

JANUSZ KRAWCZYK, LUDWIK MASZEK, ANDRZEJ MIESZKOWSKI,
ZDZISŁAW ROSZAK, HELENA WISŁA*

ZMIANA PRZEDZIAŁOWEJ SKUTECZNOŚCI
ODPYLANIA NA KOLEKTORACH CIEKŁYCH PRZY
DUŻYCH STĘŻENIACH ZAWIESINY

WET DUST EXTRACTION IN THE CONDITION OF
TOTAL LIQUID RECIRCULATION

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę zmian frakcyjnej skuteczności odpylania podczas intensywnego barbotażu, w strefie kropłowej oraz podczas uderzenia w zwilżoną powierzchnię w warunkach całkowitej recyrkulacji cieczy. Przy wysokich stężeniach zawiesiny zaobserwowano istotne obniżenie frakcyjnej skuteczności odpylania. Jako pył testowy zastosowano talk o cząstkach mniejszych od 20 μm i blisko 50 procentowym udzialem cząstek mniejszych od 5 μm . Do pomiaru skuteczności frakcyjnej zastosowano zmodyfikowany układ impaktorów kaskadowych.

Słowa kluczowe: mokre odpylanie, skuteczność ogólna, skuteczność frakcyjna, recyrkulacja

Abstract

In work the analyses of fractional efficiency changes in conditions of intensive barbotage, in drop zone and during striking into moistened surface were presented. At the high suspension concentration the significant reduction of general and fractional efficiency was observed. Talc, consisted of dust particles smaller then 20 μm and including almost 50% of the particles smaller then 5 μm , was used as tested dust. On the measurement effectiveness faction to apply modify cascade. To measurement of fraction's effectiveness were applied modified cascade impactor system.

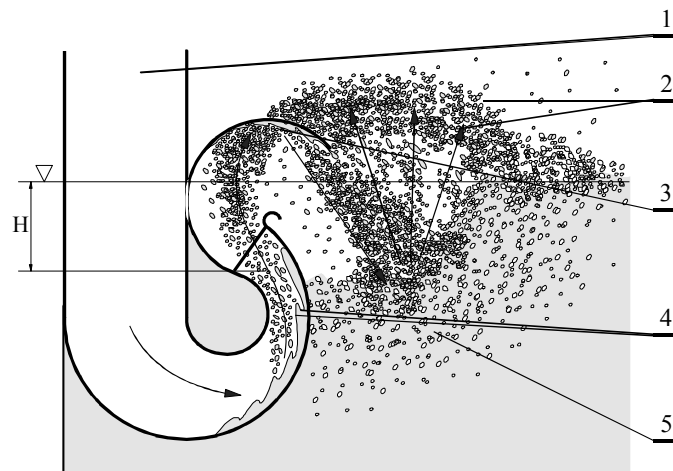
Keywords: wet dedusting, dedusting effectiveness, factional effectiveness, recirculation

* Dr hab. inż. Janusz Krawczyk, prof. PK, dr inż. Ludwik Maszek, dr inż. Andrzej Mieszkowski, dr inż. Zdzisław Roszak, mgr inż. Helena Wisła (doktorantka), Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

W warunkach całkowitej recyrkulacji cieczy w odpylaczach mokrych, w miarę ich eksploatacji, rośnie stężenie powstającej zawiesiny. Warunki pracy aparatu przy pełnej recyrkulacji cieczy zbliżone są do tych, jakie można uzyskać w aparacie okresowego działania, kiedy podczas eksploatacji nie dostarcza się do układu odpylającego świeżej wody. W pracach [1–3] przedstawiono wyniki badań skuteczności ogólnej i frakcyjnej aparatu przewałowego okresowego działania. Analizując otrzymane wyniki badań całkowitej skuteczności odpylania, stwierdzono, że po określonym czasie, uzależnionym od rodzaju pyłu, jego stężenia na wlocie i warunków badań, skuteczność procesu odpylania wyraźnie maleje. Można sądzić, że rosnące stężenie zawiesiny ma istotny wpływ na generowanie ciekłych kolektorów wytrącających cząstki pyłu ze strumienia gazu jak również na szybkość odnawiania powierzchni kontaktu międzyfazowego, a zatem możliwość wchłaniania pyłu.

W zależności od typu odpylacza mokrego, cząstki pyłu wydzielane są na ciekłych kolektorach, którymi są krople cieczy poruszające się w strumieniu aerozolu, powierzchnie pęcherzyków gazowych formujące się w warunkach barbotażu i zwilżone powierzchnie ścianek aparatu. W aparacie przewałowym występują jednocześnie wszystkie trzy kolektory.

