

KRYTERIA DOBORU WŁAŚCIWOŚCI PRZYRZĄDÓW DO AUTOMATYCZNEGO POMIARU STĘŻENIA PYŁU PM₁₀ I PM_{2,5} W IMISJI

Stanisław KAMIŃSKI^{1,2,3}, Dorota KAMIŃSKA³

¹Polski Komitet Normalizacyjny, Komitet Techniczny ds. Jakości Powietrza

²Europejski Komitet Normalizacyjny CEN / TC 264 / WG15

³KAMIKA Instruments, ul. Strawczyńska 16, 01-473 Warszawa, info@kamika.pl

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono aerodynamiczną analizę obecnych przyrządów pomiarowych opisanych w normach EN-PN 12341-1 [1] i EN-PN 14907 [2] do pomiaru imisji. W niniejszym referacie autorzy chcą przedstawić, że zaniedbanie takiej analizy spowodowało powszechne błędy pomiarowe przy określaniu stężenia PM i przez udowodnienie tego faktu doprowadzić do ograniczenia używania obecnych próbników do warunków bezwietrznych. Ich właściwe użycie oraz użycie przyrządów wykorzystujące izokinetyczne metody pomiarowe spowoduje określenie rzeczywistych stężeń zanieczyszczenia powietrza i wówczas się dowiemy w jakich warunkach żyjemy i czym oddychamy.

1. Wprowadzenie

Wszystkie stosowane obecnie konstrukcje próbników można porównać do naczynia o przekroju kołowym z przykrywką. Wewnątrz szczeliny pomiędzy naczyniem o przekroju kołowym a przykrywką jest komora, z której zasysa się powietrze do dysz impaktorów. Ewentualne stosowanie siatek na owady wokół szczeliny zwiększa opory przepływu przez szczelinę, ale niczego nie zmienia.

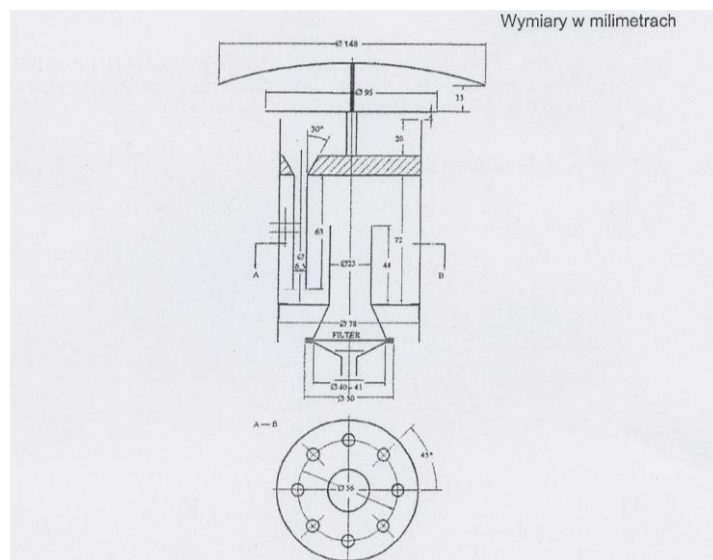
Podstawowym elementem konstrukcji próbników jest zespół impaktorów o parametrach geometrycznych umożliwiających przechwycenie cząstek większych niż 10 μm lub 2,5 μm . Do przechwycenia określonych cząstek niezbędna jest stała prędkość przepływu powietrza. To powietrze jednostajnie przepływa przez wcześniej wspomnianą szczelinę do komory nad impaktorami. Gdy próbnik zasysa powietrze ze spokojnej atmosfery to przepływy są stabilne, prawidłowe i takim przyrządem można mierzyć stężenie zanieczyszczenia powietrza. Lecz co się zmieni gdy zawieje wiatr?

Dla uzyskania odpowiedzi przeprowadzimy rozważanie na przykładzie próbniaka LVS (Low Volume Sampler) według normy EN 12341 co może być równoznaczne z próbnikami z listy US EPA (RFPS – 1298-127).

Konstrukcję głowicy LVS-PM₁₀ przedstawiono na rys. 1. Z zewnątrz głowica wygląda jak walcowe naczynie o średnicy $D = 78 \text{ mm}$, z przykrywką. Pomiedzy krawędzią naczynia, a przykrywką znajduje się szczelina o szerokości $h = 4 \text{ mm}$.

