3.6.2. Przygotowanie obiektu do badań

Zamocować szczelnie badany filtr w odpowiednim uchwycie pomiarowym zwracając uwagę na kierunek przepływu powietrza przez filtr

3.6.3. Przygotowanie stanowiska pomiarowego

1. Uchwyt pomiarowy z badanym filtrem zamontować szczelnie na stanowisku badawczym.
2. Sprawdzić ukompletowanie stanowiska zgodnie ze schematem.
3. Podłączyć generator aerozolu odpowiedni do klasy badanego filtra, zgodnie z poniższą tabelą.

Tabela. 3. Dobór generatora aerozolu w zależności od klasy badanego filtra

Klasa filtra	Generator
E10	ATM-225/ES, (10-130) l/h
E11	ATM-225/ES, (10-130) l/h
E12	ATM-225/ES, (10-130) l/h
H13	ATM-225/E, (60-250) l/h
H14	ATM-225/E, (60-250) l/h
U15	ATM-225/E, (60-250) l/h
U16	ATM-225/E, (60-250) l/h
U17	ATM-225/E, (60-250) l/h + ATM-225/ES, (10-130) l/h

Uwaga: - w przypadku badania filtrów klasy H10 – U15 zbiornik generatora należy napęlnić mieszaniną oleju DEHS z izopropanolem w stosunku 1:4,
- w przypadku badania filtrów klasy U16, U17 zbiornik generatora należy napęlnić czystym olejem DEHS.

4. Sprawdzić, czy w zbiorniku generatora aerozolu jest odpowiednia ilość roztworu – nie mniej niż 40 ml. Jeśli jest mniej, uzupełnić roztworem: olej DEHS + izopropanol lub czystym olejem DEHS, w zależności od oczekiwanej klasy badanego filtra.
5. Włączyć zasilanie przetwornicy częstotliwości. Przyciskiem „Hand Start” uruchomić nawiew czystego powietrza do stanowiska, sprawdzić czy nie występują nieszczelności w układzie badawczym.
6. Ustalić przepływ nominalny przez filtr. Wydajność wentylatora należy regulować przy pomocy przycisków na panelu sterowania przetwornicy częstotliwości, aż do ustalenia się odpowiedniego przepływu na zwężce pomiarowej.
7. Przez kilka minut przedmuchiwać cały układ czystym powietrzem.

3.6.4. Wykonanie pomiaru

1. Włączyć zasilanie szafy sterowniczej. Włączenie zasilania szafy sterowniczej powoduje automatyczne włączenie zasilania liczników cząstek, przetworników temperatury, wilgotności, prędkości przepływu powietrza, oporów przepływu oraz otwarcie odpowiednich elektrozaworów.
2. Po około 2 min. od uruchomienia zasilania szafy sterowniczej włączyć komputer sterujący i uruchomić program Facility Net.
3. Uruchomienie programu Facility Net powoduje automatyczne uruchomienie zapisu: daty pomiaru, aktualnego czasu (godz., min., sek.), wskazań licznika cząstek przed filtrem i licznika cząstek za filtrem, oporu przepływu filtra, prędkości przepływu, temperatury i wilgotności powietrza w układzie pomiarowym. Należy sprawdzić, czy temperatura i wilgotność powietrza są zgodne z wymaganiami normy.
4. Uregulować prędkość przepływu powietrza przez filtr zgodnie ze wskazaniem zainstalowanego termoanemometru.
5. Oczekać kilka minut aż odczyt z licznika cząstek „przed filtrem” i „za filtrem” będzie wynosił 0 cz./m³.
6. Uruchomić generator aerozolu. Ustalić przepływ aerozolu w generatorze na wartość optymalną dla przepływu nominalnego badanego filtra. Zarejestrować wartość przepływu powietrza przez generator.
7. Obserwując odczyty z liczników cząstek odczekać kilka minut, by ustabilizowała się praca generatora.
8. Sprawdzić, czy licznik „przed filtrem” nie wskazuje koincydencji powyżej 5 %. Jeżeli licznik pokazuje ostrzeżenie „koincydencja powyżej 5 %” zmniejszyć