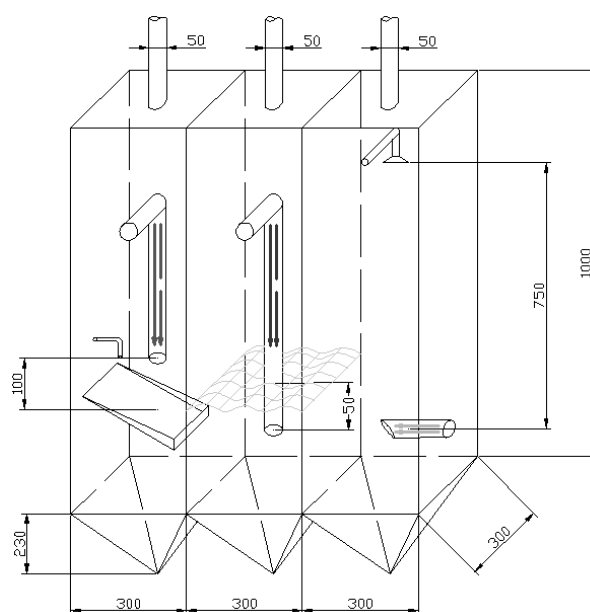


Rys. 1. Kolektory ciekłe formujące się w kierownicy aparatu przewałowego
 H – poziom napełnienia aparatu przewałowego, 1 – kierownica, 2 – strefa
 kropkowo-bryzgowa, 3, 4 – zwilżona powierzchnia kierownicy, 5 – strefa
 intensywnego barbotażu

Fig. 1. Liquide forming collectors oneself in wheel of apparatus type of Roto-Clone

Celem przeprowadzonych badań była analiza zjawiska zmiany skuteczności frakcyjnej wychwytywania pyłu wraz ze wzrostem stężenia zawiesiny w warunkach odpylania na kropkach, w warunkach barbotażu oraz podczas uderzenia w zwilżoną powierzchnię.

Prędkość przepływu zapyłonego gazu w poszczególnych komorach odpowiadała prędkości w kierownicy aparatu przewalowego generującej odpowiednie kolektory ciekłe. Prędkość przepływu gazu w komorze kropłowej przyjęto jak prędkość w swobodnym przekroju aparatu przewalowego, tj. 1,5 m/s. Prędkość wypływu powietrza w komorze barbożowej odpowiadała prędkości wylotowej z kanału kierownicy i wyniosła 12 m/s. Natomiast prędkość strumienia gazu kierowana na powierzchnię zwilżoną była równa prędkości w przewężeniu kierownicy równej 40 m/s.



Rys. 2. Charakterystyczne wymiary badanych komór

Fig. 2 Characteristic dimensions of the studied chambers

2. Stanowisko badawcze

Badany aparat składa się z trzech komór, w których w warunkach zmieniającego się stężenia zawiesiny analizowano niezależnie proces wydzielania pyłu w strefie kropłowej (5), podczas barbotażu (6) oraz podczas uderzenia o zwilżoną powierzchnię (7) (rys. 5). Aeroszol wytwarzano przez wprowadzanie pyłu do rurociągu wlotowego za pomocą dozownika (10). Na rurociągu wlotowym zainstalowano klasyfikator pneumatyczny (1), oddzielający frakcje pyłu powyżej $20\ \mu\text{m}$. Zapyłony gaz po przejściu przez aparat kierowany był do odpylacza przewalowego (15) w celu jego dokładnego oczyszczenia,

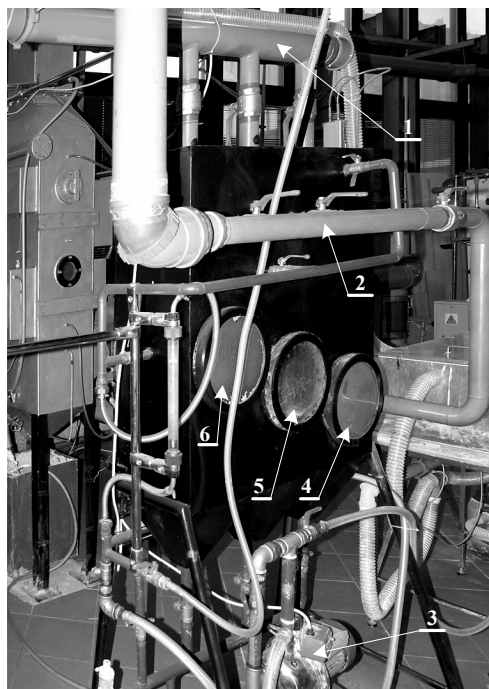
skąd przez odkraplacz (8) wyprowadzany był rurociągiem na zewnątrz budynku. Na pionowych odcinkach pomiarowych rurociągów wlotowego i wylotowego zainstalowano analogiczne układy do pomiaru stężenia pyłu, jego składu frakcyjnego, wilgotności gazu i temperatury, strumienia objętościowego przepływającego gazu oraz hydraulicznych oporów przepływu. Do wyznaczenia skuteczności frakcyjnej zastosowano wielostopniowe impaktory kaskadowe, pozwalające na wykonanie pomiaru bezpośrednio w rurociągu, bez konieczności uprzedniego wydzielenia niezbędnej do pomiaru ilości pyłu.