2. Teoretyczny opis opływu walca ze szczeliną

Aerodynamiczny model opływu LVS przez wiatr można podzielić na dwie fazy. Pierwsza, przy prędkości wiatru porównywalnej lub niewiele większej od prędkości zasysania w szczelinie analizatora, to jest do 2 m/s – zasysane cząstki wypadają z głowicy prostopadle do kierunku wiatru. W drugiej, przy prędkości wiatru powyżej 2 m/s, cząstki mogą wypadać z komory nad impaktorami zgodnie z kierunkiem wiatru. Podział ten nie jest precyzyjny, ale umożliwia rozróżnienie dwóch rodzajów przepływów przez głowicę.



Rys. 1. Próbnik według normy EN12341

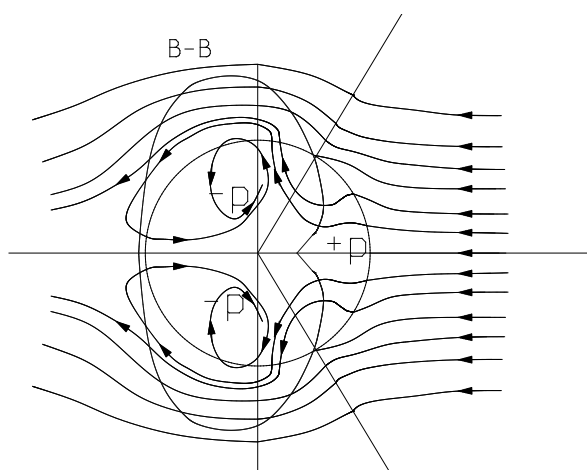
Opływ powietrza można opisać na dwa sposoby:

- 1) przez opis opływu idealnego, gdy nie uwzględnia się lepkości powietrza;
- 2) przez opis opływu rzeczywistego, z uwzględnieniem tarcia powietrza o ściankę opływającego konturu.

W przypadku małych prędkości 0-10 m/s różnice pomiędzy opływem idealnym a rzeczywistym są nieduże. Dlatego rozpatrzono rzeczywiste rozkłady prędkości i ciśnienia, a ich wartości podano jak dla przepływu idealnego. Opisy takich opływów podają John J. Bertin (2002) [3] i John D. Anderson(2005) [4].

Do określonego wokół szczeliny rozkładu ciśnień można dodać rozkład ciśnienia od zasysanego powietrza do wnętrza przyrządu.

Sumaryczny rozkład prędkości powoduje, że dla pewnych stref obwodu naczynia nie tylko nie ma zasysania cząstek, ale jeszcze jest wyrzut cząstek wpływających od strefy nawietrznej i częściowo zawietrznej do wnętrza komory nad impaktorami (rys. 2).

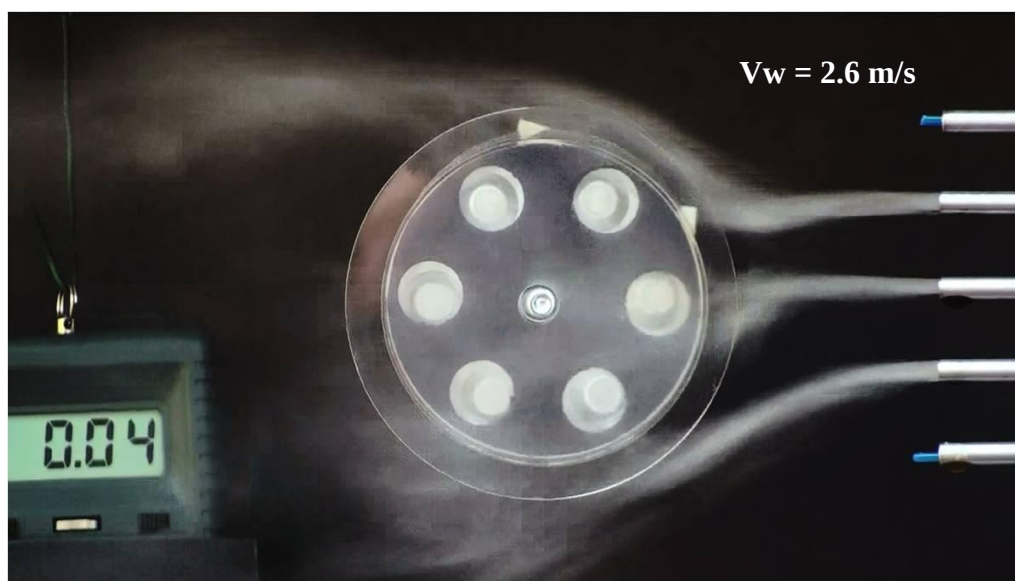


Rys. 2. Rozkład linii prądu dla opływu zewnętrznego i przepływu wewnętrznego podczas wiatru poniżej 2 m/s

