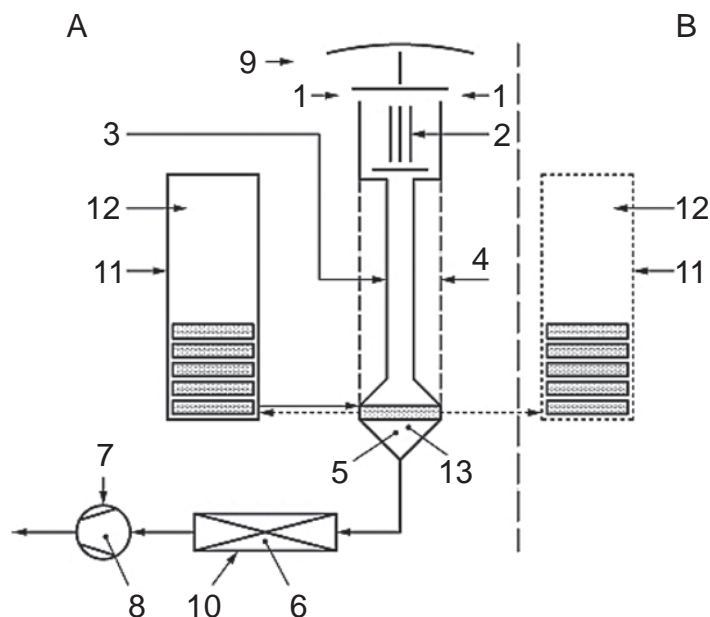


# Monitoring pyłu zawieszonego w atmosferze (cz. I)

Tomasz Frączkowski

Monitoring jakości powietrza w Polsce prowadzony jest w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ). Jednym z elementów badań zanieczyszczeń powietrza są pomiary stężeń pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5. Pomiary te wykonywane są zgodnie z metodyką określoną w dyrektywie w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy (Dyrektywa 2008/50/WE) oraz w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 13 września 2012 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (RMŚ, 2012d). Zgodnie z tymi dokumentami pomiary stężeń pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5, ze względu na swoją specyfikę, prowadzone mogą być za pomocą metod referencyjnych jak i za pomocą równoważnych metod ciągłych.

## Metody pomiaru stężenia pyłu zawieszonego



Rys. 1. Schemat standardowego pobornika.  
Źródło: PN-EN 12341:2014

1. Pobór powietrza ( $T_a$ ,  $P_a$ ), 2. Wlot impaktora, 3. Połączenie rurowe, 4. Osłona połączenia rurowego (opcjonalna), 5. Oprawa filtra, 6. Przepływomierz, 7. Pompa, 8. System kontroli przepływu, 9. Pomiar temperatury  $T_a$  i ciśnienia  $P_a$ , 10. Pomiar temperatury i ciśnienia, 11. Zmieniacz próbek i magazynek na filtry, 12. Pomiar temperatury w magazynku, 13. Pomiar temperatury powietrza w pobliżu filtra

### Pomiary referencyjne pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5

Europejskie standardy pomiarów referencyjnych pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5 zostały zawarte w normie PN-EN 12341:2014 Powietrze atmosferyczne – Standardowa grawimetryczna metoda pomiarowa do określania stężeń masowych frakcji PM10 lub PM2,5 pyłu zawieszonego. Zgodnie z wymaganiami normy pomiar odbywa się za pomocą poborników (Rys. 1), w których powietrze zasysane jest ze stałą prędkością nominalną, wynoszącą 2,3 m<sup>3</sup>/h, przez głowicę separacyjną (Rys. 2). Właściwa frakcja pyłu osadza się na filtrze, który jest ekspozycyjny przez 24 godziny. Masa pyłu na filtrze określana jest poprzez proces ważenia filtrów przed i po ekspozycji filtra. Kluczowe czynniki, które mogą mieć wpływ

na otrzymywane wyniki i które są przedmiotem postępowania opisanego w przytoczonej normie:

- różnice w projektowaniu i budowie głowic separacyjnych;
  - wartość prędkości przepływu próbki;
  - straty osadzania pyłu w rurze pomiędzy wlotem a filtrem;
  - niekontrolowane straty w rurze pomiędzy wlotem a filtrem ze względu na parowanie wody i pół-lotnych cząstek pyłu w dowolnym czasie pomiędzy gromadzeniem a ważeniem;
  - zmiany w wadze filtrów lub pyłu spowodowane np. adsorpcją wody i pół-lotnych cząstek, błędnym dodaniem lub stratą materiału, elektrycznością statyczną.
- Schemat sekwencyjnego systemu poboru pyłu PM10/

PM<sub>2,5</sub> przedstawiono na rysunku 1. Dla prawidłowej selekcji frakcji PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> kluczowe jest utrzymanie w poborniku przepływu na nominalnej wartości 2,3 m<sup>3</sup>/h.