Na rysunku 2 pokazano charakterystyczne wymiary geometryczne komór, mające wpływ na skuteczność odpylania, tj. odległość dyszy od zwilżonej płaskiej powierzchni, wysokość zanurzenia rury barborażowej w cieczy oraz wysokość pustego skrubera natryskowego. Na rys. 3 i 4 pokazano na zdjęciach wybrane fragmenty stanowiska badawczego.



Rys. 3. Fragment stanowiska laboratoryjnego
1 – rurociąg wlotowy, 2 – rurociąg wylotowy,
3 – pomocniczy rurociąg pomiarowy na wlocie,
4 – sonda wlotowa pomocniczego odcinka pomiarowego, 5 – pomocniczy odcinek pomiarowy na wylocie, 6 – sonda wlotowa, 7 – układ pomiaru stężenia cząstek na wlocie, 8 – układ pomiaru stężenia cząstek na wylocie, 9 – sterowany dozownik cząstek, 10 – impaktor na wlocie, 11 – impaktor na wylocie, 12 – czujnik pomiaru natężenia przepływu strumienia aerozolu w stanowisku

Fig. 3. Fragment of the laboratory test stand

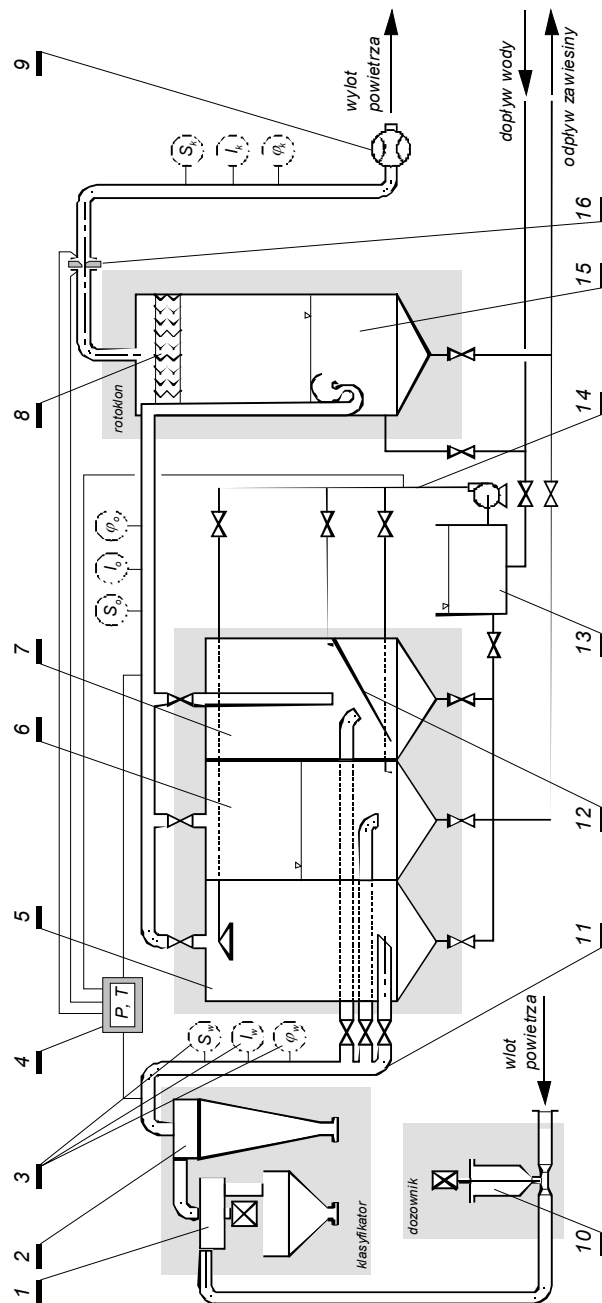


Rys. 4. Widok stanowiska
1 – rurociąg wlotowy, 2 – rurociąg wylotowy, 3 – pompa obiegowa zawiesiny, 4 – komora modelu kropłowego, 5 – komora modelu uderzeniowego, 6 – komora modelu pianowego

Fig. 4. View of the test stand

1. separator odśrodkowy
2. cyklon
3. układy pomiarowe: S - stężenie, I - skład frakcyjny, wlgotność
4. rejestrator ciśnienia i temperatury
5. komora z wydzieleniem pyłu na kropkach
6. komora z wydzieleniem pyłu podczas barbozażu
7. komora z wydzieleniem pyłu ze strumienia gazu uderzającego o powierzchnię
8. odkraplacz
9. wentylator
10. dozownik pyłu
11. kolektor rozpraszający gaz
12. zwilżana płaszczyna
13. zbiornik
14. rurociąg doprowadzające ciecz
15. aparat przevalowy
16. kryza kwadratowa

1. separator odśrodkowy
2. cyklon
3. układy pomiarowe: S - stężenie, I - skład frakcyjny, wlgotność
4. rejestrator ciśnienia i temperatury
5. komora z wydzieleniem pyłu na kropkach
6. komora z wydzieleniem pyłu podczas barbozażu
7. komora z wydzieleniem pyłu ze strumienia gazu uderzającego o powierzchnię
8. odkraplacz
9. wentylator
10. dozownik pyłu
11. kolektor rozpraszający gaz
12. zwilżana płaszczyna
13. zbiornik
14. rurociąg doprowadzające ciecz
15. aparat przevalowy
16. kryza kwadratowa