3. Wizualizacja opływu

Zgodnie z teoretycznymi prawami aerodynamiki, również badania w tunelu aerodynamicznym całkowicie potwierdziły, że sposób użycia walca ze szczeliną nie jest przydatny do pomiarów zanieczyszczenia powietrza. Posługując się modelem widocznym na rys. 1, zachowując wydatek powietrza przepływający przez próbnik równy $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$ i stosując prędkość wiatru od 0 do 10 m/s uzyskano przewidywane opływy zewnętrzne i wewnętrzne przepływy przez szczelinę, które przedstawiają się jak opisano poniżej.

Przedstawione poniżej zdjęcia są wykonane jako stopklatki z filmów dokumentujących wizualizację badań w tunelu aerodynamicznym. Filmy zamieszczone są w serwisie www.youtube.com/kamikadotpl. Wizualizacja przedstawiona na rys. 3 wykazuje wielokrotnie większy wpływ warunków zewnętrznych na przechwycenie cząstek za pomocą próbnika niż zasysanie wewnętrzne.



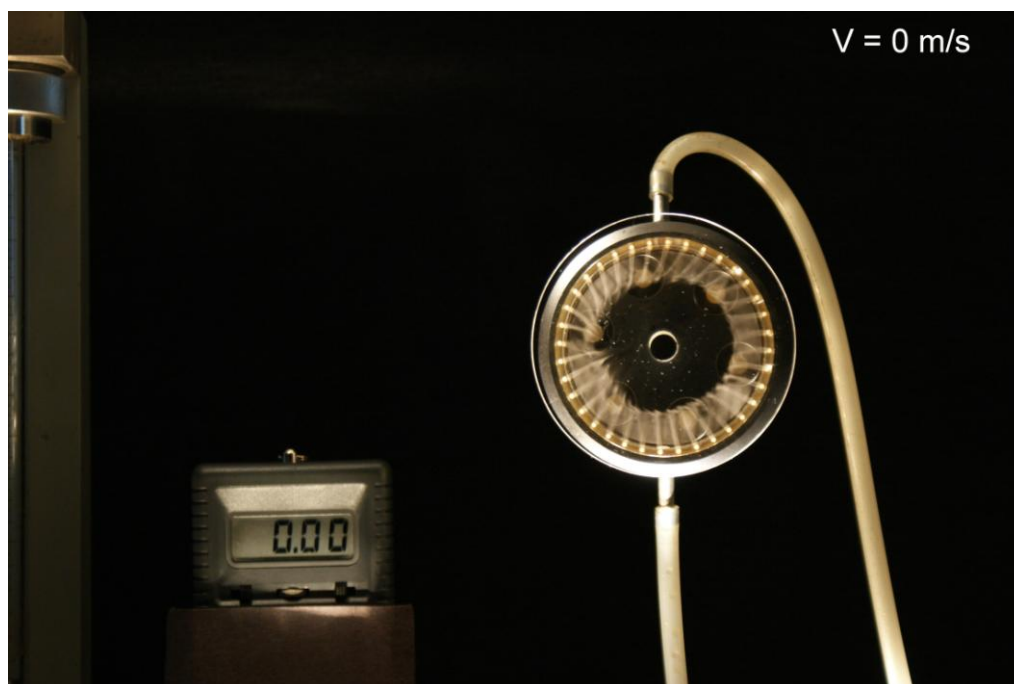
Rys. 3. Opływ filtrujący powietrze wokół próbnika.

Przy stałej prędkości przepływu przez impaktory nie można stworzyć izokinetycznego przepływu na wlocie do próbnika, gdy wieje wiatr. Wówczas z przepływu nad impaktorami nie można odebrać reprezentatywnej próby zanieczyszczenia powietrza, ponieważ nadmiar powietrza, jaki wywołuje wiatr, nie tylko nie przepływa przez impaktory, lecz utrudnia penetrację cząstek do impaktorów.