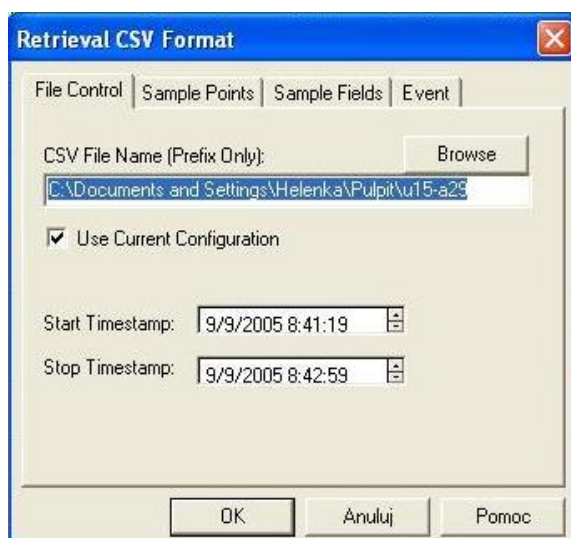
wydajność generatora aerozolu do wartości, przy której licznik nie będzie pokazywał tego ostrzeżenia.

9. Zarejestrować czas (godz., min., sek.) rozpoczęcia właściwego pomiaru.
10. Odczekać aż zostanie zarejestrowanych 5 odczytów stężenia aerozolu przed i za filtrem.
11. Wyłączyć generator aerozolu.
12. Odczekać kilka minut na oczyszczenie powietrza w stanowisku.
13. Sprawdzić czystość powietrza w rurociągu – odczyt na liczniku cząstek „przed filtrem” i „za filtrem” - powinien być 0 cz./m³.
14. Wyłączyć przepływ powietrza przez stanowisko.
15. Wykonać obliczenia penetracji przedziałowej oraz penetracji przedziałowej na poziomie ufności 95 %. Na podstawie obliczeń określić klasę filtru.

3.6.5. Zapisywanie danych pomiarowych i wykonanie obliczeń

W programie Facility Net kliknąć w pasku narzędzi ikonę z dyskietką. Pojawia się pole:

„Retrieval CSV Format”



„CSV File Name” służy do zapisania nazwy pliku do zachowania wyników.

„Start Timestamp” służy do zapisania czasu rozpoczęcia pomiaru.

„Stop Timestamp” służy do zapisania czasu zakończenia pomiaru.

1. Wpisać nazwę pliku do zapisania oraz czas rozpoczęcia i zakończenia danego pomiaru w formacie: m-c/dzień/rok godz:min:sek , kliknąć OK.'
2. Dane zostają zapisane na pulpicie w pliku typu Excel o rozszerzeniu CSV.

3. Podwójne kliknięcie w nazwę pliku ...CSV powoduje jego automatyczne otwarcie w Excel'u, co umożliwia dalsze opracowanie danych: obliczenie wartości średnich, odchylenia standardowego, penetracji aerozolu dla poszczególnych kanałów pomiarowych oraz penetracji aerozolu na poziomie ufności 95 %.
4. Dla każdego kanału pomiarowego obliczyć penetrację cząstek oraz penetrację cząstek na poziomie ufności 95 %. Określić średnicę cząstki najbardziej penetrującej (MPPS). Na podstawie obliczonych wartości penetracji dla tej cząstki określić klasę filtru.

Penetrację E (%) lub skuteczność filtracji P (%) oblicza się w następujący sposób:

$$E = \left(\frac{N_d}{N_u \cdot k_D} \right) \cdot 100\%$$

$$P = 1 - E \quad \text{w \%}$$

N_u	liczba cząstek zliczanych przed badanym filtrem
N_d	liczba cząstek zliczanych za badanym filtrem
k_D	współczynnik rozcieńczenia

W celu wyznaczenia minimalnej skuteczności $E_{95\%min}$ do obliczeń powinna być przyjmowana najmniej korzystna wartość graniczna dla 95% przedziału ufności dla rzeczywistej liczby cząstek. Do obliczeń stosowane są następujące równania:

$$E_{95\%min} = \left(\frac{N_{d,95\%max}}{N_{u,95\%min}} \right) \cdot 100\%$$

$$N_{u,95\%min} = N_{du} - 1,96 \cdot N_u^{1/2}$$

$$N_{d,95\%,max} = N_d + 1,96 N_d^{1/2}$$

$$P_{95\%min} = 100 - E_{95\%min}$$

$E_{95\%min}$	minimalna skuteczność z uwzględnieniem statystyki zliczania cząstek
$N_{u,95\%min}$	dolna granica 95% przedziału ufności
$N_{d,95\%,max}$	górna granica 95% przedziału ufności

3.6.6. Protokół z badań - przykład

Data ćwiczenia:

Grupa:

PROTOKÓŁ BADAŃ

Badanie penetracji testowego aerozolu przez wysokoskuteczne filtry powietrza klasy HEPA i ULPA

1. Obiekt badań

Filtropochłaniacz FPT100

2. Cel badań

Sprawdzenie penetracji modelowego aerozolu DEHS. Wyznaczenie skuteczności filtracji.