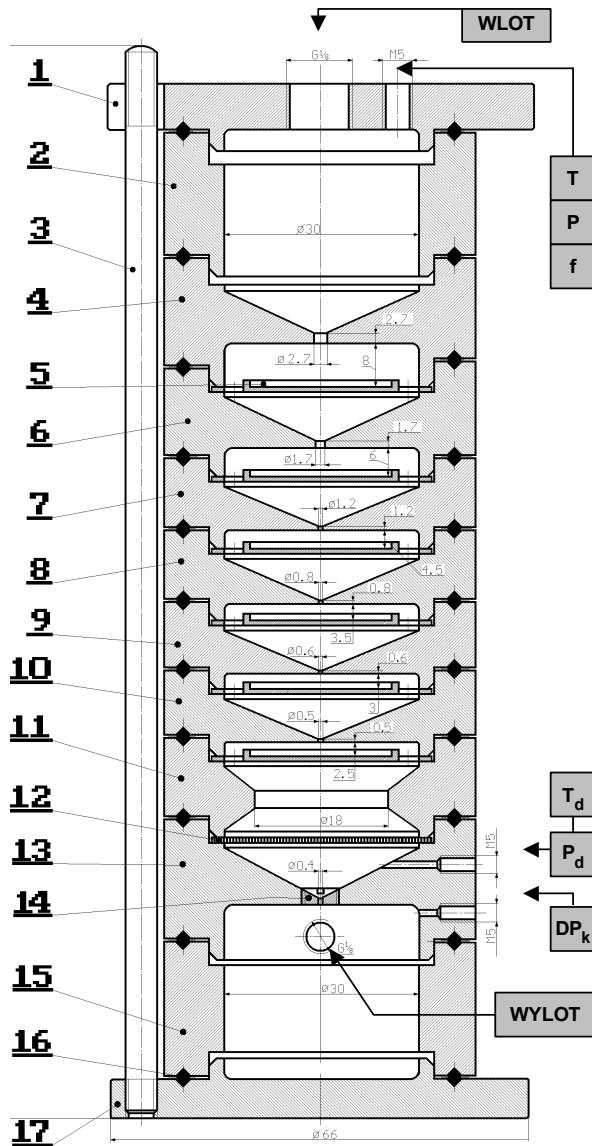


Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 5. Schematic draw of research stand

3. Metoda wyznaczania przedziałowej skuteczności osadzania cząstek

Przedziałową skuteczność odpylania w poszczególnych komorach wyznaczano dla wody czystej oraz dla zawiesiny w chwili potwierdzenia zmiany ogólnej skuteczności odpylania.



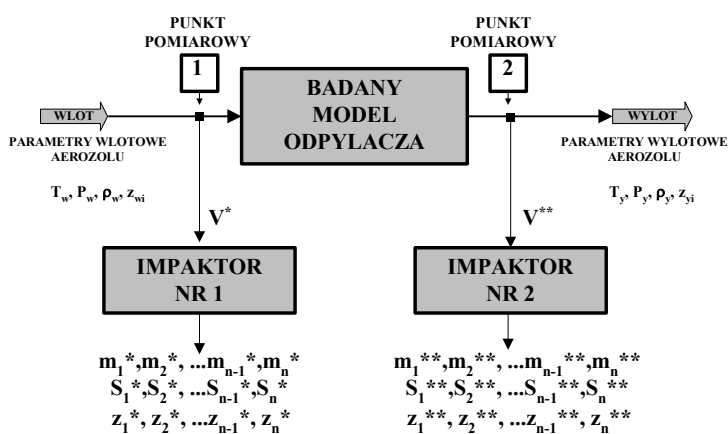
Rys. 6. Jednodyszowy impaktor kaskadowy I.A.P.iE

Fig. 6. Single-nozzle cascade impactor I.A.P.iE

Do wyznaczania przedziałowej skuteczności wybranego mechanizmu odpylania zastosowano w badaniach wielostopniowe, jednodyszowe impaktory kaskadowe własnej konstrukcji, w których do rozdziału cząstek pod względem ich wielkości wykorzystywany jest mechanizm bezwładnościowego osadzania na odpowiednio przygotowanych powierzchniach osadzania [4–6, 11]. Zakres pomiarowy wielostopniowych impaktorów kaskadowych obejmuje przedział wymiarów cząstek od około $0,05 \mu\text{m}$ do $20 \mu\text{m}$ i jest zakresem, w którym można oczekiwać największych różnic w przebiegach krzywych przedziałowej skuteczności zatrzymywania cząstek $\eta_p = f(d)$ poszczególnych mechanizmów osadzania. Dodatkową zaletą zastosowania impaktorów jest możliwość wykonania pomiaru bezpośrednio w przewodach wlotowym i wylotowym badanego modelu odpylacza, z pominięciem szeregu kłopotliwych i pracochłonnych czynności związanych z niezbędnym przygotowaniem próbek analizowanych cząstek, wymaganych w innych stosowanych metodach. Biorąc zatem powyższe argumenty pod uwagę, zaprojektowano i wykonano do badań dwa identyczne impaktory przedstawione schematycznie (z pominięciem układów pomiarowych) na rys. 6, natomiast istotę metody wyzna-

czania przedziałowej skuteczności odpylania η_p ilustruje rys. 7.