Należy tu podkreślić, iż gęstość powietrza jest ok. 800 razy mniejsza od gęstości wody i 10 000 razy mniejsza od ołowiu. Powoduje to duże różnice w cząsteczkowych i powietrznych siłach bezwładności, co powoduje, że do impaktorów jest zasysane powietrze zawierające mniej cząstek, a różnica w zasysaniu zależy od gęstości cząstek. Poza tym kształt cylindra ze szczeliną o niskiej wydajności aerodynamicznej wg Idelchika [5] (0,8 strat przepływu) powoduje zmiany kierunku przepływu i przyspieszenia powietrza. Ma to wpływ na dodatkową filtrację powietrza poza pobornikiem AS (Air Sampler). Rys. 3. przedstawia rzeczywisty opływ wokół próbnika, który jest w pewnym stopniu proporcjonalny do prędkości wiatru i przy dalszym zwiększaniu prędkości wiatru opływ nieznacznie się zmienia gdy szczelina jest wąska.

4. Wizualizacja przepływu wewnątrz AS w komorze nad impaktorami

Dla potwierdzenia wniosków dotyczących przepływów wewnętrznych wynikających z wizualizacji opływu zewnętrznego wykonano dodatkowe badania wykorzystujące AS zgodny z EN 12341. W tym celu w pogrubionej (3 mm) i przezroczystej ścianie AS wywiercono 36 otworów o średnicy 1,4 mm, które połączone były kanałem wytoczonym na zewnętrznej powierzchni AS, w odległości 30 mm od krawędzi szczeliny.

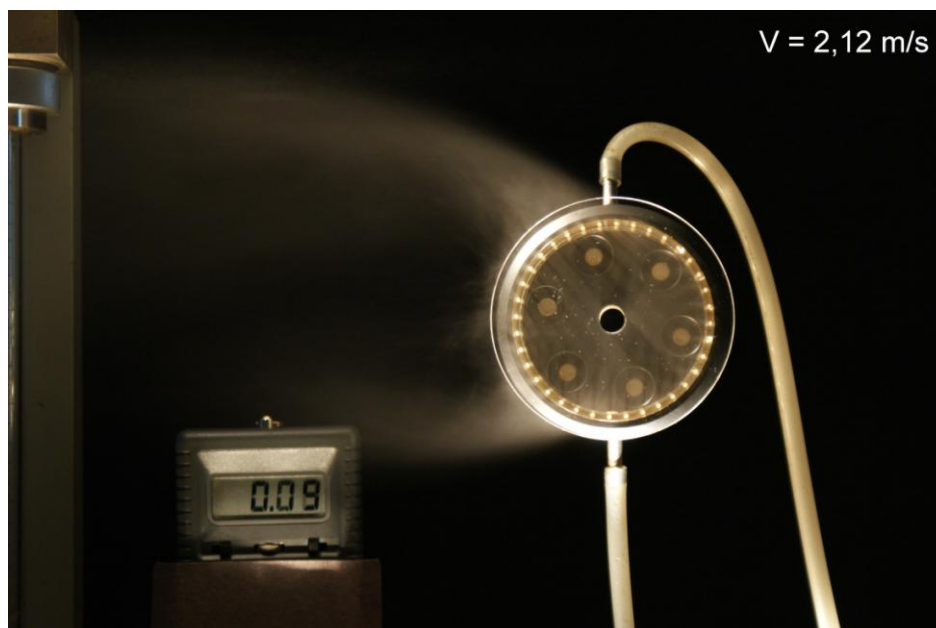


Rys. 4. Przepływ bez wiatru

W spokojnej atmosferze, gdy nie było wiatru, przepływ powietrza wewnątrz AS był prawidłowy, to znaczy, że zasysane przez szczelinę powietrze całkowicie wraz z zanieczyszczeniami wpływało do dysz impaktorów.

Gdy zaczynał wiać wiatr, to od strony nawietrznej sumaryczna prędkość wiatru i zasysanego powietrza zaczynała wydłużać tory lotu cząstek (rys. 5).

Na średnicy prostopadłej do kierunku wiatru część cząstek jest wyrzucana na zewnątrz.



Rys. 5. Powiększająca się strefa wydmuchu i zanikający wpływ powietrza od strony zawietrznej

Przy zwiększaniu prędkości wiatru (rys. 5) proces przedmuchu zgodny z kierunkiem wiatru w komorze impaktorów na poziomie szczeliny staje się intensywniejszy.