**NAJWAŻNIEJSZE ELEMENTY SEKWENCYJNEGO POBORNIKA PYŁU PM<sub>10</sub>/PM<sub>2,5</sub>**

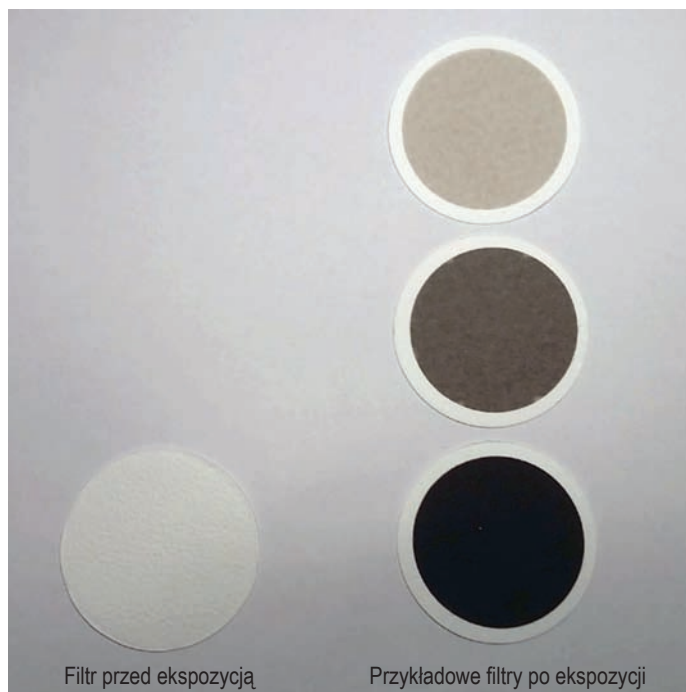
Wszystkie wymiary podano w mm. Tolerancja wszystkich wymiarów podanych bez tolerancji wynosi odpowiednio: ± 0,2 mm lub ± 0,5° (Rys. 2).

1. Pobór powietrza;
  2. Odwodnienie dla impaktora wody;
  3. Przepływ do filtra
- n<sub>1</sub> - wewnętrzna średnia dyszy: dla PM<sub>2,5</sub> 2,6 ± tolerancja wykonania dla PM<sub>10</sub> 6,5 ± tolerancja wykonania
- n<sub>2</sub> - długość dyszy: dla PM<sub>2,5</sub> 3,7 ± 0,1; dla PM<sub>10</sub> 7,0 ± 0,1

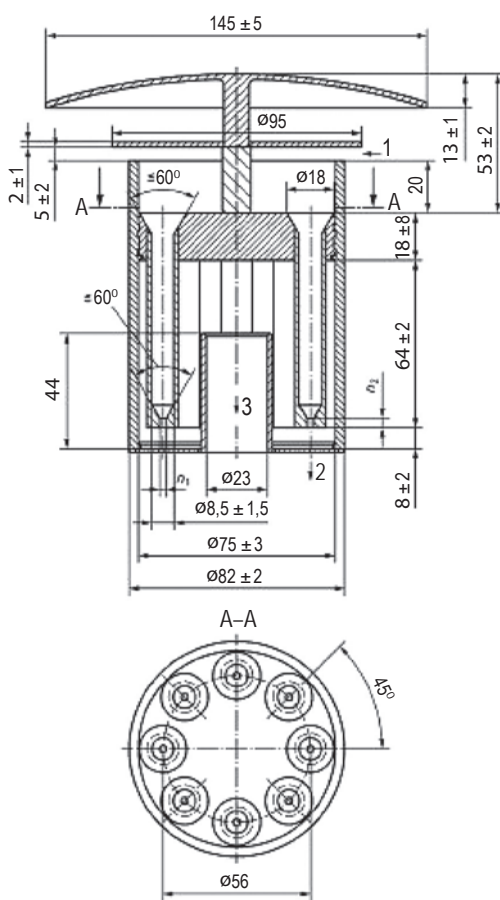
*Głowica separująca* – jednym z najważniejszych elementów pobornika pyłowego, wpływających na prawidłowy pomiar pyłu o zadanej średnicy, jest dobranie odpowiedniej głowicy separującej (Rys. 2). Głowica powinna być wykonana z materiałów inertnych, niekorozyjnych, elektrycznie przewodzących takich jak np. stal nierdzewna, anodowane aluminium lub stop aluminium.