Ze względu na zróżnicowane wielkości strumieni aerozolu w impaktorach oraz w rurociągach głównych stanowiska, oba impaktory umieszczono w pomocniczych rurociągach pomiarowych (1) (rys. 8) o odpowiedniej długości i mniejszej średnicy. Zbieg ten pozwolił dopasować prędkości wlotowe w sondach impaktorów do prędkości aerozolu w rurociągach głównych stanowiska. Charakterystyczne wymiary cząstek zatrzymywanych na poszczególnych stopniach obu impaktorów \bar{d}_i dla umownej gęstości $\rho_c = 1000 \text{ kg/m}^3$ oraz umownych parametrów strumienia powietrza w impaktorze ($b_0 = 750$, $T_0 = 293 \text{ K}$) wynosiły: 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0 i 16 μm .

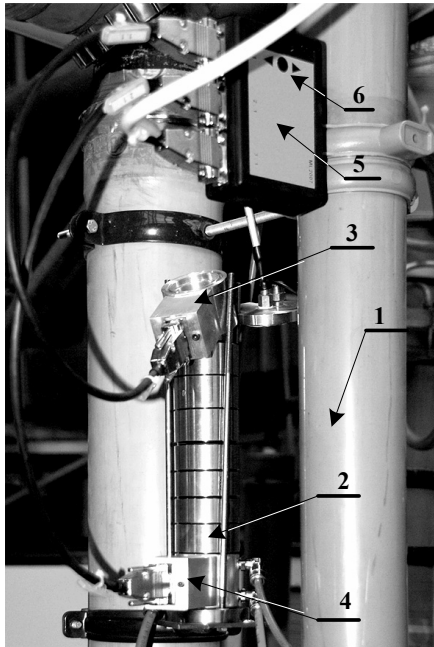


Ryc. 7. Schemat pomiaru przedziałowej skuteczności odpylania

Fig. 7. Schematic setup for fractional separation efficiency

Po przeprowadzeniu niezbędnych obliczeń wyniki pomiarów impaktorami reprezentował ciąg dyskretnych wartości masowych udziałów frakcyjnych cząstek z_i w strumieniach aerozolu na wlocie z_i^* i wylocie z_i^{**} z badanego modelu odpylacza.

Wyznaczone udziały z_i przyporządkowane były każdorazowo (przeliczano dla aktualnych parametrów termicznych strumienia analizowanego w impaktorze gazu) konkretnym wartościom charakterystycznych wielkości cząstek \bar{d}_i osadzanych na poszczególnych stopniach. Uzyskane w pomiarach wartości z_i stanowiły podstawę do opracowania statystycznych zależności średnich skumulowanych udziałów cząstek $z_i = f(d_i)$ w obu punktach pomiarowych i w końcowym etapie funkcyjnych zależności przedziałowej skuteczności $\eta_D = f(d)$ badanego modelu. Przy opracowywaniu wyników badań uwzględniano zróżnicowany czas poboru próbek do obu impaktorów przez wprowadzenie odpowiednich współczynników korekcyjnych [7–10]. Z reguły bowiem czas poboru próbki aerozolu do impaktora na wylocie z badanego modelu był – ze względu na niższe wartości stężeń wylotowych cząstek – wielokrotnie dłuższy od czasu poboru próbki do impaktora usytuowanego na wlocie. Najczęściej przy czasie poboru próbki do impaktora wlotowego rzędu 5–10 min. analogiczny czas poboru próbki do impaktora wylotowego wahał się w przedziale 20–35 min.



Rys. 8. Impaktor wylotowy

1 – pomocniczy rurociąg pomiarowy, 2 – impaktor,
3 – głowica wlotowa impaktora wraz
z przetwornikami ciśnienia, temperatury
i wilgotności, 4 – głowica wylotowa impaktora
zawierająca dyszę krytyczną oraz przetwornik ΔP_{kr} ,
5 – układ wzmacniaczy sygnałów z przetworników
obu głowic oraz sygnalizator przepływu
krytycznego przez dyszę krytyczną