4. Analiza efektu filtrującego w obecności wiatru

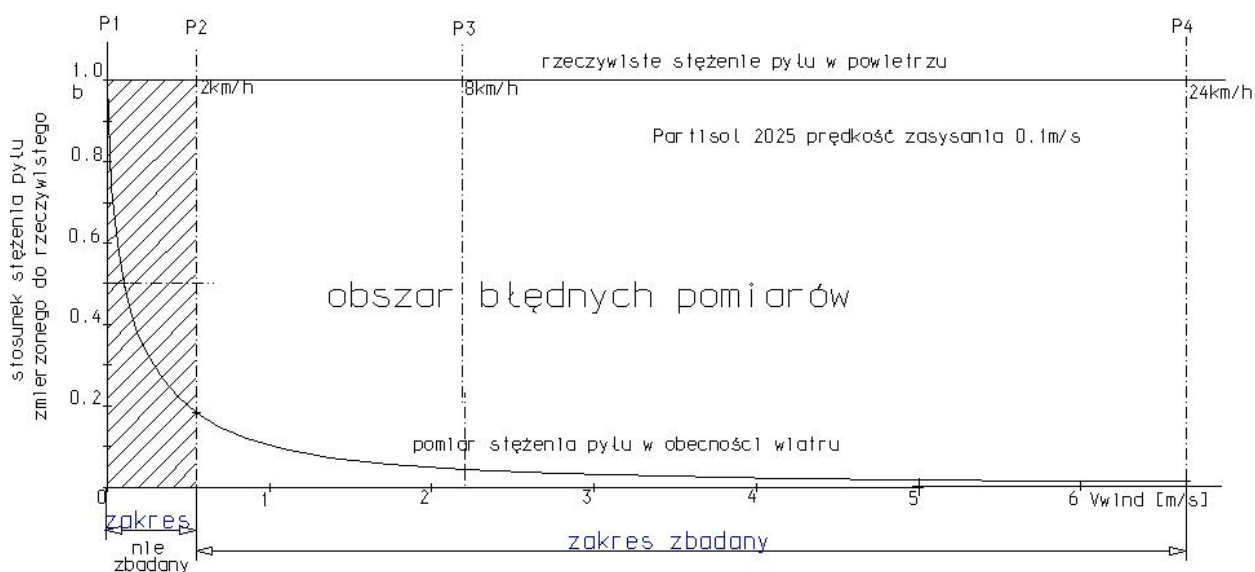
Powyższe rozważania dotyczą wszelkiego rodzaju i kalibru próbników według listy US EPA [6] i norm EN 12341 oraz EN 14907. Różnicą pomiędzy próbnikiem PM10 a PM2,5 oprócz geometrii impaktorów może być szerokość szczeliny – dla próbników PM10 wynosi 4 mm, a dla próbników PM2,5 – od 4 do 8 mm. Dla próbników PM2,5 i szerszej szczeliny będzie mniej intensywne odsysanie cząstek prostopadle do kierunku wiatru, ale za to intensywniejszy będzie przepływ wzdłuż osi wiatru, od punktu spiętrzenia do zawietrznej.

Przy opracowaniu tej metody zbadano zmiany stężenia zanieczyszczenia powietrza dla znaczących prędkości wiatru, gdzie w przypadku małych zmian prędkości wiatru (dążą asymptotycznie do zera) przyjęto, że wiatr nie ma wpływu na zmiany stężeń zanieczyszczenia powietrza. Błędy metody spowodowane są złym rozpoznaniem warunków aerodynamicznych przez amerykańskich autorów tej metody, ponieważ nie zbadano wpływu wiatru o prędkościach mniejszych, porównywalnych z prędkością zasysania powietrza, gdzie wpływ zmian wiatru na zmiany stężenia zanieczyszczenia powietrza jest bardzo duży.

Pomiar imisji według metody opisanej w normach EN12341 i EN14907 odbywa się przy stałej prędkości zasysania przez szczelinę, niezależnie od prędkości wiatru. Konstrukcja urządzeń zasysających nie pozwala na jakąkolwiek zmianę prędkości zasysania. Poza tym, zastosowanie kształtu urządzenia (słoik z pokrywką) przeczy wszelkim zasadom aerodynamiki dla izokinetycznego poboru powietrza przy wiejącym wietrze. Dlatego ze wzrostem prędkości wiatru stężenie cząstek asymptotycznie spada do zera. Przez tę asymptotyczną zależność popełniono błąd w ocenie metody pomiaru rozumując następująco: jeśli przy zmianie dużych prędkości wiatru (2-10 m/s) zmiany stężenia zanieczyszczeń są bardzo małe, to przy zmianach małych prędkości wiatru (0,1-0,6 m/s) zmiany stężenia zanieczyszczeń będą jeszcze mniejsze.