3. Oceniane wskaźniki i zależności liczbowe

Penetracja, skuteczność filtracji

4. Warunki badań

Badanie wykonano zgodnie z metodyką zamieszczoną w normie PN-EN 1822:2000.

5. Wyniki badań

Filtr II/UFW/15/05 do filtropochłaniacza FPT100

Prędkość przepływu 100 m³/h

Przykładowe tabele z wynikami pomiarów przedstawiano poniżej.

Tabela 1: Przykładowe wyniki pomiarów

Filtr II/UFW/15/05-do FPT100						
Licznik_przed_filtrem	(rozcieńczenie 10 000 - k _D)					
	d, µm					
Sample Time	0,125	0,175	0,25	0,4	0,75	1
10:47:53	32278	17955	18412	14301	7100	875
10:48:13	27581	18518	18779	13000	6950	850
10:48:33	22455	16476	18189	12850	7056	920
10:48:53	28894	17813	18636	13260	6980	905
10:49:13	33118	18711	18700	13060	7180	850

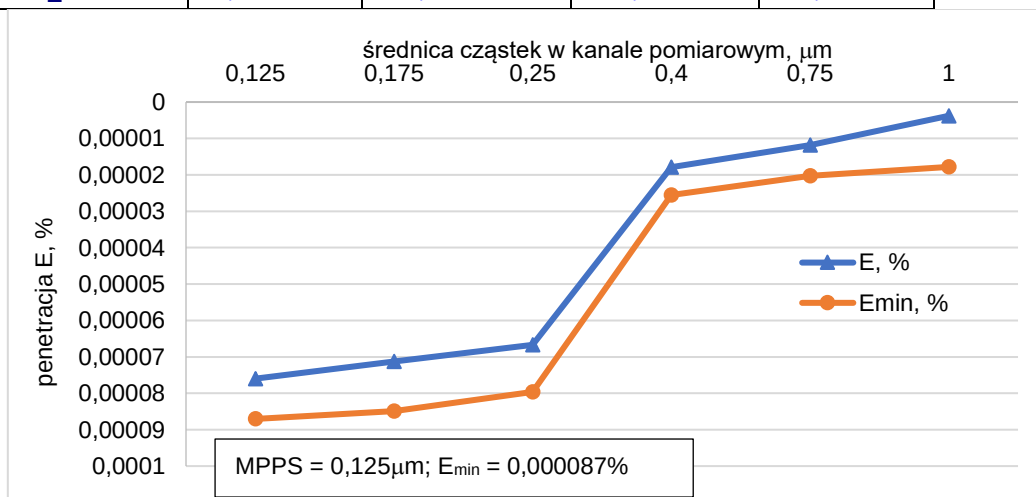
Licznik_za_filtrem						
10:47:52	230	120	155	27	8	0
10:48:12	220	150	95	20	10	1
10:48:32	200	100	145	24	7	0
10:48:52	256	140	100	26	9	0
10:49:12	200	120	157	22	8	1
10:49:32	210	135	90	24	8	0
10:49:52	230	120	155	27	8	0