Fig. 8. Outlet impactor

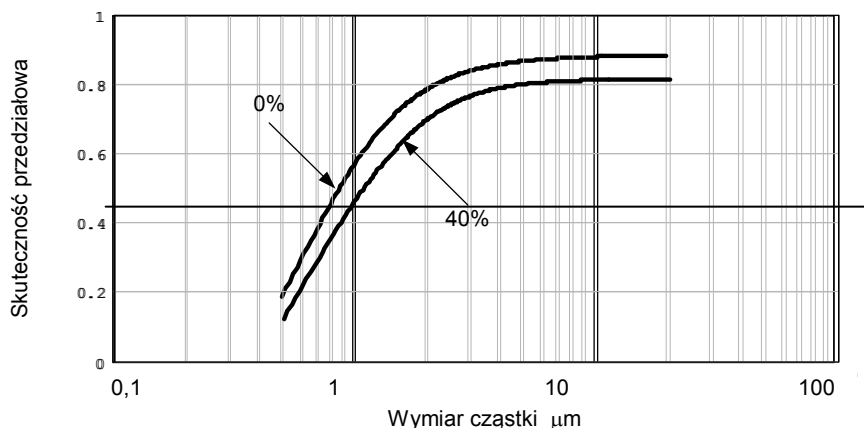
Charakterystyczne wymiary cząstek \bar{d}_i osadzane na poszczególnych stopniach obu impaktorów, jak już wspomniano, wyznaczano każdorazowo – ze względu na zmienne aktualne parametry termiczne strumienia analizowanego aerozolu – z zależności [4–6]

$$\bar{d}_i = \sqrt{\psi_i} \cdot \sqrt{\frac{18 \cdot \mu_{gi} \cdot D_i^3}{\rho_c \cdot C_i \cdot V_g^*}} = \sqrt{\psi_i} \cdot \sqrt{\frac{9}{2} \pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{gi} \cdot D_i^3 \cdot \rho_{gi}}{\rho_c \cdot C_i \cdot m_g}} \quad (1)$$

w której: ψ_i jest bezwładnościowym parametrem osadzania dla rozważanego stopnia impaktora, wyznaczonym w procesie cechowania obu impaktorów, μ_{gi} , ρ_{gi} jest odpowiednio lepkością oraz gęstością strumienia aerozolu w przekroju wypływowym z dyszy danego stopnia impaktora o średnicy D_i , ρ_c jest gęstością materiału analizowanych cząstek, C_i jest poprawką Cunninghama dla wielkości cząstek osadzanych na danym stopniu impaktora, a m_g jest masowym strumieniem aerozolu przepływającym przez impaktor podczas pomiaru. Tę ostatnią wielkość dobrano obliczeniowo dla przyjętego uprzednio ciągu wartości \bar{d}_i oraz ustalono w trakcie cechowania impaktorów, montując na ich wylotach identyczne dysze krytyczne o odpowiedniej średnicy. Przy opracowywaniu wyników badań η_p korzystano z opracowanych we własnym zakresie programów obliczeniowych, uwzględniających wpływ wszystkich istotnych parametrów procesu [6–10].

4. Wyniki badań

Badania skuteczności odpylania pyłu talku w wodzie przeprowadzono dla różnych ciekłych kolektorów, występujących w mokrych urządzeniach odpylających. Na przedstawionym w referacie stanowisku badawczym istniała możliwość określenia wpływu tych kolektorów na uzyskiwaną skuteczność odpylania, dla różnych stężeń zawiesiny pyłu w wodzie. Przyjmując, że w każdej komorze stanowiska badawczego dominującą rolę odgrywa tylko jeden kolektor, badania przeprowadzono dla przypadku barbotażu, wykorzystania efektu wylapywania pyłu przez rozpylony strumień wody, zatrzymywania cząstek pyłu na powierzchni zwilżonej. Autorzy zdają sobie sprawę, że każdemu z wyżej wymienionych kolektorów towarzyszą inne. Przykładowo w komorze intensywnego barbotażu, w warunkach dużej prędkości przepływającego strumienia zapyłonego gazu tworzy się warstwa kropłowa, sprzyjająca efektowi odpylania. Można jednak uznać, że udział innych, towarzyszących kolektorów jest niewielki i o skuteczności odpylania decyduje obecność kolektorów podstawowych.

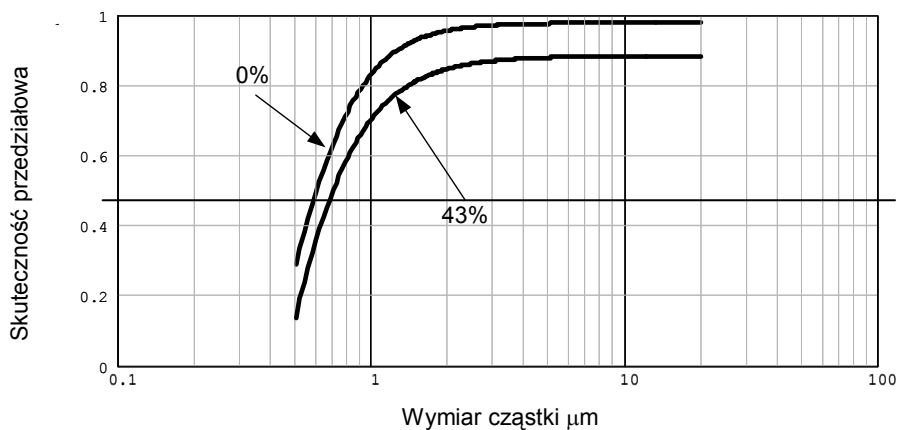


Rys. 9. Skuteczność przedziałowa w funkcji wymiaru cząstki dla powierzchni zwilżonej i stężenia talku w wodzie 0 i 40 %