A to nieprawda! Przy stałej prędkości zasysania (bardzo małych prędkościach 0,1-0,6 m/s) i porównywalnych prędkościach wiatru, następuje proces aerodynamicznego wyrzucania cząstek stałych na zewnątrz słoika. Ze wzrostem prędkości wiatru zjawisko to powoduje, że przyrząd praktycznie nie mierzy właściwego stężenia zanieczyszczenia powietrza i nie są to małe błędy, mogą one dochodzić do kilkudziesięciu procent właściwego stężenia w powietrzu lub inaczej – wielokrotnego zwiększenia uzyskanych wyników pomiarów, co spowoduje duże zmiany na mapach odzwierciedlających zanieczyszczenie powietrza w Europie.

To względnie zawile tłumaczenie wyjaśnia rys. 6, gdzie uwzględniony jest wpływ wiatru na stężenie cząstek przy stałej nieizokinetycznej prędkości zasysania.



Rys. 6. Zależność pomiarów stężenia pyłu od prędkości wiatru.

Dotychczas, typowo, pomiary były wykonywane w punktach P2, P3, P4, nikt nigdy nie wykonał pomiarów pomiędzy P1 i P2.

Zależności przedstawione na rys. 6 można opisać warunkami brzegowymi oraz stosunkiem sił aerodynamicznych działających na cząstkę od prędkości zasysania i prędkości unoszenia przez wiatr. Wystarczy zauważyć, że stosunek stałej siły od zasysania i przeciwstawnej zmiennej siły od prędkości wiatru najpierw zdecydowanie się zmniejsza, aby w końcu asymptotycznie dążyć do zera gdy wiatr wzrasta. Jest to typowy przebieg funkcji $y = A/X$. Gdy za „A” podstawimy siłę aerodynamiczną od prędkości zasysania:

$$A = \frac{1}{2g} C_a \cdot \gamma \cdot S \cdot V_{zasysania}^2 \quad (1)$$

i za „X” zmienną siłę od prędkości wiatru:

$$X = \frac{1}{2g} \cdot C_x \cdot \gamma \cdot S \cdot V_{wiatru}^2 \quad (2)$$

oraz uzupełni się te wyrażenia wzorem według prawa Stokes’a na współczynnik oporu:

$$C = \frac{24}{Re} = \frac{24\mu}{V \cdot d \cdot g} \quad (3)$$

to otrzymamy funkcję $y = V_{zasysania} / V_{wiatru}$.

Należy tu wspomnieć, że dla próbnika LVS zgonie z normą EN 12341, przy wietrze 1 m/s i temperaturze 20°C liczba Reynoldsa równa jest $Re = 0,5$. To pozwala zastosować formułę Stokes'a na współczynnik oporu. Funkcję „y” można wprowadzić do wzoru na określanie koncentracji bieżącej K_b zależnej od wiatru w stosunku do koncentracji całkowitej K_t w przypadku braku wiatru:

$$K_b = K_t \left(1 - \frac{1}{n \cdot y + 1} \right) = K_b = K_t \cdot b \quad (4)$$

Rozważając następujące przypadki (dla $n = 1$):

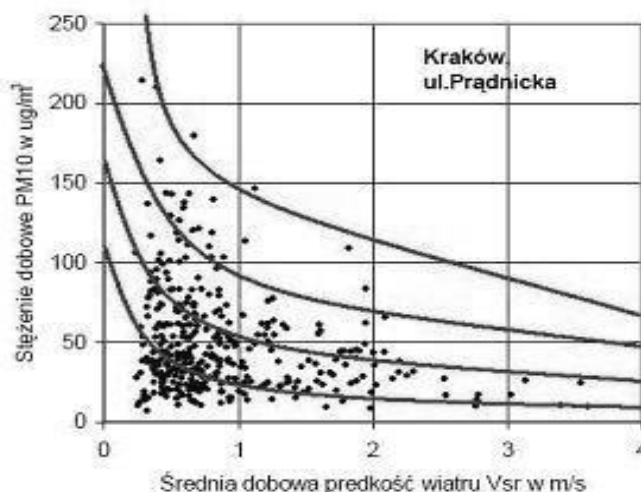
$V_w = 0$	$y = \infty$	$K_b = K_t$
$V_w = V_z$	$y = 1$	$K_b = 0,5 K_t$
$V_w \rightarrow \infty$	$y \rightarrow 0$	$K_b = 0$