*Rura połączeniowa* – rura połączeniowa pomiędzy wlotem a oprawką filtra powinna być wykonana w taki sposób, by minimalizować straty depozycji pyłu zawieszonego przez procesy kinetyczne, jak również straty spowodowane procesami cieplnymi, chemicznymi bądź elektrostatycznymi.

*Oprawka filtra i filtr* – zastosowana w poborniku pyłowym oprawka filtra powinna być wykonana z materiału inertnego, nie podlegającego korozji – mogą tu być zastosowane zarówno materiały takie jak stal nierdzewna czy anodowane aluminium, jak również oprawki wykonane z odpowiedniego tworzywa sztucznego (poliwęglan, polioksymetylen, politetrafluoroetylen (PTFE, najbardziej znana marka to teflon™)). Konstrukcja oprawki powinna być wykonana w taki sposób, by zainstalowany w niej filtr miał odpowiednią powierzchnię ekspozycji, przez którą przechodzi pobierana próbka powietrza (od 34 do 44 mm).



Rys. 3. Przykłady filtrów z włókna kwarcowego przed i po ekspozycji (zdjęcie: T. Frączkowski)



Rys. 2. Schemat głowicy poboru dla pyłu PM<sub>10</sub> i PM<sub>2,5</sub> dla przepływu 2,3 m<sup>3</sup>/h. Źródło: PN-EN 12341:2014. (zdjęcie: T. Frączkowski)

Filtry stosowane w pomiarach pyłu zawieszonego mogą być wykonane z materiałów takich jak: włókno szklane, włókno kwarcowe, PTFE lub PTFE pokryte włóknem szklanym. W pomiarach prowadzonych w ramach PMS przyjęto do stosowania filtry kwarcowe. *System kontroli przepływu* – utrzymywanie odpowiedniego przepływu w poborniku jest niezwykle istotne dla właściwej selekcji frakcji pyłu, która przechodzi przez głowicę separującą. Znajomość przepuszczalności przez filtr ilości powietrza jest również istotna ze względu na możliwość wyliczenia stężenia pyłu zawieszonego pobranego przez pobornik. Przepływ w poborniku powinien być utrzymywany na stałym poziomie wynoszącym 2,3 m<sup>3</sup>/h – chwilowa wartość przepływu nie powinna odbiegać od nominalnej o więcej niż 5%.

## NAJWAŻNIEJSZE ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE PROCESU WAŻENIA

Prawidłowy pobór pyłu zawieszonego, wykonywany za pomocą poborników referencyjnych, stanowi pierwszy etap określania jego stężenia w powietrzu atmosferycznym. Drugim etapem, równie ważnym jak pobór próbki, jest proces ważenia filtrów.

### Pokój wagowy

Ze względu na konieczność dotrzymania wymagań jakościowych w procesie ważenia (przez cały okres kondycjonowania i ważenia filtrów), w pokoju wagowym muszą być dotrzymane bardzo rygorystyczne warunki:

- temperatura panująca w pokoju wagowym – w zakresie od 19 do 21°C, mierzona, jako średnia godzinowa;
  - wilgotność panująca w pokoju wagowym – od 45 do 50%, mierzona, jako średnia godzinowa;
  - niepewność czujnika temperatury<sup>1)</sup> – mniejsza lub równa 0,2°C;
  - niepewność czujnika wilgotności<sup>1)</sup> – mniejsza lub równa 2%;
  - rozdzielczość wagi – mniejsza lub równa 10 µg;
  - niepewność kalibracji wagi<sup>1)</sup> – mniejsza lub równa 25 µg dla zakresu od 0 do 200 mg;
- Warunki środowiskowe panujące w pokoju wagowym muszą być rejestrowane w trybie ciągłym w celu potwierdzenia spełniania zakładanych wymogów.