Fig. 9. Fractional effectiveness on function of particle diameter for moisten surface and talc concentration in water 0 % and 40 %

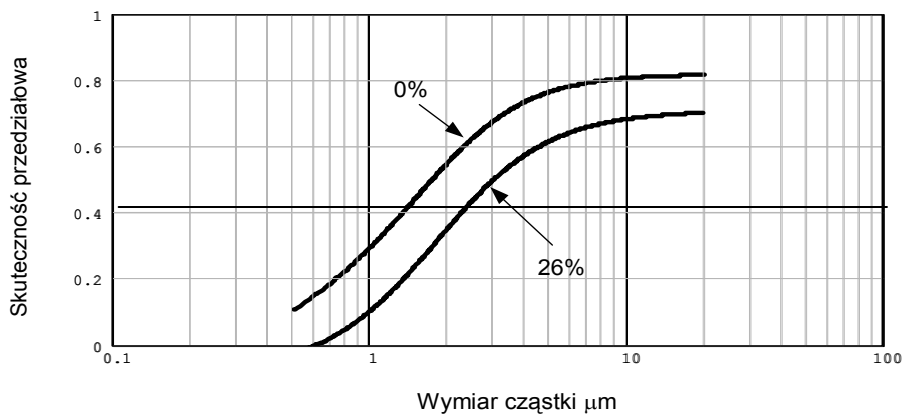
Na kolejnych wykresach 9–12 przedstawiono wyniki badań przedziałowej skuteczności odpylania dla trzech kolektorów ciekłych. Wykres 9 przedstawia wyniki pomiarów uzyskane podczas odpylania pyłów talku na powierzchni zwilżonej. Badania przeprowadzono dla wody czystej zraszającej powierzchnię oraz dla zawiesiny talku w wodzie 40%. Z przeprowadzonych badań wynika, że stężenie talku w wodzie ma wpływ na uzyskiwaną skuteczności odpylania. Skumulowana krzywa przedziałowej skuteczności odpylania dla stężenia 40% przebiega poniżej krzywej odpowiadającej czystej wodzie. Wskazuje to na fakt występowania zjawiska nie zatrzymywania części pyłów talku przez ciecz nasyconą już tymi pyłami. Uderzające pyły talku nie są przez zawiesinę pochłaniane, gdyż odbijają się od wcześniej zatrzymanych w zawieszynie cząstek pyłu. W efekcie uzyskujemy obniżenie całkowitej i przedziałowej skuteczności odpylania. Znajomość takiego progowego stężenia zawiesiny talku w wodzie, przy którym następuje wyraźne

obniżenie skuteczności odpylania, pozwoli na prawidłową i oszczędną gospodarkę wodą w urządzeniach odpylających. Przyczyni się do mniejszego zapotrzebowania wody w odpylaczach do pracy ciągłej, zmniejszenia gabarytów urządzeń w oczyszczalni ścieków oraz pozwoli określić czas pracy mokrych urządzeń odpylających pracujących okresowo.



Rys. 10. Skuteczność przedziałowa w funkcji wymiaru cząstki dla barbotażu i stężeniu talku w wodzie 0 i 43%

Fig. 10. Fractional effectiveness on function of particle diameter for barbotage and talc concentration in water 0 and 43%



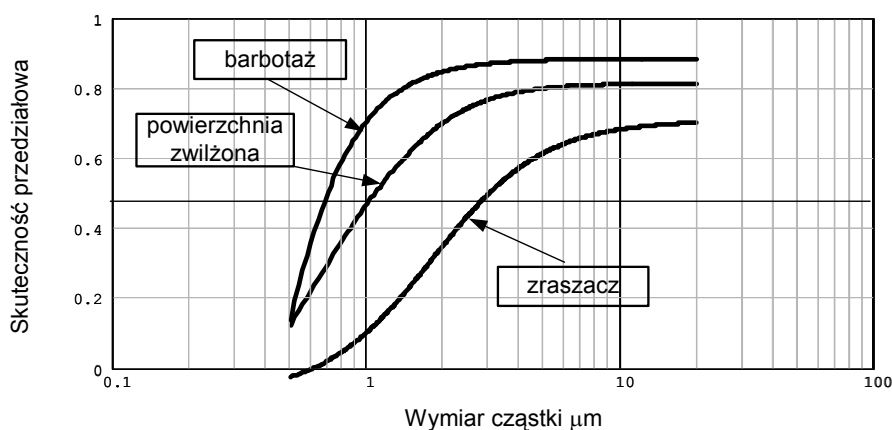
Rys. 11. Skuteczność przedziałowa w funkcji wymiaru cząstki dla zraszacza i stężeniu talku w wodzie 0 i 26%

Fig. 11. Fractional effectiveness compartment on function of particle diameter for sprinkler and talc concentration in water 0 and 26%

Na kolejnych wykresach (rys. 10 i 11) przedstawiono zależności dla barbotażu i ciekłych kolektorów tworzących się wskutek wyłapywania pyłu przez rozpylony strumień wody wytwarzany przez zraszacz. Charakter krzywych jest podobny, a w obu wypadkach

przedziałowe skuteczności dla zawiesiny talku w wodzie przebiegają poniżej przypadku odpylania w wodzie czystej.

Na wykresie 12 przedstawiono wyniki badań skuteczności odpylania w zawieszynie talku w wodzie dla trzech omawianych tutaj kolektorów. Z wykresu wynika, że najwyższe skuteczności osiągnięto dla barbotażu. Jest to zrozumiałe, gdyż dla tych kolektorów stanowiących pęcherze gazu, ze względu na rozwiniętą i ciągle odnawiającą się powierzchnię międzyfazową, następuje bardzo intensywny proces wymiany masy, czyli również odpylania. Dla dwóch pozostałych kolektorów w trakcie badań osiągnięto dużo niższe skuteczności odpylania. Przy uzyskanych około 90% skuteczności odpylania dla barbotażu, dla zraszacza skuteczność spadła aż do poziomu 70%.



Rys. 12. Porównanie skuteczności przedziałowej w funkcji wymiaru cząstki dla barbotażu, powierzchni zwilżonej, zraszacza i granicznych wartości stężenia talku w wodzie

Fig. 12. Comparison fractional effectiveness on function of particle diameter for barbotage, moisten surface, sprinkler and border talc concentration in water

Podsumowując przedstawione badania, można stwierdzić, że najwyższe skuteczności można osiągnąć dla przypadku barbotażu, dla którego wyraźny spadek skuteczności zaobserwowano dopiero dla stężenia talku w wodzie wynoszącego 43%. Najgorsze wyniki skuteczności odpylania uzyskano dla zraszacza, dla stężenia talku w wodzie wynoszącym tylko 26%.

5. Uwagi końcowe

1. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów można stwierdzić, że na badanych kolektorach zaobserwowano istotne zmiany skuteczności frakcyjnej przy dużych stężeniach zawiesiny. Należy podkreślić, iż tak duże stężenia zawiesiny nie są w praktyce stosowane ze względu na trudności eksploatacyjne aparatów.
2. Przeprowadzone pomiary nie wykazały jednoznacznie, czy obniżenie skuteczności frakcyjnej ma związek ze zmienną zdolnością pochłaniania przez fazę ciekłą, czy też jest spowodowane zmianą formowania się kolektorów.

3. Powyższy efekt będzie zweryfikowany podczas prób określenia zmian zdolności pochłaniania zawiesiny w warunkach pracy uderzeniowej zapyłonego strumienia gazu o powierzchnię cieczy.

Oznaczenia

C	– poprawka Cunninghama	
d	– średnica cząstki	[m]
D	– średnica dyszy impaktora	[m]
i	– odnosi się do i -tego stopnia impaktora	
m_g	– wielkość strumienia wlotowego	[kg/s]
η_p	– skuteczność frakcyjna	[%]
μ_g	– współczynnik lepkości dynamicznej	[Pa s]
ρ_c	– gęstość cząstek	[kg/m ³]
ρ_g	– gęstość gazu	[kg/m ³]
Ψ	– współczynnik osadzania inercyjnego	

Literatura

- [1] Kasz J., Krawczyk J.: Filtration and Separation, Vol. 26, 1988, 430-433.
- [2] Krawczyk J., Dyląg M., Rosiński J.: Gefahrstoffe. Reinhaltung der Luft. **1/2**, 1998, 45-49.
- [3] Krawczyk J., Wisła H.: Czasopismo Techniczne z.5-M/2003, 251-249.
- [4] Marple V. A., Willeke K.: Atmospheric Environment, **10**, 1976, 891-896.
- [5] Newton G. J., Raabe O. G., Mokler B. V.: J. Aerosol Sci., **8**, 1977, 339-347.
- [6] Dyląg M., Maszek L., Rosiński J., Roszak Z.: *Calibration of cascade impactors*, Polish Academy of Sciences, Commission of Motorization, Vol.4, 1991, 141-153.
- [7] Maszek L., Mieszkowski A., Roszak Z.: Czasopismo Techniczne z. 1-M/1995, 97-106.
- [8] Maszek L.: Czasopismo Techniczne, z. 8/1996, 75-84 i 85-97.
- [9] Maszek L.: Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów, **32**, 1998, 159-163.
- [10] Maszek L.: Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów, **33**, 1999, 87-92.
- [11] *Staubmessung in strömenden Gasen, Fraktionierende Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren - Kaskadenimpaktor*, VDI - Richtlinien, VDI 2066, VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 4, Nov., 1994.

Praca naukowa nr 1T09 D023 30 finansowana ze środków na naukę w latach 2006–2008.