wybrana funkcja dobrze spełnia warunki brzegowe. Przedstawiony model obejmuje wszystkie cząstki do PM 10. Koncentracja bieżąca K_b jest w pewien sposób proporcjonalna do wyników według tego wzoru. Liczba n jest współczynnikiem proporcjonalności pomiędzy powyższą teorią, a pomiarami rzeczywistymi uzyskanymi przez obecnie używane AS.

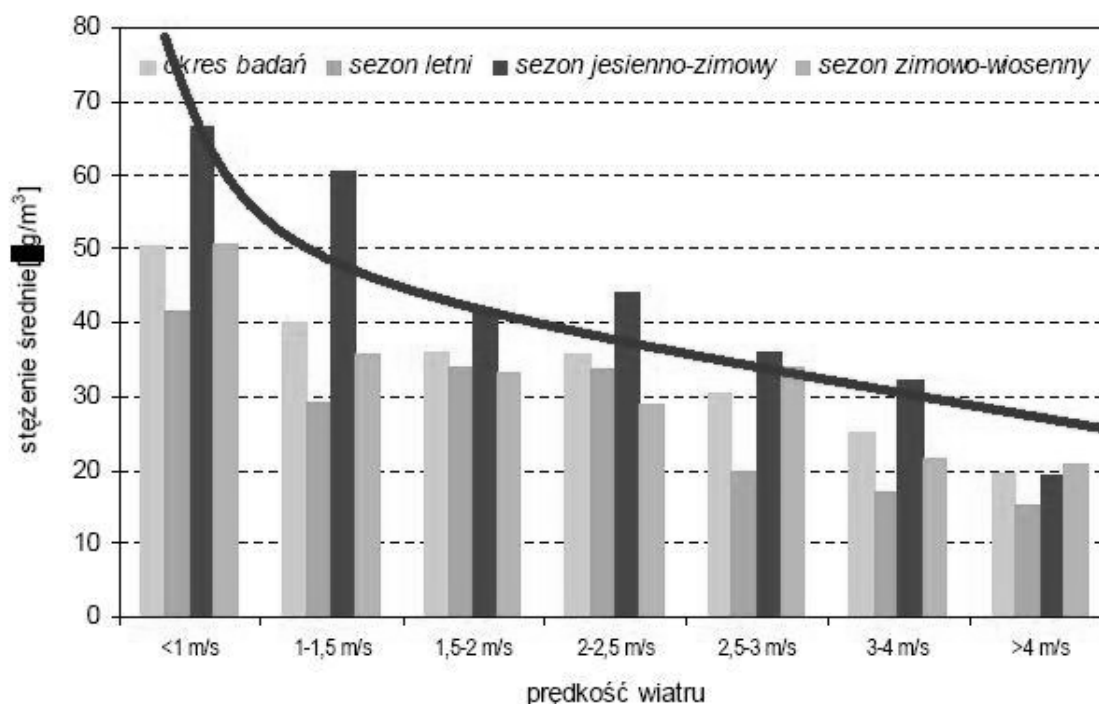
5. Rzeczywiste pomiary wykonywane obecnie

Przeglądając wyniki pomiarów monitoringowych można się dopatrzeć wielu wyników potwierdzających nasze rozważania. Poniżej przedstawiono dwa typowe.

Analizując dobowy lub sezonowy rozkład prędkości przedstawiony na rys. 7 i 8 można nakreślić linię obrazującą matematyczną zależność stężenia zanieczyszczeń K_b mierzonych przez próbnik w funkcji prędkości wiatru. Linie odpowiadające tej zależności dla różnych wartości n narysowano na rys. 7 i 9.