### Kondycjonowanie i ważenie filtrów przed poborem

Przed przystąpieniem do poboru prób w pobornikach pyłowych, używane do tego celu filtry, muszą zostać jednoznacznie oznaczone (w celu łatwego zidentyfikowania), a następnie poddane procesowi kondycjonowania w pokoju wagowym. Pierwszy etap kondycjonowania polega na umieszczeniu filtrów w pokoju wagowym (w którym muszą być dotrzymane warunki klimatyczne podane powyżej) na okres co najmniej 48 godzin; po tym czasie należy wykonać pierwsze ważenie filtrów. Po zważeniu filtry ponownie kondycjonuje się w pokoju wagowym przez

<sup>1)</sup> Dla poziomu prawdopodobieństwa 95%

okres przynajmniej 12 godzin, po czym ponownie się waży. Różnica mas pomiędzy dwoma ważeniami nie może być większa niż 40 µg. Jeśli ważony filtr, lub partia filtrów nie spełniają tego warunku mogą być albo odrzucone, jako nieprzydatne do procesu poboru próby, lub też poddane ponownemu kondycjonowaniu przez okres, co najmniej 24 godzin. Po dodatkowym kondycjonowaniu filtry ponownie waży się i oblicza różnicę wagi pomiędzy drugim a trzecim ważeniem – w tym wypadku różnica również nie może przekraczać 40 µg. W wypadku niedotrzymania tego warunku filtry są odrzucane, jako nieprawidłowe. Masę filtrów czystych podaje się jako średnią z dwóch ważeń.

### Pobór próby

Zważone filtry pakuje się do oprawek i pojemnika transportowego i dostarcza na miejsce wykonywania pomiarów, gdzie instaluje się je w pobornikach pyłowych. Niezwykle istotne jest, by podczas pakowania filtry były jednoznacznie oznaczone i przypisane do konkretnej oprawki – ma to na celu wyeliminowanie błędów wynikających z nieprawidłowego określenia dnia poboru próby. Po wyeksponowaniu filtry, z pobranym pyłem zawieszonym, transportowane są do laboratorium. W celu uniknięcia zabrudzenia filtra oraz zminimalizowania strat substancji lotnych i półlotnych zgromadzonych na filtrze, transport filtrów powinien odbywać się w odpowiednich warunkach, np. w pojemni-

kach chłodzonych. Kondycjonowanie i ważenie filtrów po ekspozycji Po dostarczeniu wyeksponowanych filtrów do laboratorium umieszcza się je w pokoju wagowym i poddaje kondycjonowaniu przez okres przynajmniej 48 godzin. Po tym czasie filtry waży się po raz pierwszy. Następnie filtr jest kondycjonowany powtórnie w okresie czasu od 24 do 72 godzin i ponownie ważony. Różnica mas pomiędzy pierwszym a drugim ważeniem nie może być większa niż 60 µg. Podobnie jak w etapie przygotowywania filtrów, jeśli różnica mas na filtrze/filtrach jest większa od zakładanych 60 µg filtry można odrzucić i uznać wartości za nieprawidłowe, lub poddać je ponownemu kondycjonowaniu przez okres przynajmniej 24 godzin. W wypadku ponownego kondycjonowania filtr/filtry waży się trzeci raz i oblicza różnicę wagi z drugiego i trzeciego ważenia. Jeśli różnice ważenia nadal są większe niż 60 µg filtry są odrzucane, a wyniki unieważnione. Masę filtrów wyeksponowanych podaje się, jako średnią z dwóch ważeń.

### Przedstawianie wyników

Wyniki stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu oblicza się za pomocą wzoru:

$$c = \frac{ml - mu}{\varphi a \cdot t} \quad (1)$$

gdzie:

- $c$  – koncentracja [µg/m<sup>3</sup>];
- $ml$  – masa filtra z pyłem [µg];
- $mu$  – masa filtra czystego [µg];
- $\varphi a$  – przepływ w warunkach rzeczywistych [m<sup>3</sup>/h];
- $t$  – czas poboru [h].



### Pomiary ciągłe pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5

W PMŚ dopuszcza się wykonywanie pomiarów pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5 metodami ciągłymi, przy pomocy mierników automatycznych, pod warunkiem, że metody te mają wykazaną w stosunku do metody referencyjnej równoważność. Dodatkowo, wykonując pomiary pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5 za pomocą metod ciągłych, należy wykonywać cykliczne porównania z metodą referencyjną w celu ustalenia współczynnika korelacji – zarówno dla sezonu letniego, jak też zimowego.