Tabela 2. Przykładowe wyliczenia średnich i przedziałów ufności

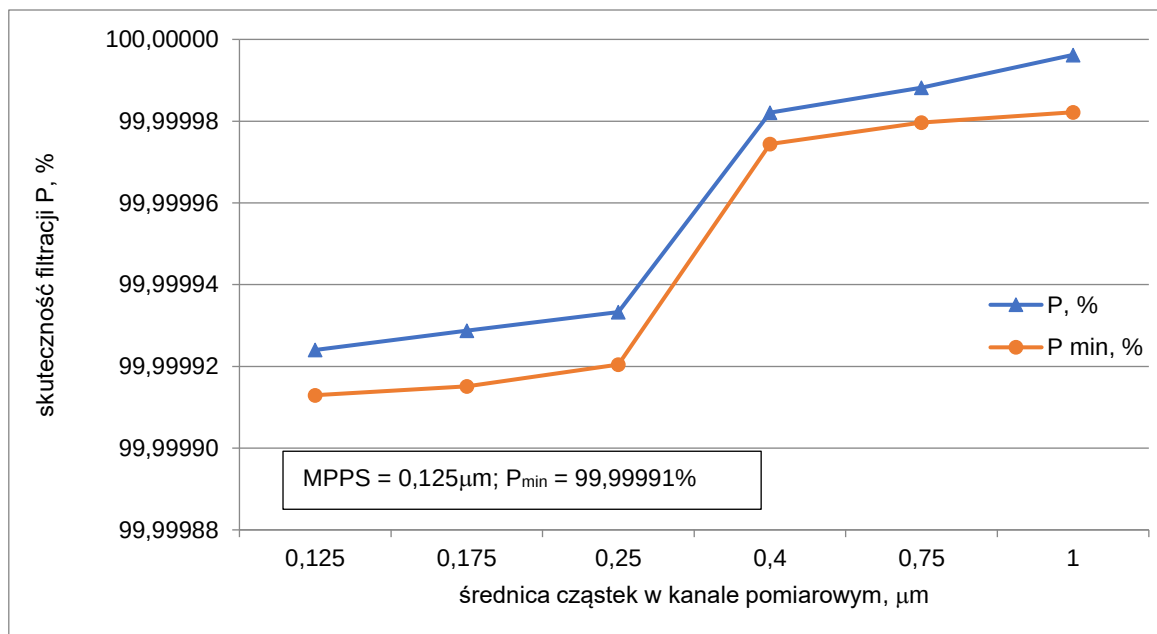
licznik przed		Średnia	przedział ufności	
	d, μm		-95%	+95%
	0,125	28865	28532	29198
	0,175	17895	17632	18157
	0,25	18543	18276	18810
	0,4	13294	13068	13520
	0,75	7053	6889	7218
	1	880	822	938
licznik za		Średnia	przedział ufności	
	d, μm		-95%	+95%
	0,125	219	190	248
	0,175	128	105	150
	0,25	124	102	145
	0,4	24	14	33
	0,75	8	3	14
	1	0	-1	1

Tabela 3. Wyniki pomiarów penetracji aerozolu przez filtr

d, μm	E	E _{min} 95%	P	P _{min} 95%
0,125	0,0000760	0,0000870	99,999924	99,999913
0,175	0,0000713	0,0000849	99,999929	99,999915
0,25	0,0000667	0,0000796	99,999933	99,999920
0,4	0,0000179	0,0000256	99,999982	99,999974
0,75	0,0000118	0,0000203	99,999988	99,999980
1	0,0000038	0,0000178	99,999996	99,999982



Ryc. 1. Wykres penetracji przez filtr



Ryc. 2. Wykres skuteczności filtracji

Wniosek:

Filtr II/UFW/15/05-do FPT100 należy zakwalifikować do grupy U15 wg. PN-EN 1822.

Wyznaczona skuteczność filtracji 99,99991% przy normowanym 99,9995%

Pytania kontrolne:

1. Na czym polega filtracja – ogólna charakterystyka procesu.
2. Co to jest penetracja, definicja, metody wyznaczania.
3. Omówić klasy filtrów stosowane w środkach ochrony dróg oddechowych.

4. LITERATURA

1. W. Harmata, Ochrona przed skażeniami. Cz. I. Współczesne zagrożenia. Podstawy teoretyczne indywidualnej ochrony przed skażeniami, WAT, Warszawa 2013 r.
1. W. Harmata, Ochrona przed skażeniami. Cz. II. Rozwiązania praktyczne indywidualnych środków ochrony przed skażeniami, WAT, Warszawa 2014 r.
2. P. Kabsch, Odpylanie i odpylacze. Mechanika aerozoli i odpylanie suche. T-1. WNT, Warszawa 1992.
3. Polska norma PN EN 1822-1:2009 Wysokoskuteczne filtry powietrza (EPA, HEPA i ULPA)
4. Polska norma PN-EN 18222-5:2002 Wysokoskuteczne filtry powietrza (HEPA i ULPA). Część 5: Określenie skuteczności filtru.

Na podstawie procedury D-22 Zakładu Ochrony Dróg Oddechowych Wojskowego Instytutu Chemii i Radiometrii

Opracował:

dr hab. inż. Władysław Harmata prof. WAT