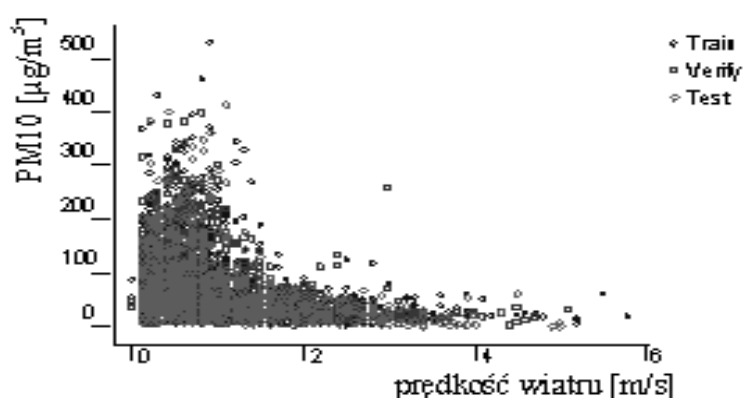
Rys. 7. Dobowe pomiary stężenia pyłu PM10 z ciągłymi liniami narysowanymi przez autora – pomiary znalezione na stronach internetowych GIOŚu



Rys. 8. Sezonowe pomiary stężenia pyłu PM10 (mg/m^3) w zależności od prędkości wiatru oraz sezonowy rozkład jego prędkości

Niezależnie z jakiego uśrednienia prędkości wiatru się korzysta, to zawsze przy mniejszych wiatrach stężenie zanieczyszczenia jest większe. Gdy daną linię doprowadzimy do zerowej prędkości wiatru, w przypadku gdy zawieje wiatr, próbnik działa jak filtr powietrza. Główną przyczyną tego jest zastosowanie stałej prędkości zasysania z powodu użycia impaktorów i nieizokinetycznego poboru próby.

Również w pracy prof. Straszko i in. [7] analizując wyniki uzyskane niestandardowymi metodami otrzymano podobny charakter wpływu wiatru na stężenie PM10.



Rys. 9. Zależności stężenia zanieczyszczeń od prędkości wiatru. Stacja Kraków-Krowodrza, 2007-2008 r.

6. Wnioski

Dla zbudowania prawidłowego próbnika mierzącego rzeczywiste stężenia zanieczyszczeń powietrza podczas wiatru należy:

- zrezygnować ze stosowania impaktorów, które wymagają stałej prędkości przepływu przez próbnik,
- pobierać izokinetycznie próbkę powietrza dokładnie z kierunku wiatru. Zbudowanie takiego próbnika nie przedstawia żadnych trudności przy obecnym stanie techniki,
- wielkość cząstek mierzyć optycznie i w ten sposób określać PM₁₀, PM_{2,5} i PM_{1,0}. Możliwości takie są potwierdzone w wielu dostępnych źródłach literatury naukowej, między innymi w pracy S. Kamiński i D. Kamińska [8],
- obecnie stosowane urządzenia pomiarowe prawidłowo mierzą pył zawieszony tylko w bezwietrznej atmosferze i do takich warunków ich pomiary należałoby ograniczyć.

Na podstawie przedstawionych wniosków zbudowano urządzenie, które od 6 lat bezustannie mierzy stężenie pyłu w powietrzu (rys. 10).



Rys. 10. Urządzenie IPS P firmy Kamika Instruments

Literatura

1. EN 12341:1998, Air quality – Determination of the PM₁₀ fraction of suspended particulate matter – Reference method and field test procedure to demonstrate reference equivalence of measurement methods.

2. EN 14907:2005, Ambient air quality – Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM_{2.5} mass fraction of suspended particulate matter.
3. Bertin, J.J.: Aerodynamics for engineers. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. 2002, 79.
4. Anderson, J.D.: Fundamentals of Aerodynamics - fourth edition. McGraw-Hill, International Edition, 2005, 281.
5. Idelchik, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance. Maszynostrojenie. Moscow. 1975, 104.
6. National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter; Proposed Rule. USEPA 1996 Federal Register 40 CFR Part 50, December 13.
7. Straszko J., Jarosławski B.: Analiza Wyników pomiarów emisji metodami niestrukturalnymi, Problemy Ekologii 2008, nr.5, 231.
8. Kamiński S., Kamińska D.: Porównanie optyczno-elektronicznych metod pomiaru granulacji. Aparatura Badawcza i Dydaktyczna; 2007, T. 12, nr 2-3, 85-93.
9. EUR 22341 EN-DG Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Field test experiments to validate the CEN standard measurement method for PM_{2.5}. Luxemburg 2006.