Metoda pomiarów ciągłych pyłu zawieszonego nie posiada na chwilę obecną normy, do której można by odnosić techniki pomiarowe. Stosowanym dokumentem, w oparciu, o który wykonuje

się pomiary ciągłe pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5, jest Specyfikacja Techniczna CEN/TS 16450 „*Ambient Air – Automated measuring systems for the measurement of the concentration of particulate matter (PM10; PM2,5)*”. Specyfikacja ta opisuje trzy metody stosowane w automatycznych miernikach pyłowych.

### **Pomiar metodą wagi oscylacyjnej**

Fracja mierzonego pyłu (PM10 lub PM2,5) uzależniona jest od zastosowanej głowicy separacyjnej. Pomiar masy pyłu zgromadzonego na filtrze odbywa się poprzez redukcję drgań elementu oscylującego umieszczonego pod filtrem. Koncentracja pyłu jest pochodną zmiany masy na jednostkę czasu i przepływu próbki.

### **Tłumienie promieniowania $\beta$**

Fracja mierzonego pyłu (PM10 lub PM2,5) uzależniona jest od zastosowanej głowicy separacyjnej. Mierzony pył osadza się na filtrze bądź taśmie filtracyjnej, która, w określonych odstępach czasu, prześwietlana jest przez promieniowanie  $\beta$  o małym natężeniu. Zwiększone obciążenie pyłem powoduje osłabienie poziomu promieniowania mierzonego przez detektor. Osłabienie to jest proporcjonalne do zwiększającej się masy pyłu.

### **Rozpraszanie światła**

Metoda ta wykorzystuje technikę rozpraszania światła do zliczania cząstek pyłu zawieszonego. Pomiar pyłu odbywa się na zasadzie mierzenia frakcji rozproszenia światła w określonym kierunku i wprowadzania sygnału

określonego przez wielkość i stężenie cząstek zawieszonych w powietrzu w strumieniu próbki. Stężenie masowe cząstek stałych (pyłu zawieszonego) obliczane jest poprzez przekształcenie liczby cząstek mierzonych w jednostce czasu na masę w jednostce objętości, stosując dedykowaną regresję wielokrotną lub z ustalonych gęstości cząstek.

Pomimo, iż metody te nie są uważane za referencyjne, są one jedynym źródłem informacji o dobowym rozkładzie pyłu zawieszonego w powietrzu, który przekazywany jest w sposób bezpośredni do wiadomości społeczeństwa za pomocą stron internetowych. Dlatego też pomiary te w sposób szczególny wymagają dużej dbałości o zachowanie wszelkich procedur postępowania i jakości produkowanych danych.

## Zapewnianie jakości wyników pomiarów pyłu zawieszonego

Podmiot prowadzący pomiary pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5 na potrzeby PMŚ, zobowiązany jest wykonywać je zgodnie z warunkami określonymi w dyrektywie w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy (Dyrektywa 2008/50/WE) oraz w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 13 września 2012 r. w sprawie dokonywania oceny poziomów substancji w powietrzu (RMŚ, 2012d), a także przestrzegać wszyst-

kich wymagań związanych z zapewnieniem wysokiej jakości wyników pomiarów.

Przytoczone powyżej rozporządzenie MŚ wskazuje na dwa podstawowe warunki, które muszą być spełnione, by zagwarantować dokładność pomiarów i zgodność z celami dotyczącymi jakości danych:

- wszystkie pomiary w zakresie oceny jakości powietrza ustanowione w odniesieniu do górnych i dolnych progów

oszacowania (patrz rozdz. 7.4) powinny mieć zapewnioną spójność pomiarową do wzorców wyższego rzędu, zgodnie z wymogami określonymi w sekcji 5.6.2.2 normy PN-EN ISO/IEC 17025:2005;

- instytucje obsługujące sieci i poszczególne punkty pomiarowe powinny posiadać wdrożone systemy zapewniania i kontroli jakości, które gwarantują okresowe przeglądy zapewniające dokładność urządzeń pomiarowych, a tak-

że mają ustalone procedury zapewniania/kontroli jakości pomiarów w zakresie zbierania danych i przygotowywania sprawozdań.

Wszystkie wykonywane badania obarczone są pewnym elementem niepewności, który powinien zostać rozpoznany i oszacowany. Przytoczone powyżej Dyrektywa 2008/50/WE i rozporządzenie MŚ dopuszczają wykonywanie badań pyłu zawieszonego z niepewnością nie większą



Rys. 4. Badania porównawcze dla pomiarów pyłu PM10 i PM2,5 (zdjęcie: A. Pindel)

niż 25%. Metoda szacowania niepewności badań pyłu zawieszonego zawarta została w normie PN-EN 12341:2014 Powietrze atmosferyczne – Standardowa grawimetryczna metoda pomiarowa do określania stężeń masowych frakcji PM10 lub PM2,5 pyłu zawieszonego. Każdy podmiot wykonujący badania powinien indywidualnie oszacować wartość niepewności, tak, by uzyskać pewność, iż mieści się ona w dopuszczalnych przez prawo granicach. Dla utrzymania odpowiedniej jakości badań decydujące znaczenie mają wszystkie sprawdzenia, wzorcowania czy kalibracje, którym podlegają urządzenia pomiarowe. W wypadku urządzeń do pomiarów pyłu zawieszonego sprawdzeniu i kalibracji podlega przede wszystkim przepływ, który musi mieć odpowiednią

wartość (2,3 m<sup>3</sup>/h) i być utrzymywany, bez względu na stopień zapełnienia filtra/taśmy pyłem, na odpowiednim, stałym poziomie. Stała wartość przepływu ma kluczowe znaczenie dla procesu właściwej separacji frakcji pyłu (PM10 i PM2,5). Sprawdzeń tych dokonuje się przy użyciu wzorcowanych przepływomierzy. Dodatkowymi elementami, które podlegają sprawdzeniom w pobornikach i miernikami pyłowych są czujniki temperatury i ciśnienia. Bardzo ważnym czynnikiem, z punktu widzenia zapewnienia jakości w pomiarach referencyjnych pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5, jest stosowanie filtrów kontrolnych. Stosowane są dwa rodzaje filtrów kontrolnych:

- filtry kontrolne stosowane w pokoju wagowym – filtry te służą do oceny wpływu śro-

dowiska w pokoju wagowym na masę filtrów. Zostają one wyeksponowane w pokoju wagowym, a ich masy są rejestrowane podczas każdej sesji ważenia – ich masa pomiędzy kolejnymi ważeniami nie może zmieniać się o więcej niż 40 µg;

- filtry kontrolne stosowane w terenie (tzw. ślepe terenowe) – filtry te eksponowane są w poborniku pyłowym wraz z pozostałymi filtrami i podlegają takim samym zasadom jak filtry, na które pobierane są próby pyłu. Różnica mas dla ślepego filtra terenowego przed i po ekspozycji nie może być większa niż 60 µg. W celu zwiększenia nadzoru nad wykonywanymi badaniami pyłu zawieszonego Krajowe Laboratorium Referencyjne i Wzorcujące Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska co dwa lata orga-

nizuje porównania międzylaboratoryjne, w których udział biorą wszystkie laboratoria dostarczające dane na potrzeby PMŚ.

Ze względu na różnice w stężeniach, jakie obserwowane są w sezonach letnim (niskie stężenia) i zimowym (wysokie stężenia), badania te podzielone zostały na dwa etapy, z których pierwszy odbywa się w miesiącach letnich, drugi zaś w porze jesienno-zimowej. Porównania te mają za zadanie wykazanie czy poborniki referencyjne i procedury stosowane w każdej z sieci pomiarowych wypełniają stawiane im cele i czy system pomiarowy funkcjonuje prawidłowo.

Oprócz wyżej wymienionych warunków, dla zachowania odpowiedniej jakości pomiarów pyłu zawieszonego muszą być spełnione także inne kryteria, które zostały wymienione w poprzednim rozdziale. Dotyczy to zwłaszcza wypełniania wymogów normy PN-EN 12341:2014 i Specyfikacji Technicznej CEN/TS 16450 „Ambient Air – Automated measuring systems for the measurement of the concentration of particulate matter (PM10; PM2,5)”.

#### Literatura

[1] Praca zbiorowa pod redakcją K. Judy Rezler i B. Toczko. 2016. Pyły drobne w atmosferze. Kompendium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa.