



PRZEWODNIK

Metody grawimetryczne w badaniach jakości powietrza atmosferycznego

ZASADA POMIARU / APLIKACJE / KONSTRUKCJE / WARUNKI STOSOWANIA



dr Sławomir Janas
dr Martyna Roszowska-Jarosz

Centrum Metrologii, Badań i Certyfikacji RADWAG

radwag.com

Copyright by RADWAG Wagi Elektroniczne
Radom 2026
Wydanie I
RADWAG Wagi Elektroniczne
26-600 Radom, ul. Toruńska 5
e-mail: radom@radwag.pl
<http://www.radwag.com>

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	4
2. Pył zawieszony.....	6
3. Źródła emisji pyłu pierwotnego.....	11
4. Filtry stosowane w ocenie jakości powietrza atmosferycznego.....	14
4.1. Wymagania normatywne dla filtrów i systemów wagowych	15
4.2. Metody kondycjonowania i ważenia filtrów	16
5. Idea pomiaru masy.....	20
5.1. Adiustacja.....	22
5.2. Legalizacja systemów wagowych – fakty i mity.....	24
6. Pomiary manualne	27
6.1. Rozwiązania konstrukcyjne dla metod ważenia manualnego	27
6.2. Dokładność metod ważenia manualnego	31
6.3. Ergonomia pomiarów manualnych.....	35
6.4. Ładunki elektrostatyczne filtrów w procesie ważenia	38
7. Pomiary automatyczne.....	40
7.1. AK-6 5Y.F – automatyzacja w skali ultra-mikro.....	40
7.2. UMA 2.5Y.F – automatyzacja Medium Size.....	43
7.3. RB 2.5Y.F – ilość i jakość w badaniach.....	48
7.4. RMC 2.5Y.FC – wydajność i precyzja	52
7.5. RW 5Y.F 153 – pomiary masy bez ograniczeń	53
8. Niezrównoważone ładunki statyczne – dejonizacja.....	54
9. Pomiar stężenia pyłu metodą automatyczną.....	58
10. Wyposażenie dodatkowe	61
10.1. Wzorce masy	61
10.2. Dejonizator.....	61
10.3. Stół antywibracyjny	61
10.4. Dodatkowa osłona wagi.....	61
10.5. Usługa wzorcowania	61
10.6. Kwalifikacja operacyjna wagi.....	61
11. Główne parametry metrologiczne.....	62
12. Podsumowanie.....	63
13. Literatura.....	66

1. Wstęp

Jakość powietrza atmosferycznego zawsze była istotną informacją, choć w przeszłości z powodu braku odpowiednich narzędzi i metod była zdecydowanie niedoszacowana. Rozwój technik wagowych w ostatnim czasie, a w zasadzie wzrost ich jakości w sensie metrologicznym pozwala obecnie na realizację pomiarów masy z odpowiednio wysoką precyzją. Nie jest tajemnicą, że jakość powietrza atmosferycznego określa się poprzez pomiar różnicowy masy filtra. W pierwszym cyklu określana jest masa filtra czystego tj. przed ekspozycją, a następnie masa tego samego filtra po ekspozycji. Każdy wynik ważenia filtra cechuje się pewną zmiennością w zakresie tzw. błędu losowego, im mniejszą tym lepiej. Zmienność ta może wynikać z możliwości pomiarowych wagi, niestabilności środowiska pracy oraz oddziaływania niezerównoważonych ładunków jakie znajdują się na powierzchni filtra. Mając to na uwadze masa filtra zazwyczaj jest wyznaczana jako wartość średnia z co najmniej dwóch pomiarów rozbieżnych względem siebie nie więcej niż 40 lub 60 mikrogram. Jest to podstawowe wymaganie zawarte w normie EN 12341:2024, która jest referencyjnym dokumentem wykorzystywanym do oceny stężeń masowych pyłu zawieszonego PM_{2.5}/PM₁₀.

Nieco inne wymaganie zawiera norma EN 13284 „Emisja ze źródeł stacjonarnych. Oznaczenie stężenia masowego pyłu w zakresie niskich wartości. Część 1 - Manualna metoda grawimetryczna”. W tym przypadku okresy kondycjonowania filtrów są znacznie krótsze a masa filtra jest wyznaczana jako wartość średnia z trzech pomiarów zarejestrowanych w odstępach 1 minutowych podczas ciągłego ważenia tego samego filtra.

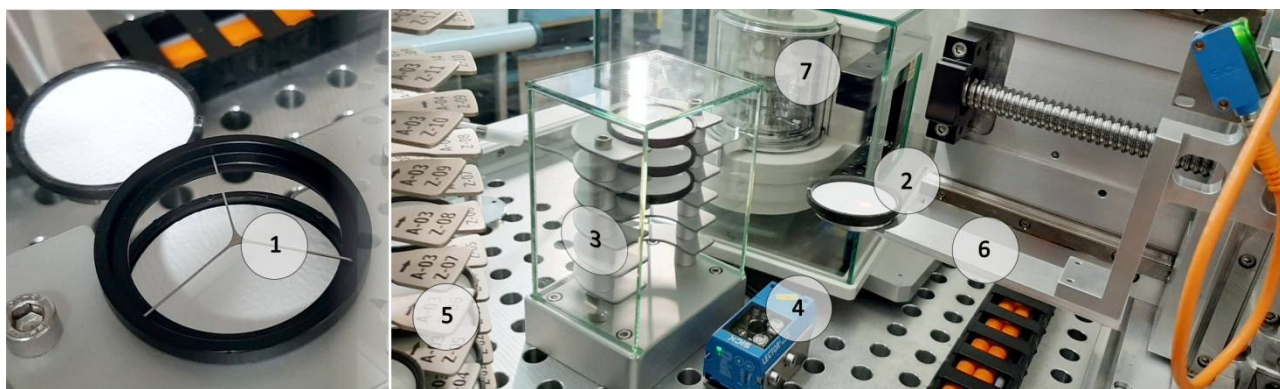


Rysunek 1. Kontrola parametrów metrologicznych wagi – **dział QC** firmy Radwag

Obserwacja i badania możliwości pomiarowych wag obsługiwanych przez operatora wyraźnie wskazują, że istnieją pewne limity dokładności, których nie można przekroczyć w obecnym stanie techniki. Zaangażowanie znacznych środków ekonomicznych być może zmieniłoby ten stan, ale jest nieracjonalne.

Można dociekać przyczyn tych ograniczeń, jedne wynikają z techniki pomiarów masy, przecież jest to ocena wartości siły grawitacyjnej jaka działa na ważony filtr. Inne przyczyny to zjawiska fizyczne jakie towarzyszą procesowi pomiaru masy, można tu mówić o przemieszczaniu się powietrza w konstrukcji wagi i w jej pobliżu. Olbrzymie znaczenie ma także niestabilność masy filtra, zwłaszcza gdy jest on typu PTFE lub jest konstrukcją powlekaną PTFE. Badania naukowe wskazują także na zmienność masy filtra, która jest efektem zmienności warunków w jakich filtry są kondycjonowane.

Warto tu zwrócić uwagę, że normatywnie wg. EN 12341:2024 oraz EN 13284 dopuszczalna rozbieżność warunków kondycjonowania to 2°C, a wilgotności 5%. Takie limity w zakresie kondycjonowania wynikają z faktu iż norma powinna mieć i ma cechy użytkowe, więc warunki kondycjonowania filtrów powinny być możliwe do uzyskania przy zastosowaniu typowych metod i urządzeń. Z drugiej strony istotna jest wartość niepewności wyznaczenia stężenia masowego pyłu zawieszonego, co wymusza ocenę jakości wpływu wszystkich składników w budżecie niepewności. Patrząc na to zagadnienie kompleksowo nie wydaje się ono proste, zwłaszcza gdy poza dokładnością pomiaru masy ważna jest ergonomia i ekonomia tego procesu. To skłania laboratoria i działy R&D do poszukiwania lepszych rozwiązań, które są wspierane cyfrowo oferując większą wydajność przy zachowaniu akceptowanych limitów metrologicznych. Automatyzacja i robotyzacja jako metoda pomiarów masy jest już dostępna, choć obecnie zdecydowanie nie jest to tanie rozwiązanie, gdyż zawsze wymaga ono optymalizacji w sensie mechanicznym, informatycznym oraz metodycznym.



Rysunek 2. Automatyzacja w pomiarach masy – układ robotyczny RB 2.5Y

Legenda: 1 – wzorzec masy, 2 – filtr, 3 – magazyn filtrów referencyjnych, 4 – czytnik kodów QR, 5 – magazyn filtrów roboczych, 6 – ramię układu robotycznego, 7 – mikrowaga, $d=0,001\text{mg}$.

Celem tej publikacji jest zaprezentowanie możliwości pomiarowych podstawowych systemów stosowanych do pomiaru masy filtrów, zarówno tych manualnych jak i tych wyposażonych w układy automatyki o różnym stopniu skomplikowania. Charakterystyka poszczególnych systemów dotyczy raczej ich cech użytkowych a nie marketingowych, co umożliwia ich ocenę w zakresie zastosowania w aplikacjach przemysłowych i badaniach R&D.

2. Pył zawieszony

Termin pył zawieszony PM, ang. Particulate Matter jest stosowany do opisu fazy rozproszonej cząstek stałych lub ciekłych zawieszonych w powietrzu. Tym terminem posługują się głównie międzynarodowe agencje zajmujące się zanieczyszczeniami powietrza oraz ich wpływem na zdrowie ludzkie i ekosystemy takie jak United States Environmental Protection Agency - US EPA, European Environment Agency - EEA, World Health Organization - WHO. Należy przyjąć, że pył to faza stała układu dwufazowego ciało stałe – gaz lub gaz – ciało stałe, jeśli stopień rozdrobnienia ciała stałego jest tak duży, że w nieruchomym powietrzu o ciśnieniu 760mm Hg, temperaturze 20°C i wilgotności względnej < 50% ziarna ciała stałego, na które działa tylko siła ciężenia, po bardzo krótkim okresie przyspieszenia wskutek oporu przepływu ośrodka będą opadały ze stałą prędkością mniejszą od 500cm/s lub będą wykonywały ruchy Browna.



Rysunek 3. Emisja pyłu pierwotnego z przemysłu - widok cząstek PM

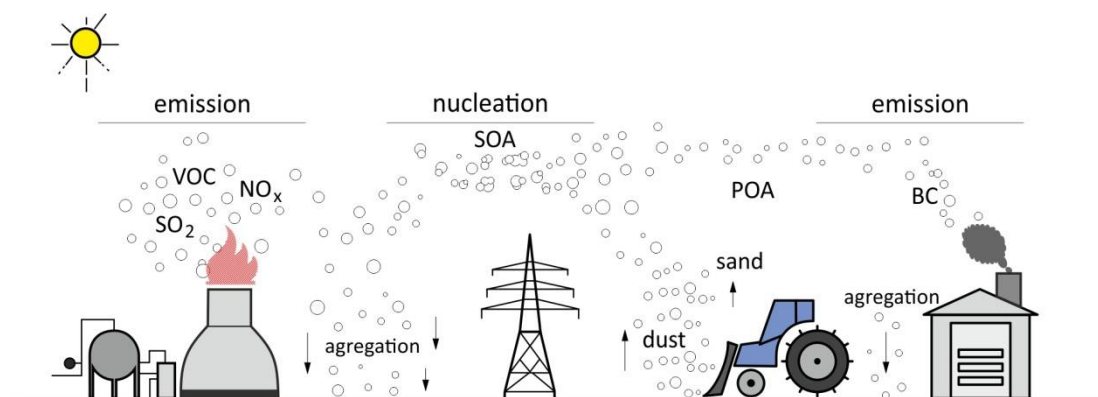
Źródło: <https://www.flickr.com/photos/cambridgeuniversity-engineering/5862356585>

Simon Payne - Scanning electron micrograph of diesel engine particulate matter captured in the pore of a ceramic wall-flow filter

W ocenie jakości powietrza atmosferycznego zastosowanie ma także termin aerozol, który określa zawiesiny cząstek stałych i ciekłych rozproszonych w ośrodku dyspersyjnym tj. powietrzu. Terminy pył i aerozol są do siebie podobne, czasami stosowane zamiennie, ale w ramach konsensusu można przyjąć, że termin pył jest używany w odniesieniu do fazy rozproszonej układu dwufazowego ciało stałe – gaz, natomiast aerozol do układu wielofazowego czyli wszystkich drobnych cząstek zawieszonych w powietrzu.

Pyły należy postrzegać jako niejednorodne zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego, które mają swoje źródło w wielu procesach naturalnych np. pożary, wybuchy wulkanów, wietrzenie skał jaski i antropogenicznych tj. działalność przemysłowa, spalanie paliw kopalnych, motoryzacja. Te drobne cząstki, zazwyczaj w fazie stałej lub ciekłej zawieszone w atmosferze tworzą aerozol atmosferyczny. Jego właściwości, a co za tym idzie oddziaływanie na zdrowie ludzkie jest zależne od jego morfologii, frakcji i składu chemicznego. Niewątpliwie skład chemiczny cząstek jest istotnie zróżnicowany, co może być pewną charakterystyką źródeł emisji. Za tzw. całkowity pył zawieszony uważa się wszystkie cząstki o średnicy aerodynamicznej od nanometrów do ok. 100 mikrometrów.

Ocena jakości powietrza atmosferycznego powinna uwzględniać także fakt, iż pyły atmosferyczne mają charakter pierwotny w efekcie emisji ze źródeł naturalnych oraz antropogenicznych, ale także charakter wtórny. Wtórne tworzenie się pyłu polega na przemianie gazowych prekursorów tj. związków chemicznych takich jak dwutlenek siarki, tlenek azotu, amoniak, węglowodór oraz cząstek pyłu w efekcie reakcji chemicznych i fizycznych. Efektem tego procesu są tzw. pyły wtórne składające się z drobnych cząstek stałych i ciekłych, które można obserwować w dużych aglomeracjach jako smog.



Rysunek 4. Schemat tworzenia się oraz przemian pyłu zawieszonego w atmosferze.

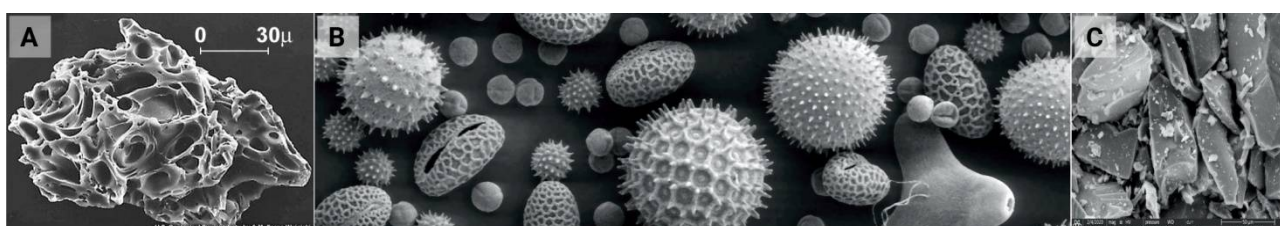
Legenda: SO₂ – dwutlenek siarki, NO_x – tlenek azotu, VOC – lotne związki organiczne (volatile organic compounds), SOA - secondary organic aerosol, POA - primary organic aerosol, BC – sadza (black carbon)

Heterogeniczność pyłu zawieszonego w praktyce oznacza to, że taka sama wartość stężenia masowego pyłu zawieszonego PM_{2.5} zmierzona w dwóch różnych miejscach może mieć różny wpływ na zdrowie ludzkie. To skład pyłu zawieszonego decyduje o jego niepożądanym działaniu, a nie jego ilość, choć czas ekspozycji również może być istotny. Podstawowymi składnikami pyłu jest materia węglowa organiczna jak i nieorganiczna oraz węgiel pierwiastkowy tj. sadza, materia mineralna, w tym pierwiastki śladowe, wtórny aerozol nieorganiczny (przede wszystkim siarczany, azotany i związki amonowe) oraz woda.

Praktyczny aspekt oceny jakości powietrza atmosferycznego sprowadza się do wykazania ilości niepożądanych składników w pyłe i odniesieniu zmierzonych wartości do obowiązujących limitów. Należy zauważyć, że takie składniki pyłu jak np. benzo(a)piren, arsen, ołów, kadm, czy nikiel mają wykazany negatywny wpływ na zdrowie ludzkie oraz ekosystemy lądowe i wodne, tak więc metoda badawcza powinna uwzględniać i umożliwiać przeprowadzenie badań w tym kierunku. Oddziaływanie negatywne pyłu dość często odnosi się do zdrowia ludzkiego, lecz nie należy zapominać o oddziaływaniu na ekosystemy poprzez depozycję zanieczyszczeń w glebie i na roślinności oraz wpływie na infrastrukturę materialną tj. budynki, zabytki, konstrukcje itd.

Wielkość ziaren pyłu¹ jest jednym z ważniejszych parametrów stosowanych do opisu jego właściwości, także w sensie negatywnego działania na organizm ludzki. W tym zakresie mówi się o frakcji fazy rozproszonej definiując dla każdego typu pyłu maksymalną aerodynamiczną średnicę cząstki. Ogólny podział obejmuje pyły drobne (fine) o średnicy cząstki $d < 2,5\mu\text{m}$ oraz pyły grube o średnicy $d > 2,5\mu\text{m}$ (ang. coarse). Bardziej rozbudowany podział uwzględniający rozmiar cząstek przedstawiony jest poniżej:

- pył PM₁₀, średnica zastępcza cząstek $d > 10\mu\text{m}$,
- pył PM_{2,5-10}, PM_c (ang. coarse), średnica zastępcza cząstek d , $2,5\mu\text{m} \div 10\mu\text{m}$,
- pył drobny PM_{2,5}, średnica zastępcza cząstek $d < 2,5\mu\text{m}$,
- pył submikronowy PM₁, średnica zastępcza cząstek poniżej $d < 1,0\mu\text{m}$,
- pył ultradrobny PM_{0,1}, średnica zastępcza cząstek poniżej $d < 0,1\mu\text{m}$.



Rysunek 5. Różne rodzaje cząstek stałych.

A – szklany odłamek popiołu o długości $\sim 0,1$ mm pochodzący z wybuchu wulkanu Mount St. Helens w 1980r.

źródło - <https://www.usgs.gov/media/images/ash-particle-1980-mount-st-helens-eruption-magnified-200-times>

B – Ziarna pyłu różnych gatunków roślin, powiększenie 500x,

źródło: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Misc_pollen.jpg

C – proszek ze szklanych butelek,

źródło: <https://www.mdpi.com/2073-4352/11/5/488>

Skład chemiczny pyłu determinuje w znacznej mierze miejsce w sensie geograficznym, nie tylko zdefiniowane poprzez infrastrukturę miejską i przemysłową, ale także poprzez naturalny ruch powietrza atmosferycznego. Istotne znaczenie mają warunki meteorologiczne w miejscu poboru oraz pora roku, zwłaszcza w obszarach mocno zurbanizowanych. Niezależnie od powyższych czynników pył zawieszony może zawierać takie składniki jak:

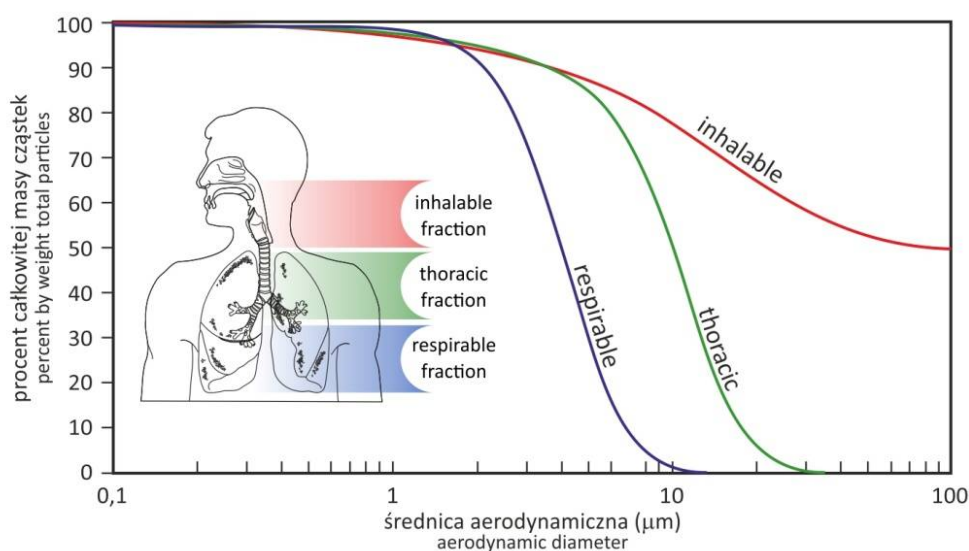
- materiał mineralny (ang. crustal material),
- sól morską (ang. sea salt),
- pierwotny bioaerozol (PBAP, ang. Primary Biogenic Aerosol Particles),
- węgiel elementarny (EC, ang. Elemental Carbon),
- węgiel organiczny (OC, ang. Organic Carbon),
- wtórne aerozole organiczne (SOA, ang. Secondary Organic Aerosols),
- wtórne aerozole nieorganiczne (SIA, ang. Secondary Inorganic Aerosols): jony siarczanowe (SO_4^{2-}), azotanowe (NO_3^-) i amonowe (NH_4^+),
- pierwiastki śladowe

¹ ISO 7708:1995. Air Quality. Particle size fraction definitions for health-related sampling

Ocena wielkości cząstek pyłu jest szczególnie istotna w kontekście migracji tych cząstek w drogach oddechowych człowieka w których się osadzają. Miejsca te można zgrupować w trzy główne obszary², takie jak:

- drogi oddechowe w obrębie głowy – jama ustna, jama nosowa, gardło i krtąń,
- układ tchawiczo-oskrzelowy – tchawica, oskrzela, oskrzeliki i oskrzeliki końcowe
- obszar wymiany gazowej – oskrzeliki oddechowe, przewody pęcherzykowe i pęcherzyki płucne.

Mając to na uwadze rozróżnia się takie frakcje wielkościowe pyłu jak, frakcja wdychalna, dostaje się do nosa i ust podczas oddychania, frakcja klatkowa - przenikająca poza krtąń oraz frakcja respirabilna, która przenika do dolnego obszaru wymiany gazowej płuc. Poziom absorpcji cząstek zależnie od ich wielkości pokazano na rysunku 6.



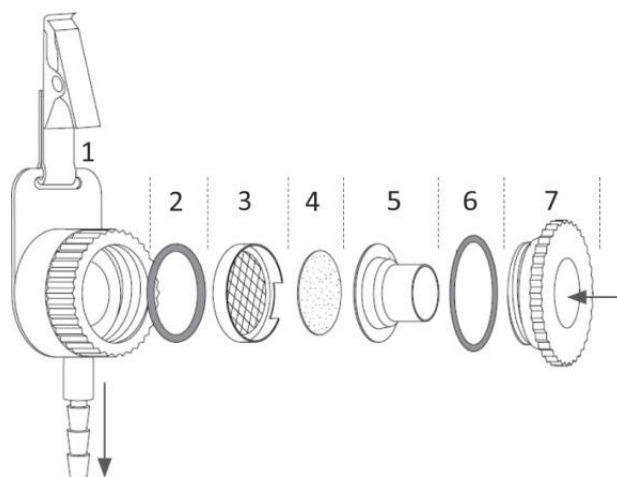
Rysunek 6. Udział procentowy frakcji wdychalnej, tchawicznej i respirabilnej w ogóle zawieszonych w powietrzu cząstek zgodnie z normą EN 481.

Źródło: Sampling and determining aerosols and their chemical components

Ocena jakości środowiska pracy metodą wagową polega na określeniu zmian masy filtra przed ekspozycją i po jego ekspozycji. Tym samym jest to metoda już dość dobrze znana w której poza „dokładnością” pomiaru masy istotne mogą być inne czynniki takie jak np. występowanie niezrównoważonych ładunków statycznych, sorpcja wilgoci przez pył zgromadzony wewnątrz filtra. Pobór pyłu w środowisku pracy odbywa się za pomocą osobistych poborników przypiętych do uniformu pracownika. Za pomocą pompy określona ilość powietrza ok. 1.9 ÷ 2.0 l./min jest przesyłana do wnętrza próbnika, gdzie cząstki stałe są absorbowane przez powierzchnię filtra.

² American Conference of Governmental Industrial Hygienists

Monitoring powietrza powinien być reprezentatywny dla okresów pracy narażonych osób. Dłuższy czas pobierania próbek pozwala na uzyskanie większej ilości zanieczyszczeń a tym samym zmniejsza potencjalne niedokładności ważenia. Z tego względu czas pobierania próbek powinien być tak długi, jak to możliwe tj. powinien obejmować całą zmianę, a minimalny okres pobierania próbek powinien wynosić co najmniej 25% zmiany, choć preferowane jest, aby czas pobierania próbek nie był krótszy niż cztery godziny.



Rysunek 7. Przykład pobornika osobistego

Źródło: Health and Safety Laboratory „MDHS 14/3 General

methods for sampling and gravimetric analysis of respirable and inhalable dust”

Legenda: 1 – uchwyt pobornika, 2 – pierścień, 3 – dolna osłona filtra, 4 – filtr, 5 – górna osłona filtra, 6 – pierścień uszczelniający, 7 – zewnętrzna osłona pobornika.

Ilość pyłu jest wyliczana na podstawie różnicy mas filtra, ilości powietrza jakie przepuszczono przez filtr w czasie poboru uwzględniając także wpływ środowiska na wynik pomiaru.

$$C = \frac{M_2 - M_1 - B}{V_s} \quad (1)$$

Legenda

C koncentracja pyłu (mg/m³)

M₁ masa filtra (wraz z kasetą, jeśli była używana) przed pobraniem próbek (mg)

M₂ masa filtra (wraz z kasetą, jeśli była używana) po pobraniu próbek (mg)

B średnia zmiana masy próbek ślepych (mg)

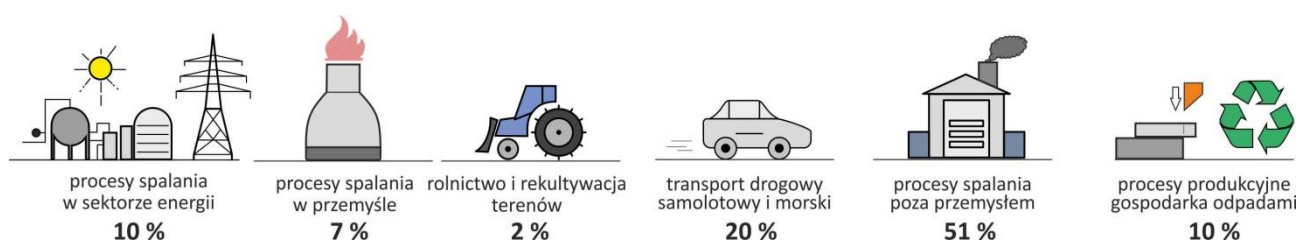
V_s objętość pobranego powietrza (m³)

Analiza ilości pyłu na stanowisku pracy powinna uwzględniać zarówno granicę wykrywalności (LOD), jak i granicę oznaczalności (LOQ). Obydwie te wartości zależą od objętości pobranego powietrza, czułości wagi oraz stabilności procesu ważenia. Szczegółowe informacje na temat wyznaczania LOD i LOQ dla analizy grawimetrycznej próbek pyłu zawieszonego w powietrzu można znaleźć w normie ISO 15767:2009 „Workplace atmospheres - Controlling and characterizing uncertainty in weighing collected aerosols”. W praktyce wygodnie jest określić LOD analizy grawimetrycznej jako trzykrotność odchylenia standardowego zmian masy próbek ślepych.

3. Źródła emisji pyłu pierwotnego

Pył należy traktować jako zanieczyszczenie, które swoje źródło może mieć w zjawiskach naturalnych jak i działalności człowieka. Emisja bezpośrednia do atmosfery to pył pierwotny, który może być uzupełniany pyłem wtórnym, jako efekt reakcji i przemian chemicznych jego prekursorów tj. związków siarki i azotu oraz lotnych związków organicznych. Nie jest tajemnicą, że pył drobny może być transportowany na znaczne odległości, co może zwiększać stężenie pyłu zawieszonego w miejscach, gdzie de facto przemysł nie jest zbyt aktywny.

Główne źródła emisji pyłu pierwotnego to procesy spalania paliw stałych w sektorze przemysłu tj. energetyki, technologii wytwarzania oraz tzw. źródeł stacjonarnych. Do nich zaliczyć należy kotłownie lokalne, indywidualne systemy ogrzewania domów, warsztaty rzemieślnicze, rolnictwo i inne.



Rysunek 8. Antropogeniczne źródła emisji pyłu

Paliwa stałe wykorzystywane w procesie spalania składają się zazwyczaj z węgla, wodoru, siarki oraz niepalnych składników mineralnych. To z nich w procesie spalania tworzy się gruby pył, który po mechanicznym rozdrobnieniu tworzy pyły dyspersyjne. Spalaniu towarzyszy wysoka temperatura w której część składników mineralnych odparuje i sublimuje, a produkty tych przemian są unoszone wraz z gorącym powietrzem. Spadek temperatury pyłu wywołuje efekt kondensacji czego efektem są pyły koloidalne. Pyły zawierające węgiel elementarny powstają w efekcie niepełnego spalania paliw kopalnych oraz biomasy. W przemyśle ten proces jest monitorowany, gdyż istotna jest sprawność procesu oraz jego ekonomia.

Nieco inaczej to jest prezentowane w przypadku indywidualnych źródeł, gdzie nie ma wystarczającej wiedzy a czasami środków ekonomicznych celem zwiększenia efektywności tych źródeł ciepła. Ilość i charakterystyka pyłów powstałych w czasie spalania paliw zależy od rodzaju użytego paliwa, stopnia jego rozdrobnienia, zawartości części niepalnych, składu mineralogicznego, wilgotności, zawartości części lotnych itp. oraz warunków, w jakich zachodziło spalanie tj. rodzaju pieca, rodzaju rusztu, temperatury spalania, współczynnika nadmiaru powietrza, sposobu podawania paliwa itp.

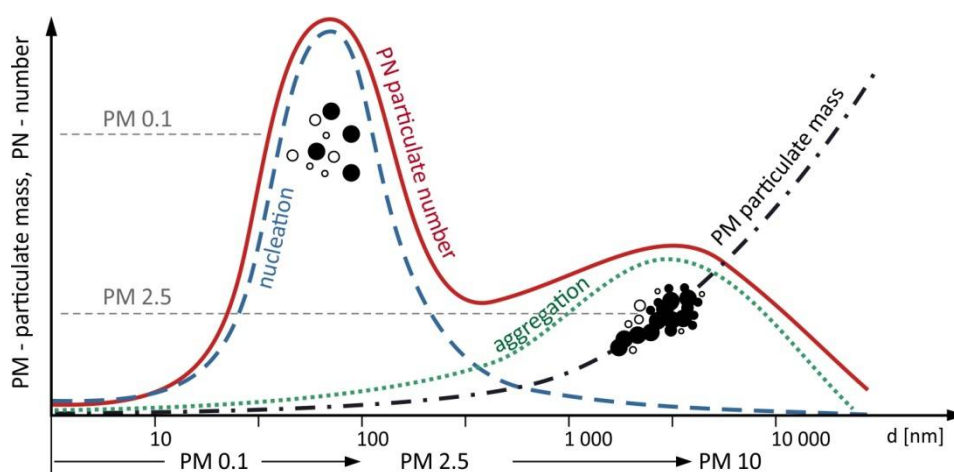
Trzeba zauważyć, że istotnym źródłem pyłu jest także motoryzacja. Ten sektor należy postrzegać nie tylko poprzez pryzmat spalania paliw, ale także jako wszelkie procesy ścierania opon, klocków hamulcowych i inne. Podczas procesu homologacji pojazdów zastosowanie ma Rozporządzenie Komisji Europejskiej numer 2017/1151 w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych. Jednym z elementów tej homologacji jest określenie wielkości emisji cząstek stałych emitowanych przez silniki spalinowe. Badanie takie może być wykonane w warunkach laboratoryjnych uwzględniając wymogi testu WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure) lub w warunkach rzeczywistych tzw. test RDE tj. Real Driving Emission.



Rysunek 9. Badanie emisji cząstek stałych metodą WLTP oraz RDE

Źródło: Instytut badań i Rozwoju Motoryzacji – Bosmal, <https://www.automobil-produktion.de/management/verbrauch-bei-neupkw-rund-42-prozent-hoeher-als-angegeben/1029378>

Rozwój motoryzacji zmierza do tzw. zero emisyjności, którą często odnosi się do samochodów elektrycznych. W tym przypadku można mówić raczej o ilości cząstek generowanych przez układy hamowania i opony, choćby ze względu na znacznie większą masę własną pojazdów wyposażonych w silniki elektryczne. Niestety samochody z napędem elektrycznym jeszcze długo będą w mniejszości względem innych pojazdów, toteż prace nad emisją szkodliwych czynników z tradycyjnych silników spalinowych powinny być ciągle kontynuowane. Zjawiska zachodzące w silniku spalinowym podczas spalania paliwa pokazano na rysunku 10.



Rysunek 10. Schemat powstawania cząstek stałych w silnikach spalinowych.

Źródło: J. Merkisz, J. Pielecha, Emisja cząstek stałych ze źródeł motoryzacji, PP 2014.

Poziom emisji pyłu zawieszonego PM_{2,5}, PM₁₀ jaki zarejestrowano w Polsce w roku 2023 pokazano w tabeli 1. Największa emisja ok. 77% (PM₁₀) oraz 93% (PM_{2,5}) pochodziła ze spalania paliw, co jednoznacznie wskazuje obszar w których należy dokonać istotnych zmian. W tym sektorze największy udział ma niestety emisja pochodząca głównie ze spalania węgla kamiennego i biomasy w gospodarstwach domowych. Spory udział procentowy w całości emisji bo ok. 12% ma rolnictwo, oraz procesy przemysłowe ok. 9%.

Tabela 1. Główne źródła emisji pyłu PM_{2,5}, PM₁₀ w Polsce – rok 2023.

Źródło: „Ocena zanieczyszczenia powietrza na stacjach monitoringu tła regionalnego w Polsce w roku 2024 w zakresie składu pyłu zawieszonego PM₁₀ i PM_{2,5} oraz depozycji metali ciężkich i WWA" GIOŚ.2025

	PM ₁₀ (Gg)	PM _{2,5} (Gg)
1. Energia	248,08	217,26
A. Spalanie paliw	239,89	215,91
Przemysły energetyczne	4,11	2,09
Przemysł wytwórczy i budownictwo	6,16	5,81
Transport	14,49	9,54
Inne sektory	215,14	198,47
B. Emisja lotna z paliw	8,19	1,35
Lotna emisja z paliw stałych	8,07	1,30
Lotna emisja z systemu gazu ziemnego i ropy naftowej	0,12	0,05
2. Procesy przemysłowe	30,03	7,76
Produkty mineralne	19,41	2,90
Przemysł chemiczny	2,31	1,72
Produkcja metali	1,55	0,88
Stosowanie rozpuszczalników i innych produktów	4,00	0,54
Inne	2,75	1,72
3. Rolnictwo	38,57	3,97
Nawozy naturalne	11,11	2,37
Gleby rolne	27,40	1,55
Spalanie resztek roślinnych	0,05	0,05
5. Odpady	4,58	4,45
A. Składowiska odpadów stałych	0,00	0,00
Spopielanie i otwarte spalanie odpadów	1,72	1,60
Gospodarka ściekami	0,00	0,00
Inne	2,85	2,85
Suma	321,26	233,44

Struktura gospodarcza w poszczególnych krajach będzie zróżnicowana z przewagą pewnych komponentów → np. zielona energia, odnawialne źródła, toteż poziomy emisji też mogą być istotnie różne. Uregulowania prawne w EU związane z emisją wynikają z wdrożenia dyrektywa IED w sprawie emisji przemysłowych oraz dyrektywy NEC – zobowiązania redukcyjne.

4. Filtry stosowane w ocenie jakości powietrza atmosferycznego

Poniżej w tabeli przedstawiono podstawowe rodzaje filtrów wykorzystywanych w badaniach jakości powietrza atmosferycznego. Wybór konkretnego rodzaju materiału filtracyjnego jest zależny od badań jakie są przewidziane do wykonania, zwłaszcza analiz chemicznych. Dostępne są filtry o różnych grubościach, gramaturze, odporności termicznej i wymiarach. Jest to dość rozbudowana oferta w której można znaleźć to rozwiązanie, które jest potencjalnie najlepsze z punktu widzenia metody badania. Wydaje się że pomiar masy jest tu najmniejszym problemem, ale nie zawsze tak jest jeżeli w procesie ważenia pomiar masy jest zakłócany ruchem powietrza, niestabilnością termiczną lub ładunkami elektrostatycznymi.

Tabela 2. Rodzaje filtrów wykorzystywanych w badaniach jakości powietrza atmosferycznego

Nazwa	Specyfikacja	Zastosowanie
Filtry z włókna szklanego	Stosowane do ogólnego grawimetrycznego pobierania próbek powietrza i analizy. Są odpowiednie, gdy nie jest wymagana żadna inna analiza poza ważeniem. Nie zawierają lepiszcza ani dodatków. Brak problemów elektrostatycznych, reagują ze związkami kwaśnymi, SO ₃ . Maksymalna temperatura pracy 200°C.	Ocena grawimetryczna, izocyjaniany, glikol etylenowy, frakcje jakości powietrza
MCE	Filtry wykonane z mieszanki octanu i azotanu celulozy, nadają się do monitoringu powietrza, gdzie wymagana jest dalsza analiza niż grawimetryczna. Całkowicie się rozpuszcza, łatwo staje się przezroczysty do liczenia włókien. Brak problemów z wilgocią. Maksymalna temperatura pracy do 125°C	Analiza pyłu metalicznego, azbest i włókna sztuczne, jakość powietrza
PVC	Wysokiej jakości filtry do pomiaru pyłu, krzemionki i chromu. Charakteryzują się niską masą własną, dzięki czemu nadają się do próbek o niższej zawartości i charakteryzują się stabilnością grawimetryczną. Niski poziom popiołu oznacza brak zakłóceń w oznaczaniu krzemionki.	Analiza wagowa, chrom sześciowartościowy, krzemionka
PTFE	Odporne chemicznie, hydrofobowe, odpowiednie do środowisk agresywnych. Nadają się do oznaczeń o wysokiej czułości i bez zakłóceń. Niska masa własna zapewnia stabilność grawimetryczną i nadaje się do stosowania z niższymi poziomami próbek. Dopuszczalna temperatura pracy do 230°C, słaba odporność mechaniczna, wpływ ładunków elektrostatycznych na efekt ważenia	Pyły alkaliczne, WWA, pestycydy, izocyjaniany, jakość powietrza otoczenia
Poliwęglan	Filtry te mają gładką, szklistą powierzchnię z precyzyjnie dobraną wielkością i rozkładem porów, co zapewnia precyzyjną filtrację i separację (mikroskopia). Są przezroczyste, nie barwią się - idealnie nadają się do obserwacji próbek. Chemicznie i biologicznie obojętne, dobra wytrzymałość.	Włókna azbestowe, zastosowania w mikroskopii elektronowej skaningowej
Kwarcowe	Są odporne na ciepło, kwasoodporne, nadają się do stosowania w kominach lub do emisji z silników Diesla. Charakteryzują się wysokim natężeniem przepływu. Nie zawierają lepiszcza ani dodatków. Odporność na temperaturę do 700°C, wysoka szybkość filtracji, słabe właściwości mechaniczne, odporność na reakcje chemiczne ze składnikami gazów odlotowych HF, HCL, SO ₂ , SO ₃ , H ₂ SO ₄ , NO ₂	Zastosowania wysokotemperaturowe, pobieranie próbek z komina, cząstki stałe w spalinach, gazy kwaśne
Srebro	Wykonane z wysokiej czystości srebra (99,97%), odporność na wysokie temperatury, wysoka odporność chemiczna, jednolita porowatość i grubość możliwość czyszczenia, gładkość powierzchni – obserwacja cząstek.	Brom, azbest metodą TEM, krzemionka metodą dyfrakcji rentgenowskiej

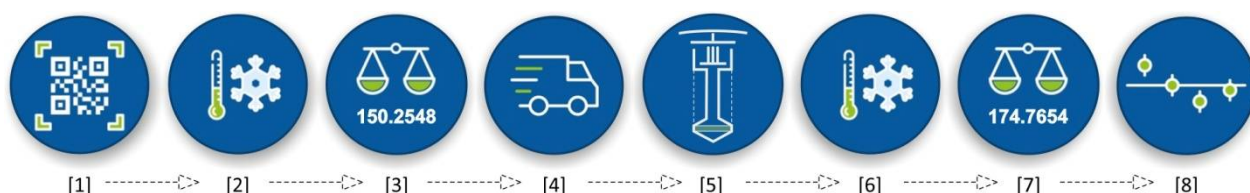
4.1. Wymagania normatywne dla filtrów i systemów wagowych

Tabela 3. Wymagania dla wagowego systemu pomiarowego

Tytuł normy /aktu prawnego	Rozmiar filtra	Rozdziel. wagi	Precyzja St. Dev.
Dyrektywa (EU) 55/2005 w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do działań, które należy podjąć przeciwko emisji zanieczyszczeń gazowych i cząstek stałych przez silniki wysokoprężne stosowane w pojazdach oraz emisji zanieczyszczeń gazowych z silników o zapłonie iskrowym zasilanych gazem ziemnym lub gazem płynnym stosowanych w pojazdach	47mm 70/90/110	$d \leq 1\mu\text{g}$ $d \leq 10\mu\text{g}$	$\leq 2\mu\text{g}$ $\leq 20\mu\text{g}$
Rozporządzenie Komisji Europejskiej (EU) 2017/1151 uzupełniające rozporządzenie (WE) nr 715/2007 Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 5 i Euro 6) oraz w sprawie dostępu do informacji dotyczących naprawy i utrzymania pojazdów	47mm	$d \leq 1\mu\text{g}$	$2\mu\text{g}$
EPA 40 CFR Część 1065 – procedury testowania silników	47mm	$d = 0,1\mu\text{g}$	$0,5\mu\text{g}$
China V/VI - pojazdy ciężarowe o masie powyżej 3500 kg, wyposażone w silniki o zapłonie samoczynnym lub silniki o zapłonie iskrowym na gaz ziemny (NG) lub gaz płynny (LPG).	47mm	$d \leq 1\mu\text{g}$	$2\mu\text{g}$
PN-EN 12341:2024 „Powietrze atmosferyczne - Powietrze atmosferyczne - Standardowa grawimetryczna metoda pomiarowa oznaczania stężeń masowych frakcji PM10 lub PM2,5 pyłu zawieszonego”	47mm	$d \leq 10\mu\text{g}$	$U \leq 25\mu\text{g}$
PN-EN 13284-1 Emisja ze źródeł stacjonarnych. Oznaczenie stężenia masowego pyłu w zakresie niskich wartości. Część 1: manualna metoda grawimetryczna	$47 \div 150\text{mm}$	$d \leq 0,01\text{mg}$	x
ISO/AWI 7708. Workplace air — Size fraction definitions for measurement of airborne particles (in progress)	$25 \div 37\text{mm}$	$d \leq 0,01\text{mg}$	x
EPA 40 CFR part 50 National Primary and Secondary Ambient Air Quality Standards / Quality Assurance Guidance. Document 2.12. Monitoring PM2.5 in Ambient Air Using Designated Reference or Class I Equivalent Methods	47mm	$d \leq 1\mu\text{g}$	$1\mu\text{g}$
China VI / GB 18352.6-2016. Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles	47mm	$d \leq 1\mu\text{g}$	$1\mu\text{g}$

4.2. Metody kondycjonowania i ważenia filtrów

Ocena zmian masy filtrów w obszarze nadzoru nad jakością powietrza atmosferycznego lub też wewnętrznego potencjalnie jest dość prosta – to tylko różnica między masą filtra przed ekspozycją oraz masą filtra po ekspozycji. Należy jednak pamiętać o tym, że każda metoda składa się z wielu etapów podczas których można popełnić istotne błędy. Przykładowy schemat metody pomiarowej wykorzystywanej w pomiarach masy filtrów pokazano na rysunku 11. Niezależnie od stopnia skomplikowania systemu pomiarowego każda waga w cyklu manualnym lub automatycznym określi masę filtra – kluczowe pytanie czy będzie to wynik „dokładny”?



Rysunek 11. Metoda pomiaru masy filtrów

Legenda 1 – oznakowanie filtra, 2 – kondycjonowanie, 3 – pomiar masy I, 4 – transport, 5 – ekspozycja, 6 – kondycjonowanie, 7 – pomiar masy II, 8 – analiza danych

Można powiedzieć, że wynik ważenia będzie zawsze dokładny gdy warunki wykonywania pomiaru będą stabilne. Jest to spore uproszczenie, gdyż z metrologicznego punktu widzenia dokładność to suma błędu losowego oraz systematycznego jaki jest związany z pomiarem masy. W tym przypadku istotna jest tylko wartość błędu losowego czyli tzw. powtarzalność wskazań. Jest ona zależna od:

- o warunków wykonywania pomiaru tj. stabilność temperatury i wilgotności,
- o właściwości ważonego obiektu tj. wielkości powierzchni, elektrostatyki,
- o umiejętności dokonywania pomiarów tj. good-handling,
- o zakłóceń w laboratorium tj. ruch powietrza, drgania podłoża itd.

Wpływ tych czynników na dokładność pomiaru jest niepodważalny, co uwzględniono także w normach. Z tego powodu masa filtra przed ekspozycją lub po ekspozycji wg. EN 12341:2024 jest określana jako średnia masa z dwóch lub trzech pomiarów przy założeniu, że:

- o różnica mas filtrów czystych nie jest większa niż 0.040mg
- o różnica mas filtrów po ekspozycji nie jest większa niż 0.060mg

Inne podejście dla oceny dokładności pomiaru oraz oszacowania masy filtrów badanych jest przedstawione w przewodniku Health and Safety Laboratory (HLS-UK) „Methods for the determination of hazardous substances. General methods for sampling and gravimetric analysis of respirable and inhalable dust”. Błąd losowy procesu ważenia można oszacować jako to 3-krotność powtarzalności ważenia (st. dev.) filtrów typu „blank”, gdy pomiary są wykonywane w warunkach stabilnych.

Podobne wymaganie zawiera rozporządzenie komisji (UE) 2017/1151, tu masa filtra jest uznawana za stabilną, jej zmienność masy filtrów referencyjnych (blank filters) nie jest większa niż 0.005mg przy zachowaniu stabilności warunków w pokoju wagowym:

- temperatura $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
- wilgotność $45\% \pm 8\%$.

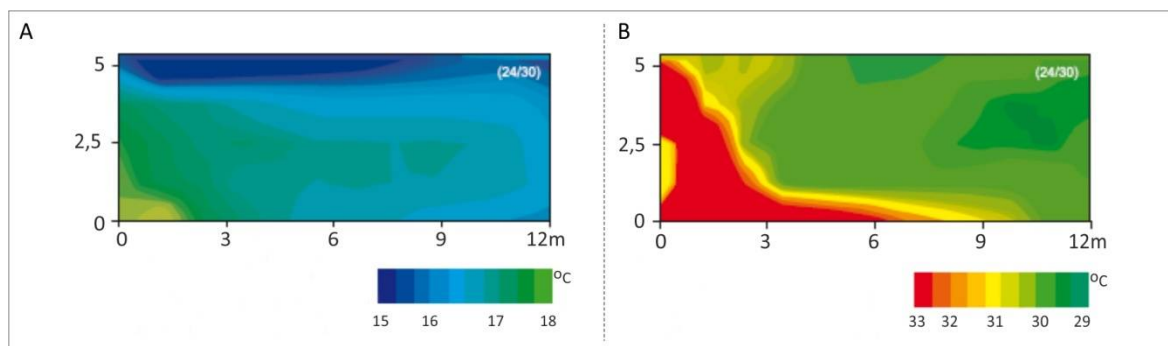
Powyższe zapisy wyraźnie sygnalizują to, że pozornie posty pomiar masy filtra nie jest jednoznaczny, stąd też konieczna jest pewna tolerancja dla warunków środowiskowych w zakresie kondycjonowania filtrów, wymagania te pokazano tabeli 4.

Tabela 4. Warunki Kondycjonowania filtrów dla różnych obszarów badania

Tytuł normy /aktu prawnego	Wilgotność	Temperatura
Rozporządzenie Komisji Europejskiej (EU) 2017/1151 w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych (Euro 5 i Euro 6)	$45\% \pm 8\%$	$22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
EPA 40 CFR Część 1065 – procedury testowania silników, Ograniczenia: zmienność wilgotności nie może istotnie wpływać na masę pobranego pyłu – wymagana analiza laboratorium	45%	$22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
PN-EN 12341:2024 „ Powietrze atmosferyczne - Powietrze atmosferyczne - Standardowa grawimetryczna metoda pomiarowa oznaczania stężeń masowych frakcji PM10 lub PM2,5 pyłu zawieszonego”	$45\% \pm 5\%$	$20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
PN-EN 13284-1 Emisja ze źródeł stacjonarnych. Oznaczenie stężenia masowego pyłu w zakresie niskich wartości. Część 1: manualna metoda grawimetryczna.	$40\% \div 50\%$	$20^{\circ}\text{C} \div 30^{\circ}\text{C}$
ISO/AWI 7708. Workplace air — Size fraction definitions for measurement of airborne particles (in progress), ISO 15767:2009 Workplace atmospheres — Controlling and characterizing uncertainty in weighing collected aerosols	$50\% \pm 5\%$	$20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
EPA 40 CFR part 50 National Primary and Secondary Ambient Air Quality Standards / Quality Assurance Guidance. Document 2.12. Monitoring PM2.5 in Ambient Air Using Designated Reference or Class I Equivalent Methods	$30\% \div 40\% \pm 5\%$	$20^{\circ}\text{C} \div 23 \pm 2^{\circ}\text{C}$

W wielu przypadkach, zwłaszcza dla metod ważenia manualnego warunki kondycjonowania wynikają z możliwości laboratorium → montaż, instalacja i sterowanie urządzeniami zewnętrznymi. Jest to najprostsza i najtańsza metoda uzyskania zgodności z normą, a co z tym idzie ograniczenia potencjalnych błędów pochodzących od zmian wilgotności i temperatury.

Główny problem takich systemów to niejednorodność temperatury w pomieszczeniu wagowym, gdy wykorzystano typowy klimatyzator biurowy. Ponadto można oczekiwać zbyt niskiej wilgotności w okresie zimowym, gdy załączają się dodatkowo urządzenia utrzymujące zakładany poziom temperatury.



Rysunek 12. Rozkład temperatury w pomieszczeniu przy zastosowaniu klimatyzacji biurowej.

Źródło: Fuji Electric Inverter RSG18LF

A – nawiew w pionie, $T_{\text{Max}} 18^{\circ}\text{C}$, B – nawiew w poziomie, $T_{\text{Max}} 30^{\circ}\text{C}$,

Nawiew powietrza skierowany w dół i do przodu

W zakresie kondycjonowanie filtrów znacznie lepszym rozwiązaniem jest takie w którym stabilne warunki w zakresie temperatury i wilgotności są utrzymywane wewnątrz konstrukcji w której zainstalowano stanowisko wagowe. Taką konstrukcją jest układ robotyczny RB 2.5Y.F, który pracuje zgodnie z wymaganiami normy EN 12341:2024. Wpływ warunków kondycjonowania filtrów na zmienność ich masy został zdefiniowany w EN 12341:2024, patrz punkt 9. „Performance characteristics of the method concept”. Wydaje się, że większy wpływ ma wilgotność → absorpcja powierzchniowa filtra. Jednak ten problem należy rozważać zawsze w odniesieniu do konkretnego materiału filtracyjnego, który jest już obciążony. Wszelkie niezamierzone odchyłki w pomiarach, których źródłem są warunki środowiskowe powinny być zauważone poprzez obserwację zmian masy filtrów typu „blank”.

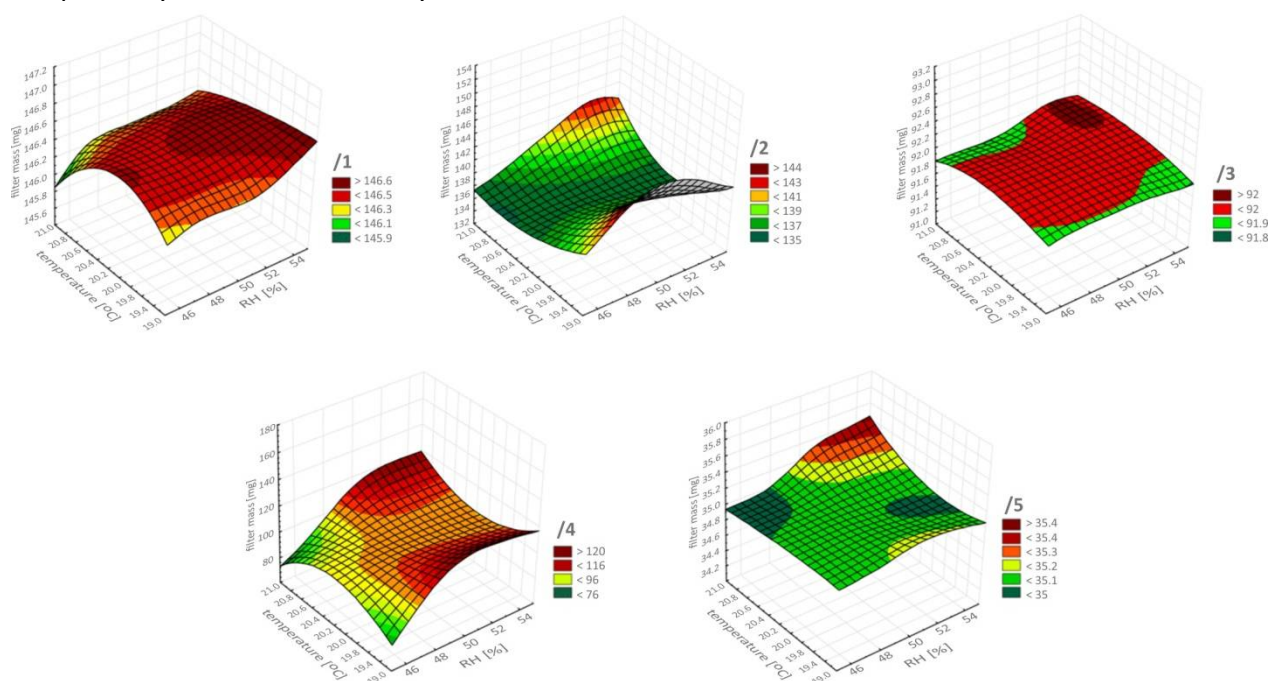
Wpływ warunków kondycjonowania na zmienność masy filtrów jest także przedmiotem badań naukowych³ które pokazują bardziej szczegółowo charakter tego zjawiska. Przeprowadzono analizę stabilności masy filtrów w zakresie stabilnej temperatury przy zmiennej wilgotności oraz w zakresie stabilnej wilgotności przy zmiennej temperaturze. Podczas badań w Instytucie Inżynierii Podstaw Środowiska Polskiej Akademii Nauk w Zabrze wykorzystano układ automatyczny UMA 2.5Y.FC. Na podstawie badań stwierdzono, że czysty materiał filtracyjny typu włókno szklane, kwarcowe oraz PTFE ma stabilną strukturę, która jest mniej reaktywna na zmiany środowiskowe względem tych samych filtrów obciążonych. Drobne frakcje pyłu takie jak PM₁, PM_{2,5} są bardziej wrażliwe na zmiany temperatury i RH. Higroskopijne składniki PM np. azotany, siarczany i sól morską mogą absorbować wilgoć przy wyższej RH, zwiększając masę, podczas gdy wahania temperatury mogą powodować rozszerzanie się lub kurczenie cząstek.

³ Chyzykhov et. al. Automatic weighing system vs. manual weighing precision comparison in PM-loaded filter measurements under different humidity conditions. Environ. Monit. Assess. 195 (11).

W odniesieniu do filtrów z pierścieniami uszczelniającymi PTFE stwierdzono nieprawidłowe wahania wskazań mas w efekcie występowania elektryczności statycznej. Przed pomiarami masy konieczna jest dejonizacja powierzchni filtra. Problem elektryczności statycznej jest wyraźnie zaznaczony praktycznie w każdej normie, gdyż jest to jeden z kluczowych czynników zakłócających pomiar masy, gdy wykorzystywane są filtry z PTFE.

Uzyskane wyniki pokazują stabilność filtrów typu „blank” w zmiennych warunkach środowiskowych. Wszelkie niewielkie zmienności dla filtrów obciążonych wynikają prawdopodobnie z fizycznego lub chemicznego zachowania zebranych cząstek stałych, a nie ze znaczącego wpływu zmieniających się warunków na same filtry. Nie bez znaczenia jest także odpowiednia technika pomiarowa i jakość używanych filtrów.

W innych badaniach naukowych w ramach projektu C2-001/2020/NP-I wykorzystano układ robotyczny RB 2.4Y.F. Celem badań było wykazanie równoważności metod automatycznej względem metody manualnej EN 12341:2024 oraz oszacowanie wpływu zmian wilgotności i temperatury na zmienność masy filtrów.



Rysunek 13. Zmienność masy filtrów w trakcie kondycjonowania.

Źródło: Widziewicz-Rzońca K, Janas S, Błaszczak B, et al. Advancing the understanding of PM filter mass stability: unveiling the influence of humidity and temperature.

Scientific Reports of Fire University. (2023);1(88):7-26. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.9741>

Zmienność masy filtrów zależnie od zmiennych warunków kondycjonowania w zakresie $50 \pm 5\%$, $20 \pm 1^\circ\text{C}$, zaprezentowano poniżej.

- /1 filtry kwarcowe $m = 146.01 + 0.003RH + 0.015T$
- /2 PTFE $m = 157.28 + 0.186RH - 1.473T$
- /3 filtry z włókna szklanego $m = 90.038 + 0.018RH + 0.055T$
- /4 filtry nylonowe $m = 51.799 + 2.242RH - 2.907T$
- /5 filtry poliwęglanowe $m = 35.76 + 0.004RH - 0.046T$

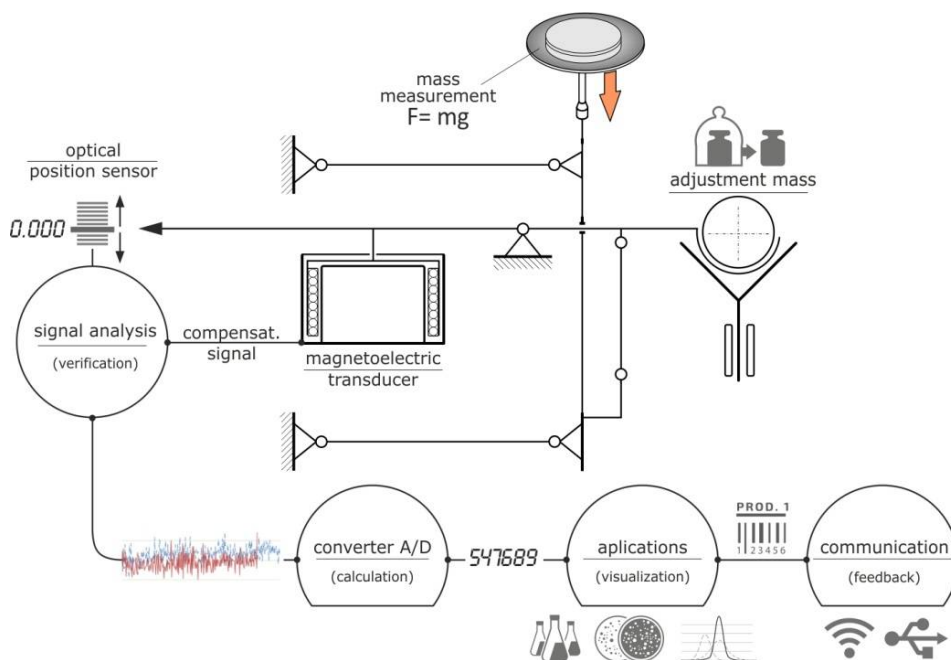
5. Idea pomiaru masy

Pomiar masy polega na określeniu siły z jaką ważona próbka jest przyciągana przez Ziemię, a następnie przedstawieniu tej wartości w jednostkach masy tj. gramach, miligramach lub innych wartościach, które uzyskuje się w efekcie zastosowania odpowiedniego przelicznika. Zaprezentowanie wyniku ważenia w jednostkach masy jest możliwe, gdyż każda waga jest fabrycznie skalowana /adiustowana/ względem certyfikowanych wzorców masy. W tym procesie nie jest uwzględniana siła wyporu, a proces adiustacji jest realizowany za pomocą stalowych wzorców masy o gęstości $\sim 8\text{g/cm}^3$. W rzeczywistości gęstość ważonych obiektów jest istotnie różna, z tego powodu „mówi się” o tzw. umownej wartości masy ciała.



Rysunek 14. Adiustacja fabryczna z wykorzystaniem certyfikowanych wzorców

W wielu metodach ważenia wpływ siły wyporu na wynik pomiaru jest pomijalny. Wyjątkiem jest badanie emisji cząstek stałych z silników spalinowych w którym wynik pomiaru masy filtra musi być skorygowany o wpływ siły wyporu powietrza. Ogólny schemat funkcjonalny wagi pokazano na rysunku 15.



Rysunek 15. Schemat funkcjonalny wagi z przetwornikiem elektromagnetycznym, Rozdzielczość ~ 60 mln. działek elementarnych, St. dev. $\sim 0,5 \times 10^{-6}$, aplikacja w wagach serii UYA, MYA, XA

Typowy pomiar masy zazwyczaj polega na jednokrotnym określeniu masy ważonego obiektu. Patrząc na to nieco dokładniej potrzebujemy informacji o stanie wagi, gdy jest ona nieobciążona oraz gdy na jej nośni jest położona próbka. Z metrologicznego punktu widzenia są to jednak dwa pomiary. Stan wagi nieobciążonej nie musi być idealnym zerem, a tzw. „pusta” szalka też jest ważona, z tym że wynik tego procesu wynosi umownie 0.00g

Powyższe zależności są szczególnie istotne w tych metodach wagowych, w których masa obiektu jest wyznaczana jako różnica między dwoma stanami. Dotyczy to oceny wszelkich przemian termicznych próbek tj. wygrzewanie, starzenie, spoielanie oraz procesów sączenia i absorpcji. W tym przypadku można umownie mówić o tzw. ważeniu różnicowym. Niekiedy interwał czasowy między pomiarami jest liczony w godzinach, co może wprowadzać dodatkowe zakłócenia w efekcie zmian środowiska pracy. Może to być istotne w badaniach emisji pyłu ze źródeł stacjonarnych, badaniach stężeń masowych pyłu zawieszonego oraz podczas oceny poziomu emisji cząstek stałych emitowanych z silników spalinowych.



Rysunek 16. Manualny pomiar masy filtra – mikrowaga MYA 5.5Y,
Max 5g, działka elementarna $d=1 \times 10^{-6} \text{g}$,
Precyzja pomiaru $S=0,5 \times 10^{-6} \text{g}$, adiustacja wewnętrzna automatyczna, OIML certyfikacja

Tam gdzie zmiana masy w wyniku tych procesów jest znaczna ($m > 50\% \text{ Max}$), dokładność analizy jest determinowana przez zmiany czułości wagi oraz wartość błędu losowego. Dla obiektów o małych masach rzędu miligramów, tak jak filtry, sączi, dokładność pomiaru jest zależna tylko od wartości błędu losowego.

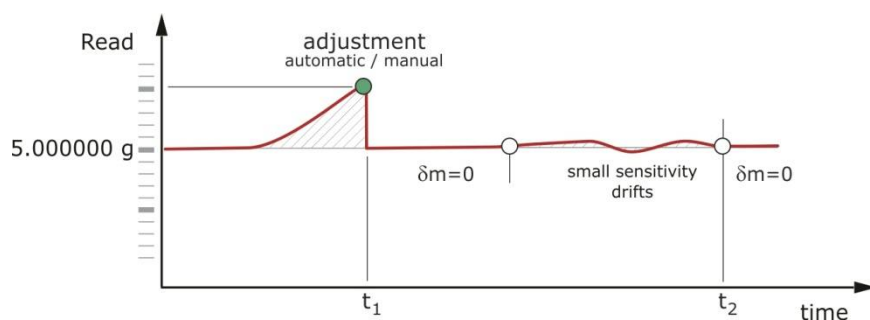


Rysunek 17. Czynniki wpływające na wartość błędu losowego w procesie pomiaru masy

5.1. Adiustacja

Pomiar masy w przemyśle musi być szybki i pewny, zwłaszcza gdy wynik mierzenia jest wykorzystywany jako istotna informacja jakościowa lub jako element sterowania produkcją. Oczekuje się zatem, że systemy wagowe będą zawsze pracować dokładnie, niezależnie od zmienności warunków zewnętrznych. Takie założenie jest prawdziwe dla wag których działka elementarna / odczytowa ma dość dużą wartość $\rightarrow d \geq 1\text{g}$. Można wówczas mówić o tzw. pomiarach technicznych, które są wykonywane zazwyczaj z wykorzystaniem przetworników tensometrycznych. Dokładniejsze mierzenie masy w przemyśle lub laboratorium wymaga zastosowania znacznie bardziej skomplikowanych systemów wagowych $\rightarrow$ przetwornik magnetoelektryczny. Ich dokładność pomiaru jest gwarantowana dzięki okresowej adiustacji.

Zadaniem adiustacji jest korekta wskazań wagi, którą uzyskuje się w wyniku porównania wyniku ważenia wzorca tzw. masy adiustacyjnej z jej znaną wartością. Porównania te są wykonywane automatycznie $\rightarrow$ zmiana temperatury $\rightarrow$ upływ czasu lub półautomatycznie przed rozpoczęciem badań $\rightarrow$ ingerencja operatora wagi. Masa adiustacyjna nie posiada własnego świadectwa wzorcowania, ale wzorcowanie jako procedura pokazująca potencjalną „dokładność” wskazań jest realizowana dla wagi jako całości, więc de facto także w odniesieniu do wartości wewnętrznej masy adiustacyjnej. Zasadę adiustacji pokazano na rysunku 18.



Rysunek 18. Ogólna zasada działania adiustacji wagi elektronicznej

Adiustacja wagi w ogólnym ujęciu jest typowym ważeniem obciążenia, więc z metrologicznego punktu widzenia, jakość tego procesu może być definiowana przez precyzję pomiaru. Jak wiadomo precyzja każdego pomiaru jest dość mocna zależna od warunków w jakich wykonywany jest pomiar oraz umiejętności operatora. Należy zauważyć że automatyzacja adiustacji oraz zabudowanie wewnątrz wagi masy adiustacyjnej znacznie zwiększa precyzję pomiaru względem pomiarów wykonywanych manualnie. Jest to szczególnie istotne i pożądane, gdyż na podstawie wyniku ważenia masy adiustacyjnej dokonywana jest korekta czułości wagi.

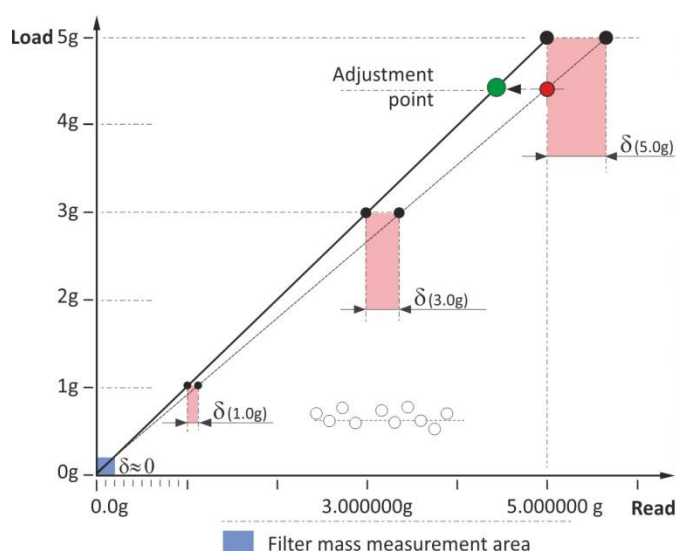
Nie istnieje jedno uniwersalne rozwiązanie techniczne dla adiustacji, gdyż jest ona zawsze integralną częścią wagi, w zakresie kształtu, lokalizacji, wymiarów oraz zasady działania. Przykład rozwiązań konstrukcyjnych w zakresie adiustacji wag laboratoryjnych pokazano na rysunku 19.

Wartość wewnętrznej masy adiustacyjnej zazwyczaj wynosi około 70 ~ 90% obciążenia maksymalnego wagi, tak więc korekta zmian czułości wagi w efekcie wykonania adiustacji wagi jest skuteczna, gdy masa ważonych elementów jest znaczna.



Rysunek 19. Widok masy adiustacyjnej mikrowagi serii **MYA** oraz wagi analitycznej **XA**

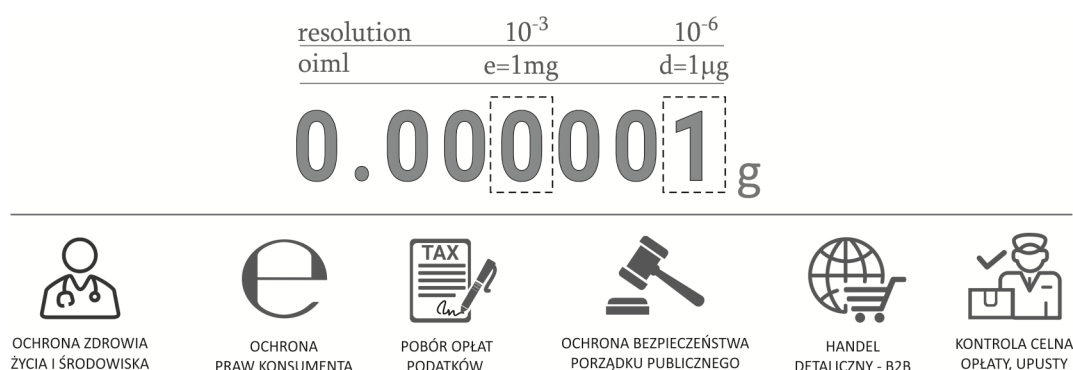
Warto tu zauważyć, że ocena dokładności pomiaru wymaga określenia wartości błędu systematycznego oraz błędu losowego. Jak wspomniano wcześniej błąd systematyczny tj. zmiana czułości jest istotnie ograniczany przez adiustację wagi, błąd losowy ma wartość stałą przy założeniu, że warunki wykonywania pomiaru są stabilne. Jest to pewne uproszczenie, gdyż w rzeczywistości na wartość błędu losowego wpływ mają także umiejętności operatora w zakresie ważenia oraz niestabilność ważonych obiektów. Realne spojrzenie na proces adiustacji wewnętrznej można zawrzeć w konkluzji – dokładność pomiaru masy filtrów lub obiektów o małych masach jest zależna tylko od wartości błędu losowego wagi. Graficznie taką zależność pokazano na rysunku 20.



Rysunek 20. Korekta czułości wagi, Mikrowaga **MYA 5.5Y.FA**,
Max 5g, działka elementarna $d=1 \times 10^{-6} \text{g}$,
Precyzja pomiaru $S=0,5 \times 10^{-6} \text{g}$, adiustacja wewnętrzna automatyczna, OIML certyfikacja

5.2. Legalizacja systemów wagowych – fakty i mity

Legalizacja jest czynnością poprzez którą realizowany jest nadzór państwa nad istotnymi elementami życia publicznego. W przypadku handlu jest to zabezpieczenie klienta przed potencjalnym oszustwem, w kontaktach B2B to element wzajemnego zaufania co do jakości oraz ilości produktów jaką dostarczamy. W obydwu przypadkach jest to raczej skala makro, której wymagania opisują przepisy OIML przeniesione do narodowych aktów prawnych. Ochrona środowiska a w zasadzie pomiary dotyczące tego obszaru są ściśle związane ze zdrowiem ludzi, tym samym muszą być monitorowane i nadzorowane przez metrologię prawną. Co do zasady nie budzi to żadnych wątpliwości. Należy tu wyraźnie zaznaczyć, że podstawą metrologii jest spójność pomiarowa w której istnieje łańcuch nieprzerwanych powiązań między wzorcami. Najmniejszy wzorec masy ma nominal $1\text{mg} \rightarrow 10^{-3}\text{g}$, co istotnie ogranicza możliwości kontroli dokładności wskazań wag przez organy prawnego nadzoru metrologicznego. Warto wiedzieć, że metrologia prawna klasyfikuje wagi względem wartości działki legalizacyjnej $\rightarrow$ klasa dokładności, podając także wartości maksymalnych błędów dopuszczalnych. Obecnie potrafimy dokonywać pomiary masy z rozdzielczością 10^{-6}g , co wymaga zupełnie innego podejścia do oceny dokładności urządzenia pomiarowego.

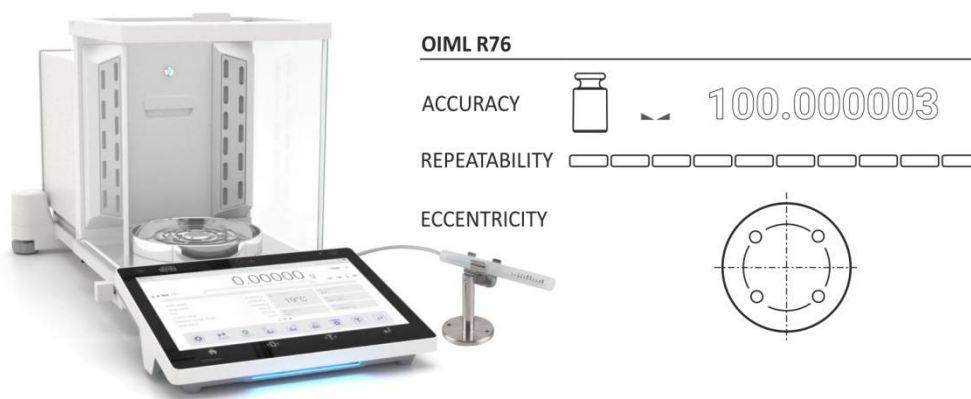


Rysunek 21. Obszary i rozdzielczość wag w metrologii prawnej

Czy to zatem oznacza, że metrologia prawna jest archaiczna i bezużyteczna?. Zdecydowanie nie, gdyż podaje ona znormalizowane i uznane metody badań dokładności. Dzięki temu możliwa jest obiektywna, wielokrotna ocena tego samego systemu w dowolnym miejscu jego instalacji. Maksymalne błędy wg. metrologii prawnej są znacznie większe niż te osiągnęte przez współczesne wagi elektroniczne, ale to tylko pokazuje jak szybko nastąpił rozwój technologii pomiarów masy. Dobrym tego przykładem jest firma Radwag Wagi Elektroniczne.

Wagi wykorzystywane w pomiarach związanych z ochroną środowiska muszą być okresowo legalizowane, jeżeli tak wynika z wymagań zawartych w narodowych aktach prawnych. Z drugiej strony Systemy Zarządzania Jakością obligują do udokumentowanego nadzoru poprzez sprawdzanie i okresowe wzorcowania. Mamy zatem pewien dualizm, który dotyczy nie tylko wag elektronicznych. Wydaje się, że najważniejsze są jednak codzienne weryfikacje $\rightarrow$ SOP, które dają realną ocenę obecnego stanu technicznego wagi. Nie zawsze jest to prosta procedura, gdy dotyczy ona układów robotycznych.

Ocena metrologiczna wagi może być realizowana w zakresie dokładności wskazań (błąd systematyczny), powtarzalności (błąd losowy), odchyłki centryczności, dokładności wskazań z użyciem tary itd. Według metrologii prawnej wymagane są testy sprawdzające dokładność wskazań dla obciążeń rosnących i malejących, test powtarzalności wskazań dla obciążenia $\frac{1}{2}$ Max oraz obciążenia bliskiego wartości maksymalnej $\sim$ Max, test niecentryczności. Maksymalne odchyłki podczas tych testów są takie same jak podczas oceny zgodności tzn. $\rightarrow$ tzn. 0.5e; 1e; 1.5e.



Rysunek 22. Waga XA 82/220.5Y.A – podstawowe testy metrologiczne

Z metrologicznego i inżynierskiego punktu widzenia powtarzalność wskazań wagi, gdy warunki badania są stabilne, jest wartością stałą charakterystyczną dla danej konstrukcji mechaniczno – informatycznej. Zgodnie z GLP /GMP ładunek zawsze powinien być umieszczany na środku szalki – błąd centryczności (choć niewielki) jest nieistotny. Realnie zatem pozostaje do weryfikacji tzn. błąd czułości wagi. Jest on zazwyczaj oceniany wykorzystując wzorce masy dla dwóch obciążeń tj. niewielkiego (ok. 1% ÷ 5%Max) oraz znacznego (ok. 50 ÷ 100%Max). Przykładowe wymagania metrologiczne dla wagi XA 110.5Y.A w odniesieniu do metrologii prawnej pokazano w tabeli 5, 6.

Tabela 5. Główne parametry metrologiczne wagi XA 82/220.5Y.A

Obciążenie maksymalne	Obciążenie minimalne	Działka elementarna	Działka legalizacyjna	Ilość działek legalizacyjnych	Klasa dokładności
Max 82/220g	Min 1mg	d=0.01/0,1mg	e=1mg	n= 22 000 000	

Tabela 6. Wymagania OIML dla wagi XA 82/220.5Y.A

Obciążenie wagi w działkach legalizacyjnych	Obciążenie wagi wyrażone w gramach	MPE w działkach legalizacyj. (e)	MPE w działkach wagi (g)	MPE podczas użytkowania	MPE wg. QC Radwag
(n)	(g)	ocena zgodności / legaliz. ponowna		(g)	(g)
0e ≤ m ≤ 50 000e	0g ≤ m ≤ 50g	± 0,5e	± 0,5mg	± 1,0mg	± 0,06mg
50 000e < m ≤ 200 000e	50g < m ≤ 200g	± 1,0e	± 1mg	± 2,0mg	
200 000e < m	200g < m ≤ 220g	± 1,5e	± 1,5mg	± 3,0mg	

Metoda weryfikacji poprawności wskazań wagi poprzez dla tzw. SOP tj. Standard Operation Procedure powinna być krótka, czytelna a zarazem dająca natychmiastowy obiektywny wynik kontroli. Przykład arkusza kontrolnego SOP pokazano w tabeli 7.

Tabela 7. Codzienne sprawdzenie dokładności wskazań wagi – SOP dla dwóch zakresów ważenia

Polecenie	Status
1. opróżnić szalkę wagi	ok.
2. nacisnąć przycisk i wykonać adiustację wagi	ok.
3. wyzerować wskazanie wagi, o ile to potrzebne	ok.
4. postawić na szalce wagi wzorzec masy (wart. referencyjna)	$M_{wz} = 0.5000028g$
5. odczytać wskazanie wagi $\rightarrow R (g)$	$R = 0.49999$
6. porównać wynik ważenia wzorca z wartością referencyjną, patrz świadectwo wzorcowania, $D (g)$	$D = M_{wz} - R$ $0.5000028 - 0.49999$ $D = -0,0000128g$
7. postawić na szalce wagi wzorzec masy (wart. referencyjna)	$M_{wz} = 50.00006g$
8. odczytać wskazanie wagi $\rightarrow R (g)$	$R = 49.99998g$
9. porównać wynik ważenia wzorca z wartością referencyjną, patrz świadectwo wzorcowania, $D (g)$	$D = M_{wz} - R$ $50.00006 - 49.99998$ $D = -0.00008g$
10. Obliczone różnice odnieść do własnych limitów dotyczących dokładności ważenia, patrz System Zarządzania Jakością	
11. Przykład:	
a. Limit dla ważenia wzorca o masie 0.5g wynosi $\pm 0.00005 g$ względem wartości referencyjnej	
b. Limit dla ważenia wzorca o masie 50g wynosi $\pm 0.00010 g$ względem wartości referencyjnej	
12. Tolerancja dla wzorca masy 0.5g	
a. górny próg tolerancji: $HI = 0.5000028g + 0.00005g = 0.5000528g \sim 0.500053g$	
b. dolny próg tolerancji: $LO = 0.5000028g - 0.00005g = 0.4999528g \sim 0.499953g$	
c. sprawdzenie: $HI = 0.500053g < R = 0.49999g < LO = 0.499953g$	
13. Tolerancja dla wzorca masy 50g	
a. górny próg tolerancji : $HI = 50.00006g + 0.00010g = 50.00016g$	
b. dolny próg tolerancji : $LO = 50.00006g - 0.00010g = 49.99996g$	
c. sprawdzenie: $HI = 50.00016g < R = 49.99998g < LO = 49.99996g$	

Legenda

M_{wz} – wartość masy wzorca jaką podano w świadectwie wzorcowania, od wartości nominalnej odejmij lub dodaj wartość odchyłki jaką wyznaczono dla wzorca,

R – wynik ważenia wzorca masy, odczytaj wynik gdy wskazanie będzie stabilne,

D – różnica pokazuje jaka jest odchyłka dokładności wagi dla danego obciążenia

6. Pomiary manualne

Odmierzanie masy metodą ręczną poprzez umieszczenie na szalce wagi ładunku jest najprostszą i najtańszą metodą stosowaną przez wiele laboratoriów. W skali mili (10^{-3}) jest to metoda niezawodna, ale w skali mikro (10^{-6}) można już obserwować jej pewne niedostatki. W procesie pomiaru masy decydujące znaczenie wielkość ważonego elementu w kontekście rozdzielczości wagi⁴ tj. jej działki elementarnej. Większa rozdzielczość wagi zazwyczaj implikuje konieczność zastosowania osłon szalki co pokazuje, że wpływ zjawisk fizycznych tj. ruchu powietrza na proces pomiaru masy jest istotnie negatywnym zjawiskiem. Powyższe zależności dotyczą metod w których dokonuje się pomiaru masy filtrów, sączków, czyli obiektów o niskiej masie, ale o dość dużej powierzchni.



Rysunek 23. Pomiar masy sączka – badanie zawiesin, oczyszczalnia ścieków, waga XA 82/220.5Y
Działka elementarna $d=0.01/0.1\text{mg}$, adjustacja automatyczna, certyfikat OIML

Dodatkowo metoda ta zazwyczaj wymaga kilkukrotnego wyznaczenia masy filtra, co może wprowadzać niedokładności na różnych etapach analizy. Z metrologicznego punktu widzenia dokładność metody badawczej w tym przypadku jest zależna tylko od wartości błędu losowego. Przy założeniu, że warunki badania są „stabilne” istotny wpływ na wartość błędu losowego ma tzw., czynniki ludzkie. Umiejętność poprawnego ważenia nazywana potocznie „good handling” zawiera wiele elementów, które powinny łączyć w sobie teorię i praktykę np. ważenie bez uderzeń, umieszczanie ładunków na środku szalki, obserwację zmienności wyniku, zachowanie kolejności postępowania w metodzie itd.

6.1. Rozwiązania konstrukcyjne dla metod ważenia manualnego

Z punktu widzenia odbiorcy każda waga wygląda podobnie, więc nawet niewielkie różnice w konstrukcji wagi niestety niewiele „mówią” o tym jak „dokładnie” można odmierzyć – określić masę próbki. Występowanie potencjalnych czynników zakłócających pomiar masy jest tu dodatkowym utrudnieniem. Można stwierdzić, że większość odbiorców poszukuje uniwersalnych systemów wagowych, które będą odpowiednie dla pomiarów realizowanych w całym zakresie pomiarowym tj. od wartości Min do wartości Max. Uniwersalizm jest rozwiązaniem poprawnym z ekonomicznego punktu widzenia, choć niekoniecznie dobrym dla metrologii tj. dokładności analizy wagowej.

⁴ OIML International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), 3rd Edition, 2007

Rozdzielczość wagi najczęściej jest zdefiniowana przez wymagania zawarte w normach lub przewodnikach, np. „waga analityczna, umożliwiająca ważenie z dokładnością co najmniej 0.1mg” wg. EN 872, Water quality. Determination of suspended solids. Method by filtration through glass fibre filters, lub „waga: rozdzielczość od 0.01mg do 0.1mg, zakres powinien być dostosowany do mas ważonych części wg. EN 13284-1:2018 - Stationary source emissions - Determination of low range mass concentration of dust - Part 1: Manual gravimetric method. Podobnie jest w przypadku normy EN 12341:2024 „ Ambient air - standard gravimetric measurement method for the determination of the PM10 or PM2,5 mass concentration of suspended particulate matter tzn. „Używana waga musi być zainstalowana i obsługiwana w pomieszczeniu wagowym, a jej rozdzielczość musi być równa lub mniejsza niż wartość 0,01mg.”

Na podstawie powyższych zapisów widać pewną niejednoznaczność normatywną, wymagania dotyczą dokładności pomiaru lub rozdzielczości wagi. W pierwszym przypadku tj. dokładności pomiaru należy ją rozumieć jako sumę błędu losowego i systematycznego wagi ⁵, dla drugiego przypadku warto zauważyć, że rozdzielczość wagi nie jest jednoznaczna z dokładnością, zwłaszcza gdy obiektem ważonym będzie filtr. Co zatem realnie oferują wagi dedykowane dla pomiarów wykonywanych ręcznie?

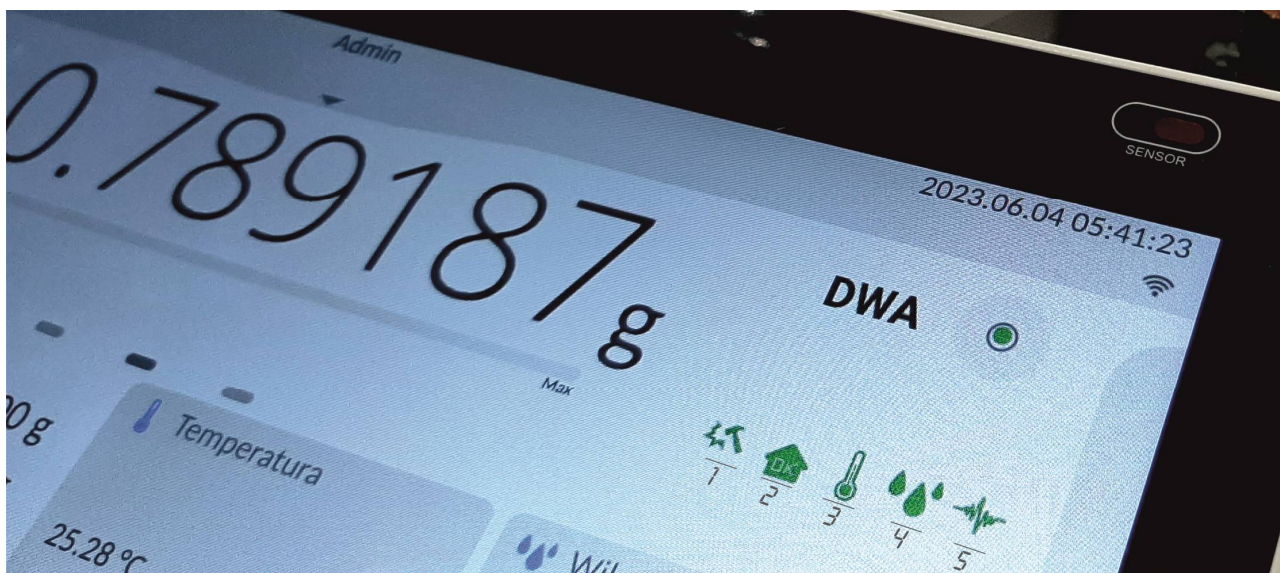
Rozdzielczość wagi, czyli to co jest eksponowane na wyświetlaczu wagi to tylko drobny fragment układu przetwarzania cyfrowego wagi. Wewnętrzny układ przetwarzania sygnału pomiarowego ma rozdzielczość co najmniej 40 ÷ 90mln działek elementarnych, które są analizowane, filtrowane a następnie przetwarzane do rozdzielczości jaka jest wykorzystywana podczas ważenia próbek. Rozdzielczości typowych wag wykorzystywanych w laboratorium pokazano w tabeli 8.

Tabela 8. Podstawowe parametry wag laboratoryjnych

Nazwa wagi	Max obciążenie	Rozdzielczość Działka elementarna	Ilość działek elementarnych	Powtarzalność Błąd losowy
AS 220.X7	220g	0.1mg	2 200 000	0.06 ÷ 0.07mg
AS 520.X7	520g	0.1mg	5 200 000	0.07 ÷ 0.2mg
AS 82/220.X7	82/220g	0.01/0.1mg	22 000 000	0.01 ÷ 0.06mg
XA 210.5Y	210g	0.01mg	21 000 000	0.005 ÷ 0.012mg
MYA 5.5Y	5g	0.001mg	5 000 000	0.0004 ÷ 0.0012mg
UYA 2	2.1g	0.0001mg	21 000 000	0.00015 ÷ 0.00035mg

⁵ PN-ISO 5725-1:2023. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions

Lepsze zrozumienie tego, czym jest rozdzielczość wagi i jak jest ona ważna można uzyskać poprzez porównanie jej do odległości. Błąd pomiaru odległości 2000m z rozdzielczością 1mm nie może być większy niż ok. 0.5mm, co w zakresie rozdzielczości może być porównywalne do typowej wagi analitycznej np. AS 220.X7. Pomiar masy w farmacji jest bardziej rygorystyczny, jak bardzo? Trzeba zmierzyć odległość 2000m z dokładnością 0.1mm, akceptując błąd pomiaru nie większy niż $0.05 \div 0.07\text{mm}$.



Rysunek 24. Rozdzielczość wagi / aplikacje wspierające proces pomiaru masy

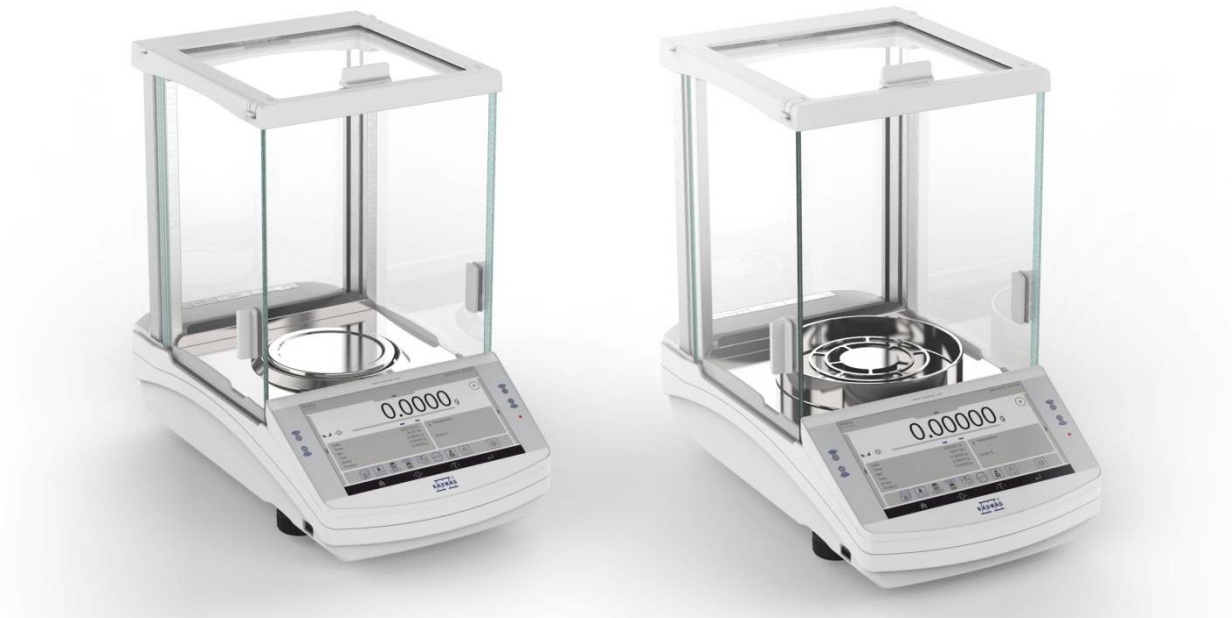
Legenda: 1 – monitoring jakości ważenia (udary), 2 – status Digital Weighing Auditor, 3 – kontrola temperatury, 4 – kontrola wilgotności, 5 – detekcja drgań podłoża.

Uzyskanie tak wysokiej dokładności pomiaru wymaga zastosowania super precyzyjnych układów pomiarowych tak jak w przypadku wag serii XA 5Y, a jak wiadomo jest to połączenie wielu elementów mechanicznych oraz elektronicznych wspomaganych zaawansowanym algorytmem informatycznym w zakresie analizy i przetwarzania sygnałów pomiarowych.

Jednym z najważniejszych parametrów każdej wagi jest jej zdolność do wykonywania powtarzalnych pomiarów. Ta cecha jest miarą precyzji ważenia i najczęściej jest definiowana poprzez odchylenie standardowe → pokazuje ono jak bardzo rozproszone są wyniki pomiarów tej samej wielkości w serii → błąd losowy.

Niestety jednym z istotnych czynników mających negatywny wpływ na wartość błędu losowego jest nadmierny ruch powietrza w pobliżu wagi. Im większa powierzchnia ważonego obiektu tym większe negatywne oddziaływanie. Z tego względu zwiększenie rozdzielczości wagi z poziomu 0.1mg → 0.01mg → 0.001mg wymaga zmian w konstrukcji wagi oraz jej szalki. Takie rozwiązania są standardem także w przypadku wag produkcji firmy Radwag.

Ze względów ekonomicznych nie jest zasadne poszukiwanie idealnego rozwiązania, które umożliwiłoby pomiar masy obiektów o dużych powierzchniach z maksymalnie wysoką rozdzielczością rzędu 0.0001mg, przynajmniej w systemach ważenia manualnego. Przykład optymalizacji konstrukcji wag serii AS X7 pokazano na rysunku 25.



Rysunek 25. Waga **AS 220.X7**, rozdzielczość 0.1mg – szalka pełna,
AS 82/220.X7 rozdzielczość 0.01/0.1mg – szalka ażurowana

Podobne rozwiązania zastosowano w przypadku mikrowag serii MYA 5Y → pomiar masy filtra z rozdzielczością 0.001mg. W standardowym wykonaniu szalka mikrowagi ma średnicę 26mm, co pozwala na pomiar masy filtrów o średnicy 25mm. Uniwersalne rozwiązanie MYA 5.5Y.FA oferuje pomiar masy filtrów o maksymalnej średnicy 70mm. W tym przypadku kształt szalki jest optymalizowany do metody badania.



Rysunek 26. Mikrowaga **MYA 5. 5Y** oraz **MYA 5.5Y.FA** (filtr max 70mm). Rozdzielczość $1 \times 10^{-6} \text{g}$

6.2. Dokładność metod ważenia manualnego

Pomiar dokładny to taki, w efekcie którego, uzyskuje się informację o rzeczywistej masie próbki. Niestety dokładność jest pojęciem jakościowym – albo coś jest dokładne albo niedokładne, tym samym nie może być wyrażana liczbowo⁶. Co zatem?. Mówiąc o dokładności pomiaru zawsze należy odnosić się do dwóch aspektów, a mianowicie, wartości błędu systematycznego → poprawność → obciążenie oraz błędu losowego jaki jest związany z pomiarem. Błąd systematyczny poprawność → obciążenie to różnica między wartością zmierzoną a wartością prawdziwą. Tę relację ustala się na etapie procesu produkcyjnego z wykorzystaniem certyfikowanych wzorców masy. Taki proces odbywa się w firmie Radwag na wielu etapach produkcji i kontroli. Jest to także jeden z elementów zapewnienia spójności pomiarowej⁷



Rysunek 27. Kontrola dokładności wskazań z wykorzystaniem wzorców masy – dział QC Radwag
Pomiar masy filtra jako ocena jakościowa wagi dla aplikacji laboratoryjnej

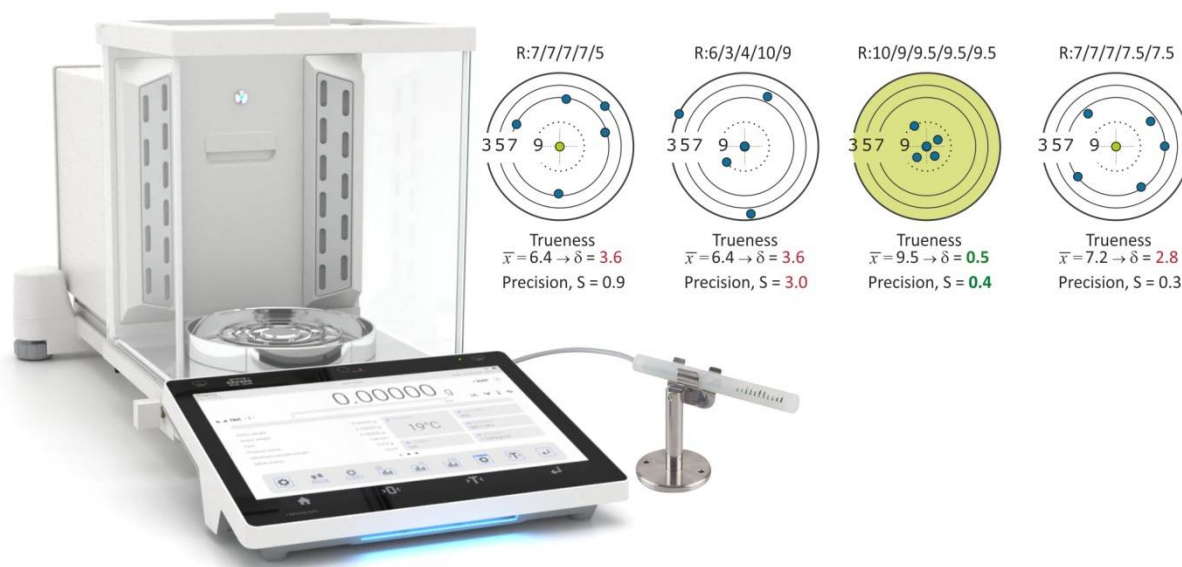
Kluczowe znaczenie w tym procesie ma dokładność wzorców masy za pomocą których ustala się zależności między wskazaniami wagi a jednostkami miary jakie reprezentują wzorce masy. Błąd systematyczny to potencjalnie stałe przesunięcie „dokładności wskazań wagi”, które maleje liniowo wraz ze zmniejszaniem się obciążenia wagi. Jest to cenna wskazówka dla tych którzy zajmują się pomiarami małych wielkości.

Parametrem opisującym dokładność wagi w całym zakresie pomiarowym jest tzw. liniowość lub odchyłka liniowości. „wysoka” liniowość zapewnia to, że przyrost wskazania (ΔR) na wyświetlaczu wagi jest zawsze proporcjonalny do przyrostu masy (ΔL) na szalce. Świat nie jest doskonały, zwłaszcza w skali mikro, a odchyłka liniowości zawiera w sobie także część błędu systematycznego, finalnie więc ma ona niezbyt dużą wartość, rzędu max kilku dziesiątek elementarnych wagi.

⁶ ISO 5725-1. Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarowych i wyników pomiarów. Ogólne zasady i definicje.

⁷ PN-EN ISO/IEC 17025:2018 – „Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących”

Stałą cechą każdej wagi jest wartość błędu losowego → powtarzalność wskazań → precyzja pomiaru, jeżeli założymy, że warunki wykonywania badania są stabilne. Potocznie jest to zdolność do wskazywania takich samych wyników podczas ważenia tego samego obiektu w warunkach powtarzalności. W metrologii prawnej (OIML) rozbieżność wyników prezentuje się jako różnicę między wartością maksymalną (Max) a wartością minimalną (Min). W innych obszarach precyzję pomiaru wyraża się poprzez miarę nieprecyzyjności jaką jest odchylenie standardowe (S). Niska wartość odchylenia standardowego oznacza wysoką precyzję pomiaru, wyniki są zbliżone → waga działa poprawnie. Precyzję pomiarów w różnej konfiguracji pokazano na rysunku 28.



Rysunek 28. Waga XA 82/220.5Y.A z czujnikiem warunków środowiskowych THB / precyzja pomiaru

W niektórych zastosowaniach dokładność pomiaru masy jest zależna tylko od wartości błędu losowego wagi → odważanie małych ilości w farmacji → pomiar masy sączków → ochrona powietrza, określenie różnicy mas filtrów w ocenie stężenia masowego pyłu PM10, PM2.5. Niestety precyzja pomiarów jest zależna nie tylko od możliwości wagi, ale także od:

- o warunków wykonywania testu → zmienność temperatury, wilgotności, wibracje podłoża, nadmierny ruch powietrza,
- o wielkości i kształtu ważonego obiektu, większa powierzchnia ważonego obiektu np. średnica filtra $\approx$ zwiększony rozrzut wskazań,
- o umiejętności ważenia → powodowanie uderzeń, umieszczanie bezkolizyjnie ładunku na szalce wagi,
- o stabilności termicznej wagi → czas aklimatyzacji, czas nagrzewania własnego,
- o specyficznych cech próbki → higroskopijność, niestabilność termiczna,

Mając na uwadze powyższe czynniki możliwości pomiarowe niektórych wag powinny być weryfikowane w miejscu użytkowania w ramach tzw. kwalifikacji operacyjnej.

Oceniając dokładność analizy warto zwrócić uwagę, że wartość średnia z serii pomiarów zazwyczaj nie jest obiektywnym parametrem dla oceny analizy, co pokazuje tabela 9.

Tabela 9. Średnia i wartość błędu losowego w serii pomiarów, ważenie mikro kolby, mikrowaga XA 6.5Y.

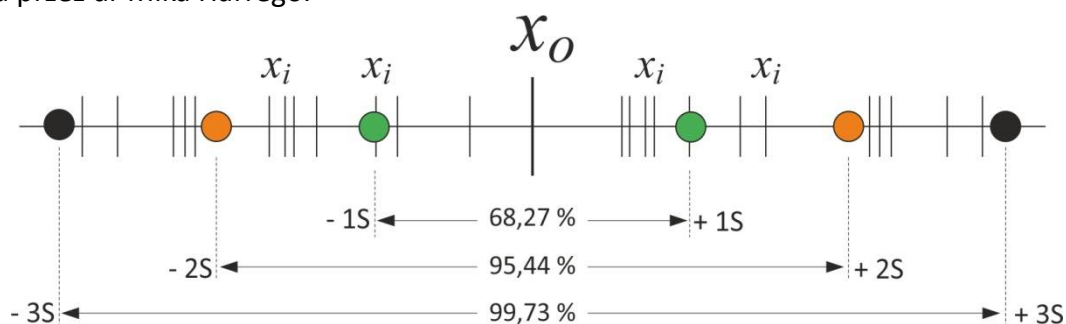
No.	SERIA 1	SERIA 2
1	0,876543	0,876543
2	0,876519	0,876541
3	0,876541	0,876544
4	0,876565	0,876545
5	0,876532	0,876539
6	0,876528	0,876542
7	0,876543	0,876540
8	0,876528	0,876541
9	0,876544	0,876542
10	0,876548	0,876544
$\bar{x}$	0,876539	0,876542
S	0,013 (!)	0,002 :)



Odchylenie standardowe będące miarą rozproszenia danych można wykorzystać do oszacowania przedziału w którym z pewnym prawdopodobieństwem znajduje się masa ważonej próbki. Opisuje to tzw. reguła 3 sigma (3σ), stosowana dla danych w rozkładzie normalnym krzywej Gaussa. Według niej masa próbki znajduje się z prawdopodobieństwem:

- 68,27% w przedziale $\pm 1S$ od wartości średniej,
- 95,44% w przedziale $\pm 2S$ od wartości średniej,
- 99,73% w przedziale $\pm 3S$ od wartości średniej

Te zależności są wykorzystywane od szeregu lat w działach kontroli jakości czego najlepszym przykładem jest metodologia Six Sigma stworzona w firmie Motorola w latach 80 tych XX wieku przez dr Mika Harrego.



Rysunek 29. Reguła 3 sigma

Tabela 10. Powtarzalność wskazań (mg) dla małych mas zależnie od obciążenia maksymalnego oraz wartości działki elementarnej wagi

Load	UYA	MYA	XA micro	XA		AS_X7		AS_R	
Max (g)	Działka elementarna wagi d (mg)								
	0,0001	0,001		0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1
2	0,00015	0,0004	x	x	x	x	x	x	x
5	x	0,0004	x	x	x	x	x	x	x
6	x	0,0004	0,0008	x	x	x	x	x	x
11	x	0,0007	x	x	x	x	x	x	x
21	x	0,0007	0,0009	x	x	x	x	x	x
30	x	0,0009	x	x	x	x	x	x	x
41	x	x	x	0,004	x	x	x	x	x
52	x	x	x	0,005	x	x	x	x	x
53	x	x	0,0007	x	x	x	x	x	x
62	x	x	x	x	x	0,01	x	0,012	x
60/220	x	x	x	x	x	0,01	x	0,012	x
82/220	x	x	x	0,005	x	0,01	x	0,012	x
110	x	x	x	0,005	x	x	x	x	x
120	x	x	x	x	x	0,01	x	0,012	0,06
160	x	x	x	x	x	x	0,06	x	0,07
210	x	x	x	0,005	x	x	x	x	x
220	x	x	x	x	0,05	x	0,07	x	0,07
310	x	x	x	x	0,05	x	0,07	x	0,08
520	x	x	x	x	0,07	x	0,07	x	0,08

Inny aspekt oceny jakości pomiaru masy mocno związany z wartością błędu losowego to niepewność pomiaru. Jak wiadomo dla oszacowania niepewności typu A wykorzystuje się odchylenie standardowe (S) z serii pomiarów. Warto tu zaznaczyć, że wraz z ilością wykonanych pomiarów maleje niepewność względna w efekcie występowania błędów przypadkowych.

$$\delta x = \frac{\Delta x}{|\bar{x}|} = \frac{\left(\frac{S}{\sqrt{n}}\right)}{|\bar{x}|} \quad (2)$$

Legenda

δx niepewność względna; Δx niepewność bezwzględna
 $\bar{x}$ średnia z pomiarów; S odchylenie standardowe
n ilość pomiarów

Tabela 11. Niepewność względna zależnie od ilości pomiarów w serii.

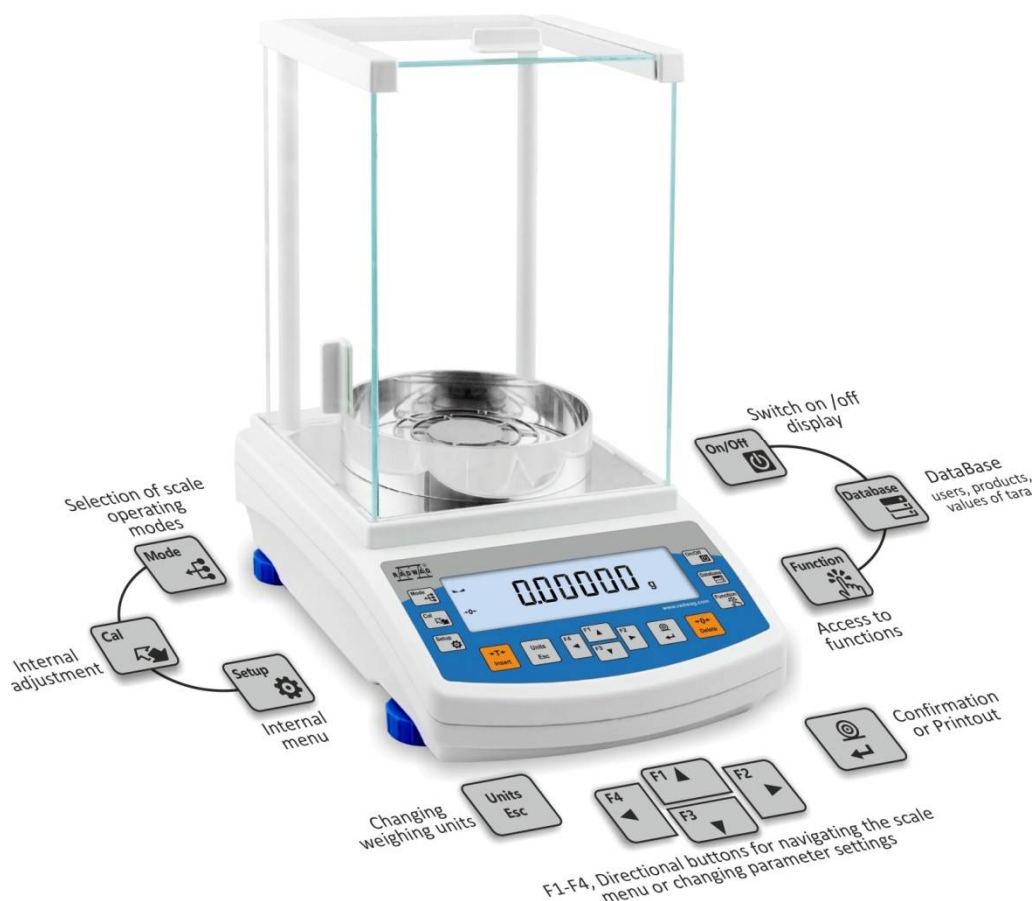
Liczba pomiarów	2	3	4	5	6	7	8	9
Niepewność względna	43 %	38 %	34 %	31 %	28 %	25 %	22 %	7 %

6.3. Ergonomia pomiarów manualnych

W ofercie firmy Radwag znajdują się trzy główne typoszeregi wag, tj. AS / XA / MYA–UYA, które różnią się między sobą konstrukcją, wyglądem oraz dokładnością pomiaru. Ze względu na typ wyświetlacza wagi można te wagi podzielić na 3 poziomy:

- podstawowy – wyświetlacz LCD, wagi serii AS_R2 PLUS
- średni – wyświetlacz dotykowy, 7", wagi serii AS_X7
- profesjonalny – wyświetlacz dotykowy 10", wagi serii XA_5Y, mikrowagi serii XA_5Y, MYA_5Y, ultra-mikrowagi UYA_5Y

Każda z wag może być skutecznie wykorzystana w różnych aplikacjach ważenia filtrów, przecież każda z nich mierzy siłę z jaką filtr jest przyciągany przez Ziemię. Subtelne różnice między wagami dotyczą ich możliwości komunikacji z użytkownikiem, co obecnie w erze PDA (Personal Digital Assistant → smartphone) jest szczególnie istotne.



Rysunek 30. Waga AS 82/220.R2 PLUS – możliwości funkcjonalne

Kluczową informacją dla wielu potencjalnych użytkowników jest „dokładność” pomiaru, często błędnie utożsamiana z wartością działki elementarnej wagi. Należy pamiętać, że nie jest możliwe uzyskanie pomiaru dokładnego równego wartości działki elementarnej wagi. Z drugiej strony wymagania normatywne zawierają zapisy dla wymaganej rozdzielczości wagi tj. wartość działki elementarnej, nie odnosząc się do innych aspektów metrologicznych. Jest to zdecydowanie niejednoznaczne.

W ocenie przydatności wagi do analizy pomocne mogą być informacje zawarte w tabeli 10. Warto jednak zwrócić uwagę, że wagi są ciągle modyfikowane celem poszukiwania lepszych rozwiązań, więc ich parametry też mogą ulegać zmianie.



Rysunek 31. Waga AS 82/220.X7 – możliwości funkcjonalne

Legenda: 1 – sensory IR, 2 – wysuwany panel boczny, konfiguracja wyglądu wyświetlacza, 3 – pole info, 4 – przyciski główne wagi, 5 – przyciski „hot-key”, 6 – widżety, 7 – pole wyniku ważenia, 8 – menu główne wagi, 9 – dual click, szybki demontaż szafki

W bardziej zaawansowanych systemach istotne będą możliwości komunikowania się wagi ze światem zewnętrznym, gromadzenie i przetwarzanie danych, trwałość informacji, komunikacja bezprzewodowa itd. Dla danych wrażliwych pierwszoplanowe będzie bezpieczeństwo informacji, odtwarzalność → audit trail, zgodność z wymaganiami systemów zarządzania jakością, patrz wagi serii 5Y.



Rysunek 32. Mikrowaga MYA 5.5Y- widok ikon funkcji Digital Weighing Auditor (DWA)

Konstrukcja typowych wag zakłada możliwość ich wykorzystania w jak najszerszym zakresie, ważny jest uniwersalizm. Niestety to co jest uniwersalne nie zawsze jest optymalnym rozwiązaniem, zwłaszcza gdy obiekty ważone mają dużą powierzchnię, tak jak filtry. Problem z ich ważeniem nie występuje dla rozdzielczości 0.1mg, ale dla 0.001mg już tak, co widoczne jest w postaci zwiększonego błędu losowego, zmiennością wskazania (dryft wyniku), długiego czasu ważenia. Praktyka pokazuje, że konstrukcja wag dedykowanych dla takich pomiarów powinna być optymalizowana mając na uwadze możliwość występowania także niekorzystnych zjawisk fizycznych → niezrównoważone ładunki statyczne.



Rysunek 33. Mikrowaga MYA 5.5Y,
Max 5g, działka elementarna $d=1 \times 10^{-6} \text{g}$,
Precyzja pomiaru $S=0,5 \times 10^{-6} \text{g}$, adiustacja wewnętrzna automatyczna, OIML certyfikacja,
Modyfikacja komory ważenia dla filtrów ϕ 25mm. Zgodność z PN-EN 12341:2024

Optymalizacja konstrukcji wagi zawsze na celu uzyskanie jak najlepszych właściwości metrologicznych wagi w metodzie ważenia. Pewną trudnością w osiągnięciu tego celu jest znaczna powierzchnia filtra, która zawiera się w przedziale od $4.9 \text{cm}^2 \div 17.5 \text{cm}^2$ (filtr 25mm $\div$ 150mm). Innym problemem jest tzw. elektrostatyka, której wpływ na proces ważenia powinien być ograniczany → tu też nie ma rozwiązań idealnych. Przykładem takiej optymalizacji jest mikrowaga MYA 5.5Y.FA, w tym przypadku filtr jest wkładany do komory ważenia poprzez otwór boczny w obrotowej osłonie. Poprzez to ogranicza się wymianę / ruch powietrza wewnątrz komory względem takich rozwiązań w których otwierana jest górna osłona.



Rysunek 34. Mikrowaga MYA 5.5Y.FA,
Max 5g, działka elementarna $d=1 \times 10^{-6} \text{g}$,
Precyzja pomiaru $S=0,5 \times 10^{-6} \text{g}$, adiustacja wewnętrzna automatyczna, OIML certyfikacja,
Pomiar filtrów o max średnicy ϕ 70mm. Zgodność z PN-EN 12341:2024

Istnieją także rozwiązania dedykowane konkretnie dla jednej metody pomiarowej, w tym przypadku jest to waga ze specjalnym uchwytem umożliwiającą pomiar masy materiału filtracyjnego o formacie A4. Waga serii XA 52.5Y.F posiada dodatkową wewnętrzną szklaną osłonę oraz zmodyfikowaną szalkę na której umieszczany jest materiał filtracyjny. Rozdzielczość takiej wagi wynosi 0.01mg, jednakże de facto jest to certyfikowana waga wyposażona w układ automatycznej adiustacji. Jej zastosowanie w laboratorium ogranicza tylko zakres pomiarowy do 52g.



Rysunek 35. Waga XA 52.5Y.F,

Max 52g, działka elementarna $d=1 \times 10^{-5}g$, adiustacja wewnętrzna automatyczna, OIML certyfikacja, pomiar filtrów max format 297 x 210mm

6.4. Ładunki elektrostatyczne filtrów w procesie ważenia

Występowanie niezrównoważonych ładunków statycznych jest dość powszechne jeżeli filtr jest wykonany z politetrafluoroetyleny (PTFE) lub jest pokryty tym materiałem. Niektóre normy wyraźnie wskazują na potrzebę dejonizacji filtrów tego typu przed ich ważeniem → 40 CFR Part 1065 - Engine-testing procedures, § 1065.190 PM-stabilization and weighing environments for gravimetric analysis, Rozporządzenie Komisji (UE) 2017/1151, Subzałącznik 5. Wyposażenie badawcze i kalibracje, 4.2.2.3. Eliminacja wpływu ładunków elektrostatycznych, EN 12341:2024, 6.6. Weighing room procedures i 9.3.2.9. Effects of static electrical forces during weighing. Wpływ tego zjawiska był przedmiotem badań jakie przeprowadzono w Centrum Metrologii Badań i Certyfikacji, wyniki zaprezentowano w tabelach 12, 13. Porównano wyniki pomiarów dla wzorców masy oraz dla filtrów badanych obciążonych ładunkami statycznymi.

Tabela 12. Mikrowaga UYA 2.4Y/F – komora ważenia otwierana ręcznie

	m=2g	m=10mg	m=5mg	m=1mg	Filtr PVC 37mm	Filtr PVC 25mm
St. Dev. (mg)	0,0024	0,0007	0,0006	0,0005	0,0041	0,0024

Tabela 13. Ultra-mikrowaga UYA 2.5Y.F, automatycznie otwierana komora ważenia

No.	Filtr PVC 25mm			M1 = 1mg	M2 = 5mg
1	0,0067431	0,0067395	0,0067979	0,0010023	0,0050021
2	0,0067436	0,0067423	0,0067438	0,0010024	0,0050025
3	0,0067558	0,0067436	0,0068067	0,0010029	0,0050032
4	0,0067604	0,0067551	0,0067919	0,0010025	0,0050030
5	0,0067605	0,0067679	0,0067517	0,0010012	0,0050022
6	0,0067606		0,0067508	0,0010024	0,0050028
7	Dryft ↑	Dryft ↑	0,0067800	0,0010018	0,0050023
8	x	x	0,0067897	0,0010027	0,0050024
9	x	x	0,0069187	0,0010025	0,0050028
10	x	x	0,0068579	0,0010019	0,0050021
			błędy losowe		
St. Dev (mg)	0,008	0,012	0,029	0,0006	0,0005

Niezależnie od rozwiązania konstrukcyjnego ultra-mikrowagi tj. seria 4Y lub 5Y, ważenie wzorców masy jest zawsze poprawne, co wskazuje na to, iż problem zbyt dużych błędów podczas ważenia filtrów jest związany z ładunkami statycznymi jakie posiada filtr. Celem ograniczenia tego zjawiska zastosowano dejonizację filtrów urządzeniem DJ -04 oraz zmodernizowano komorę ważenia ultra-mikrowagi. Każdy filtr był dejonizowany jednokrotnie przed serią pomiarów. Dejonizacja dotyczyła obydwu powierzchni filtra tj. strona górna i dolna filtra. Wyniki ważenia filtrów po tej operacji pokazano w tabeli 14.

Tabela 14. Pomiary masy filtrów po dejonizacji

No.	Filtr OH 2262		Filtr OH 1187	Filtr PVC (225-5-25)
	S1	S2	S3	S4
1	0,0074442	x	0,0067402	0,0067029
2	0,0074441	x	0,0067390	0,0067036
3	0,0074429	0,0074429	0,0067388	0,0067031
4	0,0074423	0,0074423	0,0067387	0,0067030
5	0,0074420	0,0074420	0,0067389	0,0067037
6	0,0074419	0,0074419	0,0067390	0,0067030
7	0,0074427	0,0074427	0,0067396	0,0067041
8	0,0074430	0,0074430	0,0067403	0,0067043
9	0,0074424	0,0074424	0,0067394	0,0067038
10	0,0074423	0,0074423	0,0067396	0,0067034
11	0,0074424	0,0074424	0,0067397	0,0067037
St. dev. (mg)	0,00077	0,00037	0,00055	0,00047

Otrzymane wyniki potwierdzają skuteczność modyfikacji metody – powtarzalność ważenia filtrów jest porównywalna z powtarzalnością ważenia wzorców masy, patrz tabela 12-13.

7. Pomiary automatyczne

Głównym celem automatyzacji pomiarów jest zwiększenie wydajności pracy, co z kolei pośrednio prowadzi do redukcji kosztów. Ogólna zasada mówi, że szybko nie oznacza dokładnie, ale ta maksyma nie jest prawdziwa w obszarze pomiarów masy metod ważenia filtrów. Zastosowanie pracy automatycznej to realnie szereg optymalizacji konstrukcji układu pomiarowego, metody badania, szybkości działania w efekcie czego uzyskuje się system potencjalnie bezobsługowy, zgodny z wymaganiami normatywnymi. Waga zainstalowana w takim systemie nadal pełni swoją podstawową funkcję, ale tryb jej pracy jest zsynchronizowany w układem automatyki sterownym zazwyczaj programem komputerowym. Rozwiązania techniczne w zakresie automatyzacji zweryfikowane podczas badań działów R&D mogą być wykorzystane w prostych systemach takich jak np. AK-6 5Y.F lub tych zaawansowanych takich jak RMC 2.5Y.F.

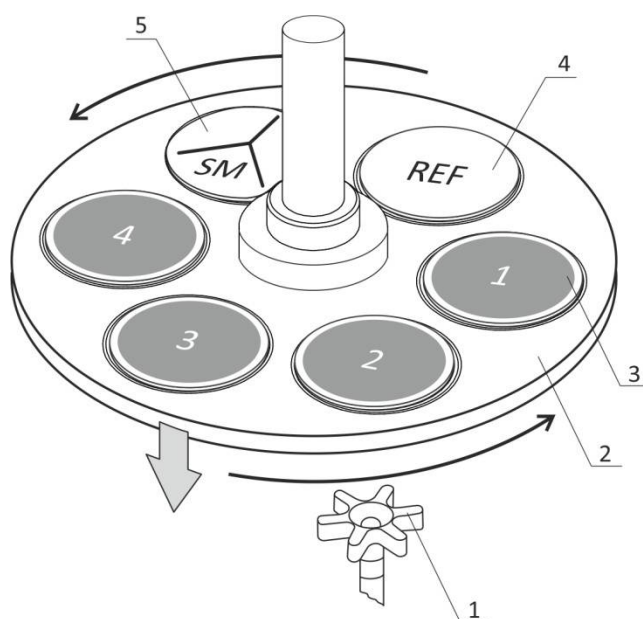
7.1. AK-6 5Y.F – automatyzacja w skali ultra-mikro

Wykrywanie małych zmian masy filtrów wykorzystywanych w badaniach naukowych jak i komercyjnych wymaga zastosowania bardzo czułych urządzeń, które cechują się długoterminową stabilnością wskazań. Należy tu zauważyć, że powszechnie stosowane manualne systemy wagowe pomimo staranności personelu obarczone są tzw. „błędem ludzkim”. Praktyka pokazuje, że wprowadzenie automatyzacji w procesie pomiaru masy pozwala na około 2 – 3 krotne zwiększenie dokładności, dla tej samej rozdzielczości urządzenia. Najprostszym rozwiązaniem w zakresie pomiarów automatycznych jest 6-cio pozycyjny system AK-6 5Y.F. pokazany na rysunku 36.



Rysunek 36. Pomiar masy filtrów **AK-6 5Y.F**,
Działka elementarna $d=1 \times 10^{-6}$ g lub $d=1 \times 10^{-7}$ g, Praca automatyczna lub półautomatyczna,
Średnica filtra $\phi 25 \div 47$ mm, Zgodność z PN-EN 12341:2024

Z metrologicznego punktu widzenia o dokładności pomiaru decydują dwa parametry związane z prowadzonym procesem, pierwszy to dokładność ważenia. Można ją uzyskać poprzez adiustację wagi certyfikowanym wzorcem zewnętrznym, dodatkowo metoda może przewidywać okresową kontrolę wskazań wagi za pomocą wzorca (5) umieszczonego w magazynie (2). Z drugiej strony nie jest to wymaganie obligatoryjne, jeżeli celem metody badania jest tylko określenie zmian masy filtrów. W takim przypadku punktem odniesienia może być tzw. filtr referencyjny (4), którego masa jest weryfikowana przed każdą sesją ważenia.



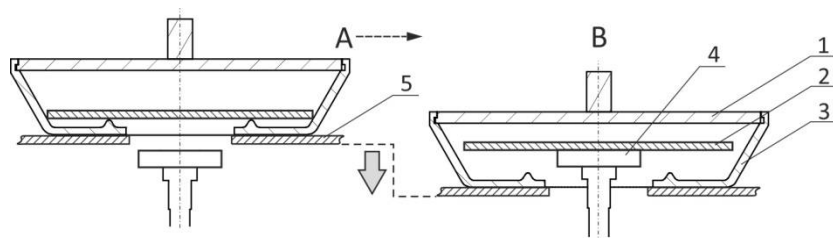
Rysunek 37. AK-6 5Y.F Magazyn filtrów – widok ogólny,
 Legenda 1 – szalka wagi, 2 – magazyn dla filtrów i wzorców, 3 – badany filtr
 4 – filtr referencyjny, 5 – certyfikowany wzorzec masy

Drugim istotnym parametrem wpływającym na dokładność ważenia filtra jest powtarzalność definiowana jako zdolność urządzenia do uzyskiwania „takich samych” wyników ważenia w serii pomiarów wykonywanych w warunkach powtarzalności. Jak wiadomo powtarzalność jest zależna od kilku istotnych czynników takich jak:

1. stabilność warunków klimatycznych → temperatura, wilgotność,
2. ruch powietrza w pobliżu stanowiska wagowego ,
3. umiejętności ważenia → powodowanie uderzeń przy nakładaniu i zdejmowaniu filtrów,
4. niestabilność termiczna filtra → kondycjonowanie,

Metoda wykorzystująca AK-6 5Y.F pozwala wyeliminować negatywne oddziaływanie czynnika 2 oraz 3 na proces pomiaru masy. Należy tu zauważyć, że stabilna temperatura w laboratorium wymaga zazwyczaj okresowego dostarczania powietrza o ściśle zdefiniowanych parametrach. Niestety jest to związane z nadmiernym ruchem powietrza, który wytrąca układ wagowy z położenia równowagi, co prowadzi do uzyskiwania zwiększonego rozrzutu wskazań.

Znaczne ograniczenie wpływu tego czynnika uzyskano poprzez zastosowanie szczelnej komory ważenia w której każdy filtr jest ważony w dedykowanych kasetach (rys. 38). Podczas kondycjonowania (A) filtr znajduje się wewnątrz kasety (3), która zapewnia stabilne środowisko. Podczas ważenia (B) następuje ruch magazynu filtrów (5) w dół w konsekwencji czego filtr (2) jest łagodnie umieszczany na szalce wagi (4). Osłona kasety (3) oraz jej górna pokrywa (1) ograniczają ruch powietrza poprzez co pomiar masy filtra może być wykonany precyzyjnie.



Rysunek 38. AK-6 5Y.F, Kasetka filtra

Legenda: 1 – pokrywa kasety filtra 2 – badany filtr, 3 – obudowa kasety filtra

4 – szalka AK-4 /6, 5 – magazyn filtrów

Analizę układu AK-6 5Y.F w zakresie błędu losowego wykonano w Centrum Metrologii Badań i Certyfikacji dla rozdzielczości 0.0001mg, która jest wymagana podczas badań emisji cząstek stałych z silników spalinowych → proces homologacji. Precyzja pomiarów masy dla filtrów o średnicy 47 mm wyniosła $R = 0.4\mu\text{g}$, tu jako bezwzględna różnica mas lub $S = \sim 0.14\mu\text{g}$, jako odchylenie standardowe, tabela 15. Nieco lepszy wynik uzyskano dla certyfikowanego wzorca masy ze względu na jego znacznie mniejszą powierzchnię.

Tabela 15. Precyzja pomiarów dla wzorca masy oraz filtrów ϕ 47 mm

Pomiar	Wzorec masy	Filtr 1	Filtr 2	Filtr 3
1	0,1483208	0,1333503	0,1327184	0,1333415
2	0,1483206	0,1333500	0,1327186	0,1333416
3	0,1483207	0,1333500	0,1327184	0,1333414
4	0,1483208	0,1333501	0,1327184	0,1333415
5	0,1483206	0,1333503	0,1327182	0,1333416
6	0,1483206	0,1333502	0,1327183	0,1333417
7	0,1483207	0,1333500	0,1327183	0,1333417
8	0,1483208	0,1333500	0,1327182	0,1333418
9	0,1483208	0,1333501	0,1327183	0,1333417
10	0,1483206	0,1333499	0,1327182	0,1333419
Max-Min	0,2 μg	0,4 μg	0,4 μg	0,5 μg
S	0,09 μg	0,14 μg	0,13 μg	0,15 μg

7.2. UMA 2.5Y.F – automatyzacja Medium Size

Układ automatyczny UMA FC jest bardziej zaawansowanym systemem dla monitoringu zmian masy filtrów oferując także możliwość ich kondycjonowania w stabilnych warunkach wilgotności i temperatury. Jest to rozwiązanie dedykowane dla tych, którzy nie mają możliwości regulacji warunków środowiskowych w laboratorium. Filtry badane i referencyjne podobnie jak w przypadku AK-6 5Y.F są umieszczone w stalowych kontenerach na obrotowym magazynie. Mikrowaga o rozdzielczości 0.001mg lub 0.0001mg jest zainstalowana na antywibracyjnej betonowej konsoli w dolnej części urządzenia. Widok takiego urządzenia pokazuje rysunek 39.

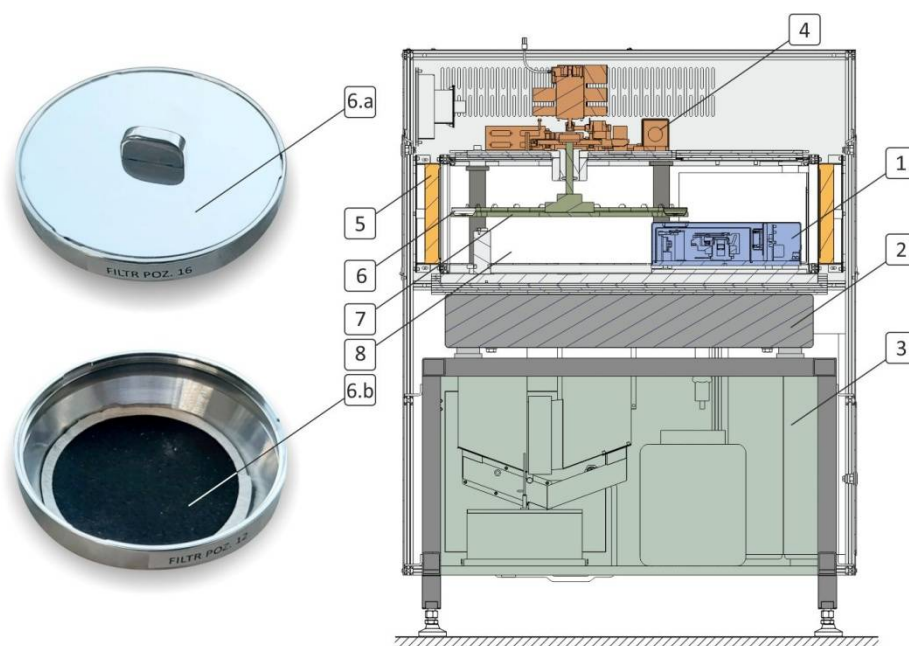


Rysunek 39. UMA 2.5Y.FC - System automatyczny do badania zmienności masy filtrów,
Kondycjonowanie filtrów: stabilizacja wilgotności i temperatury, Maksymalne obciążenie 2g,
działka elementarna $d=1 \times 10^{-6}$ mg lub $d=1 \times 10^{-7}$ g, Max ilość filtrów 24szt., Zgodność z PN-EN 12341:2024

Proces kondycjonowania oraz okresowego ważenia filtrów jest zaprojektowany i monitorowany przez program komputerowy. Jest to dość elastyczna aplikacja która pozwala na optymalizację metody w zakresie okresów kondycjonowania, limitów akceptowalnej zmienności masy filtrów, rejestrowanie mas filtrów referencyjnych i wzorca masy. Ponadto możliwe jest powiązanie kodu, numeru filtra z miejscem poboru oraz innymi informacjami związanymi z metodą badawczą.

Utrzymanie potencjalnie stałej temperatury ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) i wilgotności ($45\% \pm 5\%$) wewnątrz urządzenia wymaga wygenerowania niewielkiego ruchu powietrza, a jak wiadomo jest to jeden z negatywnych czynników zakłócających pomiar masy. Minimalizację tego czynnika uzyskano umieszczając filtry w stalowych kontenerach → im mniejsza komora ważenia tym mniejszy wpływ ruchu powietrza na pomiar masy filtra.

Widok konstrukcji systemu UMA FC pokazano na rysunku 40. Filtry w kontenerach (6.a, 6.b) są umieszczone w obrotowym magazynie. Obrotowy ruch magazynu filtrów (7) jest uzyskiwany poprzez układ automatyki (4), który poza obrotem jest odpowiedzialny za ruch w górę i dół, jeżeli filtr znajdzie się w pozycji „ważenie”. Zadana wilgotność i temperatura jest utrzymywana wewnątrz przestrzeni wagowej (8) przez system nawilżania, który pracuje w sprzężeniu zwrotnym z czujnikami warunków środowiskowych. Czystość powietrza wewnątrz komory wagowej jest zapewniona poprzez filtry Hepa (5), które znajdują się na wlocie i na wylocie powietrza z komory wagowej.



Rysunek 40. UMA 2.5Y.FC – schemat układu pomiarowego

1 – moduł wagowy (pomiar masy), 2 – antywibracyjna podstawa układu pomiarowego, 3 – układ nawilżania i sterowania temperaturą, 4 – układ automatyki, 5 – filtr Hepa, 6 – kontener filtra (a – widok kontenera, b – filtr wewnątrz kontenera), 7 – magazyn filtrów, 8 – komora kondycjonowania filtrów.

Moduł wagowy (1) wraz z całą konstrukcją jest umieszczony na antywibracyjnej kamiennej podstawie (2). Cykl pomiarowy w procesie badania jest programowalny w aplikacji komputerowej, gdzie należy zdefiniować ilość cykli oraz pozycje filtrów w magazynie, których masa ma być weryfikowana. System wagowy UMA 2.5Y.FC był wykorzystany w projekcie badawczym 2021/42/E/ST10/00209, ID 526286, pt. „Woda - sprawa wielkiej wagi dla niepewności pomiaru masy aerozolu”. Celem tego projektu było określenie rzeczywistego wpływu warunków kondycjonowania w zakresie dopuszczalnych zmian wilgotności na zmienność masy filtrów badanych. Jest to istotne, gdyż obecnie badania naukowe i komercyjne zmierzają do oceny stężenia masowego pyłu zawieszonego PM 1 (sub-mikronowy) lub PM 01 (ultra-drobnego). Wyniki z tego projektu są cyklicznie publikowane przez Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk. W tabelach 16, 17, 18 przedstawiono pomiary w zakresie błędu losowego jakie wykonano dla UMA 2.5Y.FC o parametrach obciążenie Max 2g, działka elementarna $d=0.001\text{mg}$ podczas oceny metrologicznej konstrukcji → proces walidacji / kwalifikacji instalacyjnej.

Tabela 16. UMA 2.5Y.FC – Powtarzalność wskazań

	Pozycja filtra w magazynie					
No.	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)	m ₆ (g)
1	0,301529	0,152508	0,151359	0,151084	0,154776	0,151989
2	0,301529	0,152507	0,151359	0,151084	0,154776	0,151989
3	0,301529	0,152509	0,151360	0,151086	0,154775	0,151989
4	0,301528	0,152507	0,151359	0,151086	0,154775	0,151989
5	0,301528	0,152508	0,151359	0,151086	0,154776	0,151989
6	0,301528	0,152507	0,151359	0,151085	0,154776	0,151990
$\bar{x}$ (g)	0,301529	0,152508	0,151359	0,151085	0,154776	0,151989
St. dev.(μg)	0,55	0,82	0,41	0,98	0,52	0,41

Tabela 17. UMA 2.5Y.FC – Powtarzalność wskazań

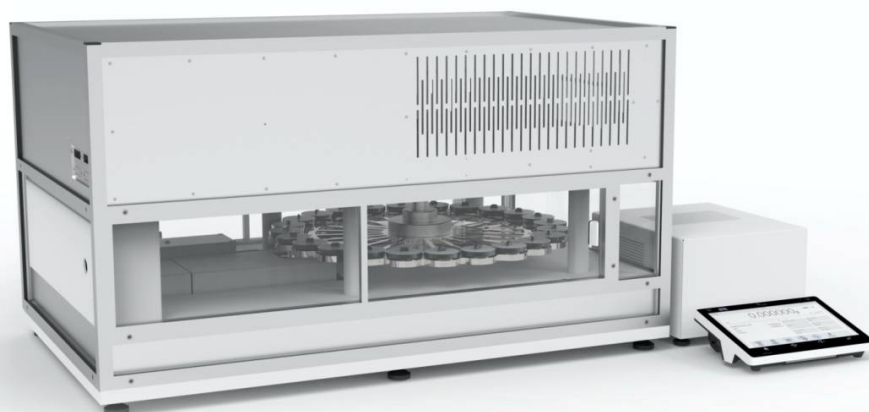
	Pozycja filtra w magazynie					
No.	m ₇ (g)	m ₈ (g)	m ₉ (g)	m ₁₀ (g)	m ₁₁ (g)	m ₁₂ (g)
1	0,152326	0,152953	0,152579	0,155078	0,684378	0,140174
2	0,152326	0,152955	0,152579	0,155079	0,684378	0,140174
3	0,152326	0,152954	0,152580	0,155078	0,684378	0,140173
4	0,152326	0,152956	0,152580	0,155079	0,684378	0,140173
5	0,152325	0,152954	0,152579	0,155078	0,684378	0,140174
6	0,152326	0,152955	0,152580	0,155079	0,684378	0,140174
$\bar{x}$ (g)	0,152326	0,152955	0,152580	0,155079	0,684378	0,140174
St. dev. (μg)	0,41	1,05	0,55	0,55	0,41	0,52

Tabela 18. UMA 2.5Y.FC – Powtarzalność wskazań

	Pozycja filtra w magazynie					
No.	m ₁₃ (g)	m ₁₄ (g)	m ₁₅ (g)	m ₁₆ (g)	m ₁₇ (g)	m ₁₈ (g)
1	0,147518	0,147748	0,126705	0,148678	0,138993	0,146117
2	0,147517	0,147748	0,126703	0,148676	0,138993	0,146117
3	0,147518	0,147748	0,126704	0,148677	0,138993	0,146117
4	0,147518	0,147748	0,126704	0,148677	0,138991	0,146116
5	0,147518	0,147749	0,126705	0,148677	0,138993	0,146117
6	0,147518	0,147747	0,126706	0,148676	0,138992	0,146117
$\bar{x}$ (g)	0,147518	0,147748	0,126705	0,148677	0,138993	0,146117
St. dev. (μg)	0,41	0,63	1,05	0,75	0,84	0,41

Wartość błędu losowego dla badanych pozycji zawiera się w przedziale $0,41 \div 1,05\mu\text{g}$, co jest zgodne z założeniami uwzględniając wymagania normy EN 12341:2024.

Nieco mniej zaawansowanym rozwiązaniem dedykowanym dla laboratoriów, które skutecznie utrzymują warunki środowiskowe w zakresie wymaganych limitów jest system UMA 2.5Y.F. Metoda i możliwości pomiaru masy filtrów są dokładnie takie same jak w przypadku wersji „FC”. Moduł wagowy jest umieszczony na aluminiowej podstawie poprzez co wymiary i masa konstrukcji jest istotnie mniejsza. UMA 2.5Y.F. jest tzw. kompaktowym urządzeniem, które można użytkować w dowolnym miejscu w laboratorium – wymaga stabilnego stołu o wymiarach 1000x 600cm.



Rysunek 41. UMA 2.5Y.F - System automatyczny do badania zmienności masy filtrów
Maksymalne obciążenie 2g, działka elementarna $d=1 \times 10^{-6}$ mg lub $d=1 \times 10^{-7}$ g,
Max ilość filtrów 24szt., Zgodność z PN-EN 12341:2024

System wagowy UMA 2.5Y.F był wykorzystany w badaniach porównawczych oceny emisji cząstek stałych z silników spalinowych. Badania zrealizowano w Automotive Research and Development Institute BOSMAL. Pomiary emisji masy cząstek stałych zostały wykonane zgodnie z wymaganiami zawartymi w Rozporządzeniu UE 2017/1151. Pobrane próbki do analizy uzyskano podczas badań realizowanych w różnych cyklach jezdnych na hamowni podwoziowej: cykl WLTC zgodnie z Rozporządzeniem UE 2017/1151, cykl NEDC, zgodnie z Regulaminem EKG ONZ nr 83 oraz cykle: RDE, RTS i TFL, nieznormalizowane cykle producentów samochodów. Emisję cząstek stałych wyliczono z zależności 3 lub 4.

$$PM = \frac{(V_{mix} + V_{ep}) \times P_e}{V_{ep} \times d} \quad (3)$$

$$PM = \frac{V_{mix} \times P_e}{V_{ep} \times d} \quad (4)$$

Legenda

- V_{mix} objętość rozcieńczonych spalin w warunkach standardowych;
- V_{ep} objętość rozcieńczonych spalin przepływających przez filtr do pobierania próbek cząstek stałych w warunkach standardowych
- P_e masa cząstek stałych zatrzymanych na filtrze(-ach), w mg;
- d przejechana odległość odpowiadająca cyklowi badania, w km.

W ramach badań sprawdzono dokładność pomiaru masy systemu automatycznego oraz wagi manualnej za pomocą stalowych wzorców masy oraz filtrów z mikro-włókna ze szkła borokrzemianowego wzmocnionych tkaniną szklaną i powlekanych PTFE (Pallflex® Emfab™ TX40HI20WW). Wyniki z tych porównań pokazano w tabeli 19.

Tabela 19. Precyzja pomiaru masy dla wzorca oraz filtra – waga manualna & system automatyczny

	MSE 2.7S-000-DF ^{*)}	UMA 2.4Y.F ^{**)}	MSE 2.7S-000-DF ^{*)}	UMA 2.4Y.F ^{**)}
No.	wzorzec masy – wskazanie w mg		filtr ϕ 47mm – wskazanie w mg	
1	150,2548	150,2440	102,1241	102,0771
2	150,2545	150,2429	102,1215	102,0774
3	150,2553	150,2432	102,1232	102,0770
4	150,2553	150,2429	102,1197	102,0772
5	150,2549	150,2430	102,1176	102,0768
6	150,2550	150,2428	102,1156	102,0770
7	150,2550	150,2427	102,1152	102,0772
8	150,2548	150,2428	102,1163	102,0772
9	150,2545	150,2429	102,1151	102,0772
10	150,2545	150,2428	102,1173	102,0774
St. dev. (mg)	0,0003	0,0004	0,0034	0,0002

Legenda

^{*)} – waga obsługiwana przez operatora

^{**)} – system automatyczny UMA, tu w wersji z terminalem serii 4Y

Dokładność pomiaru masy wzorca była praktycznie taka sama dla wagi manualnej oraz systemu automatycznego, gdyż powierzchnia wzorca nie ma znacznie w kontekście zakłócenia powodowanego ruchem powietrza. Ten efekt jest natomiast widoczny w przypadku filtra. Precyzja pomiaru jest niezmienna dla układu automatycznego – filtr jest ważony w małej przestrzeni kontenera, rys. 38. Dla wagi manualnej widoczna jest zmienność wyniku w efekcie prawdopodobnie ruchu powietrza lub efektów elektrostatycznych.



Rysunek 42. Układ pomiarowy UMA 2.4Y.F oraz widok hamowni podwoziowej

7.3. RB 2.5Y.F – ilość i jakość w badaniach

Główne zalety automatyzacji to powtarzalność operacji, ograniczenie wpływu operatora na wynik procesu pomiarowego oraz zwiększenie wydajności pracy. Wszystkie te walory oraz parę innych jakie oferuje układ robotyczny RB 2.5Y.F były podstawą dla zbudowania wydajnego systemu nadzoru nad jakością powietrza atmosferycznego w Polsce oraz Rumunii. Zazwyczaj obserwacja zmian jakości powietrza opiera się na indywidualnych pobornikach oraz indywidualnych stanowiskach wagowych. Informacja w takim systemie jest rozproszona i podatna na błędy ludzkie. Obecnie pomiary masy filtrów przed i po ekspozycji dokonywane są w kilku centralnych punktach, 6 centrów w Polsce, 10 w Rumunii za pomocą systemu robotycznego RB 2.5Y.F.



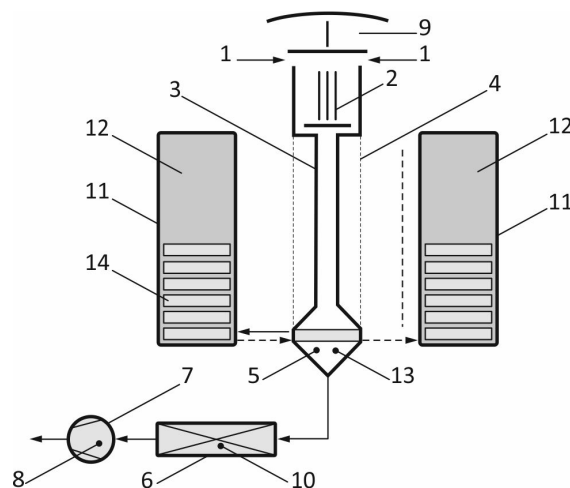
Rysunek 43. System robotyczny **RB 2.5Y.F**,
Maksymalne obciążenie 2g, działka elementarna $d=1 \times 10^{-6}$ g,
Magazyn filtrów 1020szt., regulowana temperatura $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$, wilgotność $45 \pm 5\%$. Zgodność z PN-EN 12341:2024

System robotyczny RB 2.5Y.F może być jednym z elementów referencyjnej metody pomiaru masy pyłu zawieszonego. W metodzie tej używa się tzw. poborników pyłowych w których instaluje się zazwyczaj 14 kaset z filtrami. Masa filtrów przed ekspozycją jest wyznaczona zgodnie z wymaganiami podanymi w normie EN 12341:2024. Każdy filtr jest następnie automatycznie umieszczany w tunelu o stałym przepływie powietrza przez okres 24 godzin. W tym czasie na strukturze filtra gromadzone są cząstki pyłu PM charakterystyczne dla danego miejsca i czasu poboru. Każdy z filtrów musi być identyfikowalny, gdyż po okresie ekspozycji filtry są ponownie kondycjonowane i ważone. Na podstawie różnicy ich mas, wielkości przepływu powietrza oraz czasu ekspozycji wyliczane jest stężenie masowe pyłu zawieszonego według zależności 5.

$$c = \frac{m_1 - m_u}{\varphi_a \times t} \quad (5)$$

Legenda: c stężenie masowe pyłu zawieszonego ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
 m_1 masa filtra czystego, przed ekspozycją (μg);
 m_u masa filtra po ekspozycji (μg)
 φ_a przepływ powietrza podczas poboru ($\text{m}^3/\text{godz.}$);
 t czas poboru (godz.)

Przykładowy schemat pobornika stosowanego do poboru pyłu zawieszonego pokazano na rysunku 44.



Rysunek 44. Schemat pobornika pyłu

1 – próbka powietrza (T_a , P_a), 2 – wlot impaktora, 3 – obudowa pobornika, 4 – wlot powietrza, 5 – uchwyt filtra, 6 – pomiar przepływu powietrza, 7 – pompa, 8 – układ kontroli przepływu, 9 – pomiar ciśnienia i temperatury, 10 – pomiar ciśnienia i temperatury (opcja), 11 – magazyn filtrów, 12 – pomiar temperatury przechowywania filtrów, 13 – pomiar temperatury w pobliżu filtra podczas absorpcji, 14 – filtr

Widok istotnych elementów układu pomiarowego RB 2.4Y / RB 2.5Y przedstawiono na rysunku 45. Poprzez okresową kontrolę masy filtrów referencyjnych (1) ocenia się wpływ warunków kondycjonowania na zmienność masy filtrów badanych. Jest to kluczowe dla oceny rzeczywistej ilości pyłu w efekcie ważenia różnicowego.



Rysunek 45. Elementy konstrukcyjne układu robotycznego RB 2.5Y.F

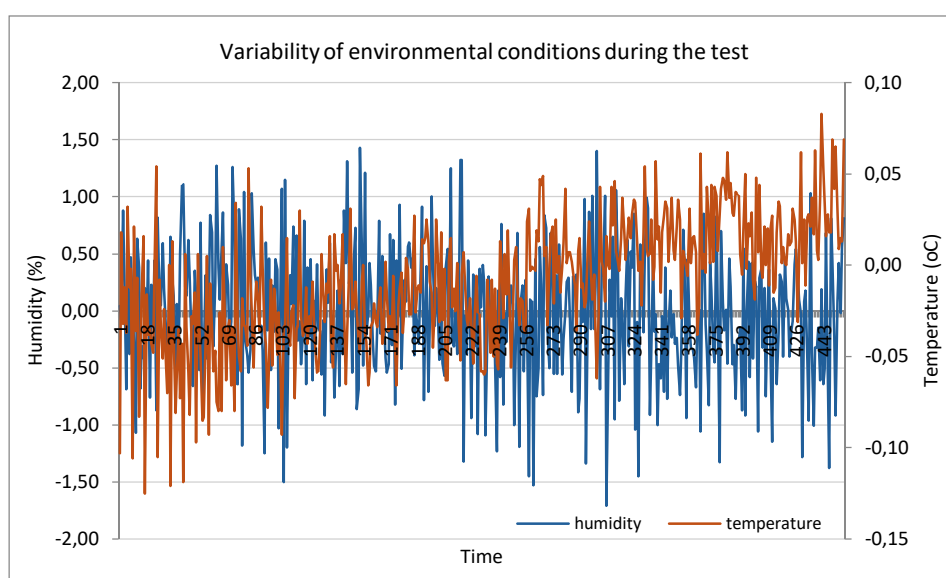
1 – magazyn filtrów referencyjnych i mikrowaga, 2 – wzorec masy, 3 – magazyn filtrów badanych

Certyfikowany wzorzec masy (2) jest przeznaczony jest do kontroli poprawności wskazań wagi. Obserwacja potencjalnych dryftów wskazania mikrowagi w efekcie ważenia wzorca masy może być miernikiem stabilności układu pomiarowego. Magazyn filtrów badanych (3) zawiera max 1050 pozycji, które są wykorzystywane dla kondycjonowania filtrów przed i po ekspozycji. Identyfikacja filtrów odbywa się poprzez kod QR naniesiony na powierzchni filtra, przy takiej metodzie nie jest istotne jego miejsce w magazynie. Każdy z filtrów jest wstępnie ważony, co pozwala połączyć wyniki jego pomiarów masy z pozycją w magazynie. Kod QR jest nadrukowany atramentem nie zawierającym metali, co jest istotne dla dalszych analiz chemicznych pyłu zebranego na filtrze.



Rysunek 46. Widok filtra przed ekspozycją z kodem QR, filtr umieszczony w antystatycznej kasce oraz filtrów po ekspozycji

Wynik pomiaru masy filtra przed i po ekspozycji jest zależny od stabilności warunków środowiskowych. Jak wiadomo stabilność jest pojęciem teoretycznym, więc kluczowe jest wykazanie jak duże są fluktuacje dla temperatury i wilgotności → zgodność normatywna według EN 12341:2024. Można założyć, że przy zachowaniu stabilności warunków środowiskowych odchylenia w pomiarach masy tych samych filtrów, ważonych taką samą metodą, przy zastosowaniu tego samego algorytmu będą pochodzić tylko od jednego czynnika zmiennego a mianowicie błędu losowego wagi. Rozważając to zagadnienie należy pamiętać o tym, że filtry typu PTFE mogą gromadzić niezrównoważone ładunki statyczne, które powinny być usunięte.

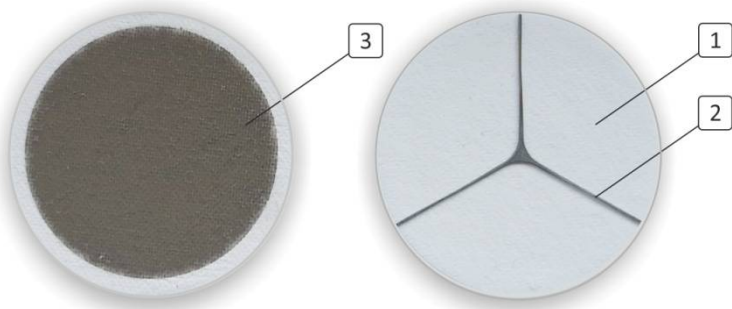


Rysunek 47. RB 2.5Y.F – zmienność warunków kondycjonowania, temperatura ok. 0.2°C, wilgotność ok. 1.5%

Kompleksowa ocena przydatności oraz zgodności systemu RB 2.5Y.F z wymaganiami normy EN 123421:2024 powinna być dokonana podczas kwalifikacji operacyjnej. Wykaz testów zawiera załącznik C oraz D tej normy. Warto tu zaznaczyć, że ze względu na znaczną powierzchnię filtra ($\sim 17.34\text{cm}^2$) powtarzalność wskazań dla tego obiektu będzie zawsze większa względem powtarzalności jaką uzyskuje się dla wzorca masy, pokazuje to tabela nr 20.

Tabela 20. Błąd losowy wagi dla wzorca masy i filtra

L.p.	wzorzec masy		Filtr QMA 47mm	
1.	0,152497	x	0,147926	x
2.	0,152494	0,152494	0,147921	0,147921
3.	0,152493	0,152493	0,147919	0,147919
4.	0,152494	0,152494	0,147918	0,147918
5.	0,152494	0,152494	0,147914	0,147914
6.	0,152495	0,152495	0,147914	0,147914
7.	0,152495	0,152495	0,147913	0,147913
8.	0,152496	0,152496	0,147912	0,147912
9.	0,152496	0,152496	0,147912	0,147912
10.	0,152495	0,152495	0,147912	0,147912
St. dev. =	1,20 µg	1,06 µg	4,75 µg	3,46 µg



Rysunek 48. Wzorzec masy dla układu robotycznego RB 2.5Y.F
1- filtr 47mm przed ekspozycją, 2 – wzorzec masy ~ 150mg, 3 – filtr po ekspozycji

Niewątpliwie układ robotyczny serii RB 2.5Y jest w zakresie pracy i konstrukcji jednym z lepszych rozwiązań dedykowanych dla pomiaru masy filtrów. Warto jednak zwrócić uwagę, że rozwój takich konstrukcji jest silnie uwarunkowany potrzebami rynku. Wydaje się, że docelowym rozwiązaniem powinna być konstrukcja umożliwiająca pomiar masy filtrów o różnej średnicy według jednej z dostępnych metod ważenia. Jest to spore wyzwanie dla producenta w każdym aspekcie.

7.4. RMC 2.5Y.FC – wydajność i precyzja

Układ robotyczny serii RMC łączy w sobie zalety rozwiązania RB → wydajność oraz UMA → precyzja pomiaru. RMC 2.5Y.FC posiada wielopoziomowy, liniowy magazyn dla filtrów o średnicy 25÷47mm, które są kondycjonowane i ważone z stalowych kontenerach. Układ automatycznego przenoszenia kontenerów jest identyczny tak jak w przypadku rozwiązania serii RB. Warto tu zaznaczyć, że istotne ograniczenie przestrzeni w której dokonuje się pomiaru masy filtra pozwala na zwiększenie dokładności pomiaru. Poglądowe zdjęcie systemu RMC pokazano na rysunku 49.



Rysunek 49. Układ robotyczny RMC 2.5Y.F

Maksymalne obciążenie 2g, działka elementarna $d=1 \times 10^{-6}$ g lub $d=1 \times 10^{-7}$ g. Zgodność z PN-EN 12341:2024

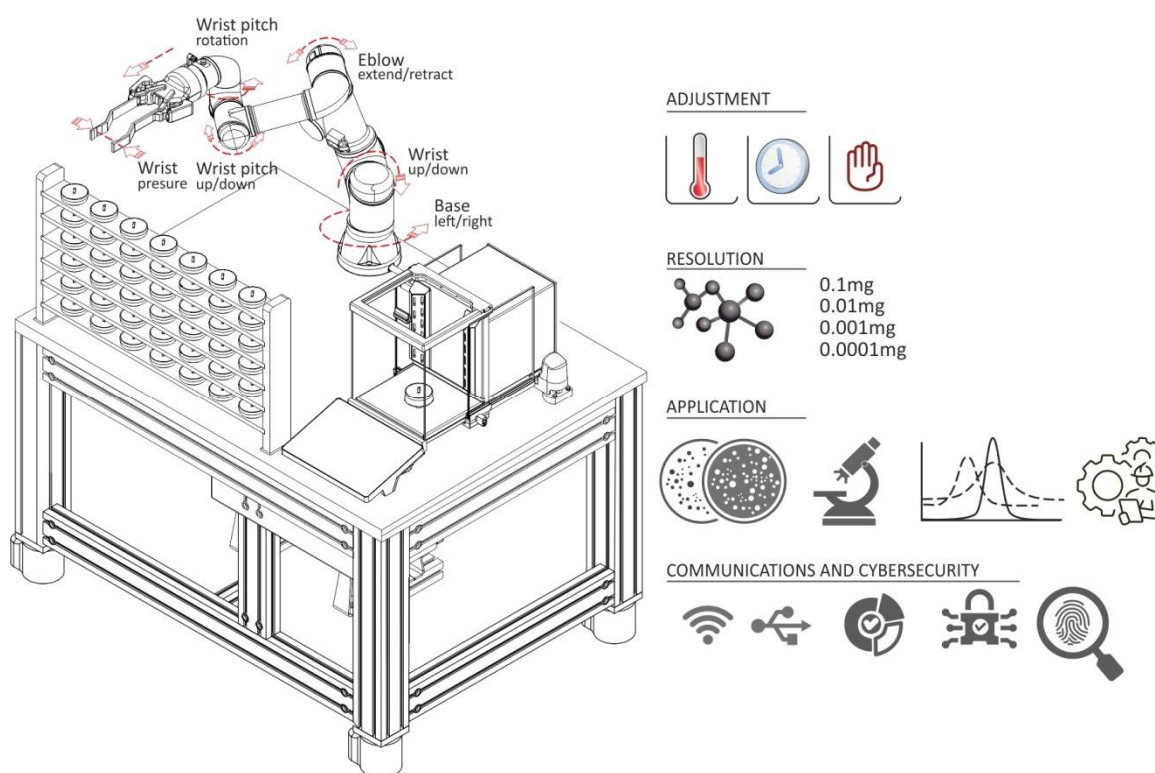
Legenda: 1- filtr Hepa, 2 – magazyn filtrów 156 szt., 3 – układ sterowania, 4 – układ robotyczny,

5 – mikrowaga, 6 – panel operatora

Należy zauważyć, że jakość każdego produktu jest wynikiem procesu doskonalenia, który przebiega w cyklu zaplanuj → wykonaj → sprawdź → popraw, PDCA. Jest to podstawowa zasada, dzięki której cechy ergonomiczne, użytkowe i parametry metrologiczne systemów automatycznych jakie produkuje firma Radwag Wagi Elektroniczne ciągle ulegają modyfikacji. Punktem wyjściowym przed wprowadzeniem działań korygujących jest analiza rynku, potrzeb klientów, wyniki badań własnych oraz wizja nowej funkcjonalności produktu. Dotyczy to także rozwiązania RMC 2.5Y.FC, które może być optymalizowane względem potrzeb klienta oraz wymagań już istniejących systemów informatycznych.

7.5. RW 5Y.F 153 – pomiary masy bez ograniczeń

Robotyczny system wagowy RW 5Y.F153 to przenośne stanowisko dedykowane do pomiarów masy filtrów skonstruowane na bazie cobota. W tym układzie pomiar masy to indywidualne stanowisko wagowe, niekoniecznie pojedyncze, o różnych rozdzielczościach, jeżeli takie są wymagania. Filtry mogą być przechowywane i kondycjonowane w kilku magazynach zlokalizowanych w przestrzeni dostępnej dla ramienia cobota. Cobot jest urządzeniem przewidzianym do współpracy z człowiekiem, toteż nie ma potrzeby jego izolowania w zamkniętych przestrzeniach. Transfer filtrów z magazynu do wagi realizuje ramię cobota o 6 stopniach swobody. Każdy z filtrów jest przechowywany w stalowym kontenerze, ale możliwa jest inna aplikacja w tym zakresie → montaż innego uchwytu w ramieniu cobota. Schemat konstrukcyjny takiego stanowiska pokazano na rysunku 50.



Rysunek 50. Schemat stanowiska wagowego współpracującego z cobotem

Cykl pracy jest nadzorowany przez cobota, który odpowiada za wszystkie operacje związane z przemieszczaniem filtrów między magazynem a wagą. Wyniki z pomiarów masy gromadzi waga w wewnętrznej bazie danych wraz z informacjami niezbędnymi do identyfikacji filtrów. Informacje mogą być także przesyłane do aplikacji zewnętrznej celem dalszego ich przetwarzania. Warunki kondycjonowania filtrów zgodnie z wymaganiami normatywnymi powinny być zapewnione poprzez inne urządzenia zewnętrzne w laboratorium.

Przedstawione rozwiązanie jest tylko jedną z wielu możliwości jakie oferuje elastyczność cobota (6 stopni swobody) w przestrzeni. To otwiera zupełnie nowe kierunki w zakresie tworzenia własnych rozwiązań dedykowanych dla pomiarów masy.



Rysunek 51. Etapy pracy cobota, pobór kasety filtrem, pomiar masy.

Niewątpliwie każdy z filtrów musi być przechowywany w specjalnym uchwycie / kontenerze. Z jednej strony stanowi to pewne ograniczenie, ale jest to także zaleta gdyż zmniejszenie przestrzeni w której będzie ważony filtr zwiększa precyzję pomiaru. Może to mieć istotne znaczenie dla filtrów o średnicach powyżej 47mm → np. filtry 150mm stosowane w wysokoprzepływowym pobornikach wielkoobjętościowych tzw. HV – High Volume. Z drugiej strony rozwiązania cobotyczne to także potencjalna możliwość ważenia filtrów o różnych średnicach → kilka magazynów w zasięgu ramienia robotycznego co w tradycyjnych kartezyjskich modelach jest dość skomplikowanym technicznie rozwiązaniem.

8. Niezrównoważone ładunki statyczne – dejonizacja

Występowanie niezrównoważonych ładunków statycznych jest dość powszechne, czego czasami można doświadczyć osobiście, gdy poziom ładunków jest znaczny. W ochronie środowiska zastosowanie mają pomiary masy w skali $10^{-5} \div 10^{-6}$ g, które pozwalają na detekcję nawet tych najmniejszych oddziaływań. Niestety elektrostatyka w tym aspekcie jest niepożądana, gdyż wprowadza istotny błąd w procesie ważenia. Usunięcie niezrównoważonych ładunków wymaga zastosowania dejonizatora – zazwyczaj jest to urządzenie generujące na przemian jony o znaku dodatnim i ujemnym. W efekcie tego uzyskuje się potencjalnie obojętne środowisko w którym ładunki statyczne są w równowadze.



Rysunek 52. Pomiar ładunków elektrostatycznych na filtrze, miernik SMC typu IZD10-510

Ładunki statyczne występujące na powierzchniach różnych elementów można mierzyć, co pokazano na rysunku 52. Warto wiedzieć, że podstawową zależność związaną z elektrostatycznością podaje prawo Coulomba: „Siła wzajemnego oddziaływania dwóch punktowych ładunków elektrycznych jest wprost proporcjonalna do iloczynu tych ładunków i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między nimi”

$$F = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (6)$$

Sytuacja powyższa, według której źródłem pola jest ładunek skupiony w jednym punkcie jest w zasadzie niemożliwa – jest to tylko teoretyczny opis tego zjawiska. W odniesieniu do wag, zjawisko elektrostatyki to oddziaływanie ładunków jakie znajdują się na elementach ważonych z ładunkami jakie posiadają elementy komory ważenia takimi jak np. szyby. W takim przypadku można mówić o natężeniu pola elektrostatycznego pomiędzy dwoma obszarami. Ze względu na to, że obszary te mogą być diametralnie różne, pewnym przybliżeniem jest oddziaływanie jakie zachodzi pomiędzy dwoma płytami. Wartość tego natężenia opisuje równanie 7 a siłę oddziaływania elektrostatycznego równanie 8.

$$E = \frac{U}{d} \quad (7)$$

Legenda: U – różnica potencjałów pomiędzy płytami
d – odległość pomiędzy płytami

$$F = \frac{Q^2}{2\varepsilon_0\varepsilon_r S} \quad (8)$$

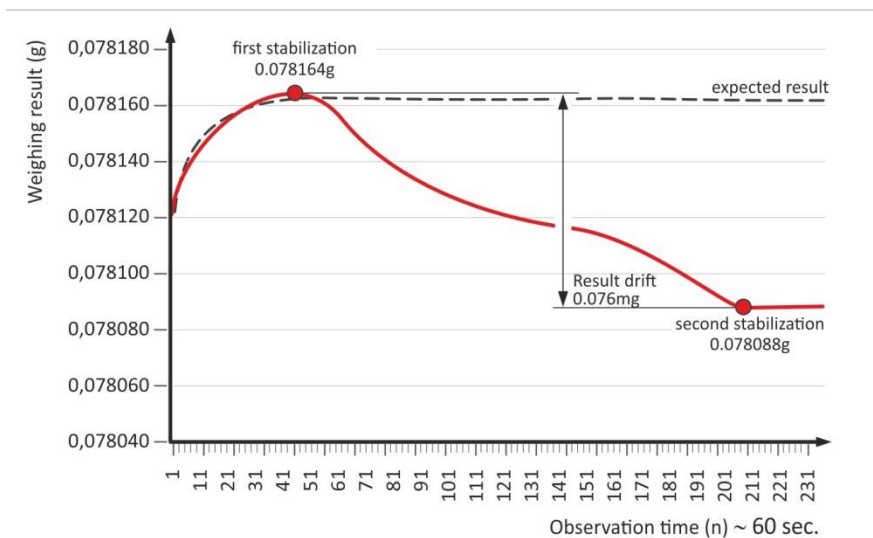
Legenda: F – siła przyciągania elektrostatycznego (N),
Q – ładunek zgromadzony na jednej płycie (C),
S – powierzchnia płyt (m²),
 ε_0 – przenikalność elektryczna próżni, (~ 8,85 x 10⁻¹² F/m),
 ε_r – względna przenikalność elektryczna ośrodka między płytami (próżnia ε_r = 1, powietrze ~ 1,0006).

Ważnym aspektem występowania elektryczności statycznej jest tzw. zasada zachowania ładunku według której „w układzie odizolowanym elektrycznie całkowity ładunek, algebraiczna suma ładunków dodatnich i ujemnych nie zmienia się – ładunek nie ginie, może jedynie ulec przemieszczeniu”. Praktycznie więc nie ma możliwości wyeliminowania nadmiaru ładunków inaczej niż poprzez ich neutralizację za pomocą dejonizatora. Najprostszym rozwiązaniem jest dejonizator DJ-04 lub DJ-05.



Rysunek 53. Dejonizator DJ-05
zasilanie 12VDC, źródło jonów – stal szlachetna,
zalecana odległość próbki podczas dejonizacji 5 ÷ 50mm

Jest to uniwersalne urządzenie, które może być użytkowane w każdym laboratorium, niezależnie od jego specyfiki pracy. Dejonizacja polega na powolnym przesunięciu naładowanego obiektu nad powierzchnią jonizatora. W przypadku filtra tę operację wykonuje się dla obydwu jego powierzchni tj. dolnej i górnej. Po takiej operacji wynik ważenia filtra powinien być stabilny, ale trzeba ciągle pamiętać, o tym, że innym czynnikiem zakłócającym pomiar jest nadmierny ruch powietrza.



Rysunek 54. Dryft wyniku ważenia filtra typu Pallflex EMFAB TXTOHI2O-WW, 47mm
w efekcie działania nie zrównoważonych ładunków statycznych

Na rysunku 54 pokazano dryft wyniku ważenia filtra, gdy posiada on niezrównoważone ładunki na swojej powierzchni. Wynik ważenia filtra po pewnym czasie stabilizuje się, co przyjmowane jest za poprawne wskazanie. Widoczną oznaką występowania elektrostatyki jest powolna zmiana wskazania, gdy w rzeczywistości czas pomiaru powinien wynosić ok. 5 ÷ 15 sekund, zależnie od rozdzielczości wagi.

Innym rozwiązaniem jest jonizator wbudowany w konstrukcję komory ważenia wag serii XA.5Y.A. Elementy generujące jony są umieszczone po prawej i lewej stronie komory ważenia. Możliwe jest programowe, ręczne sterowanie pracą jonizatora poprzez tzw. przyciski Hot-Key lub automatyczny start pracy jonizatora, gdy drzwi komory ważenia zostaną otwarte. Dzięki zintegrowanej konstrukcji jonizatora niezrównoważone ładunki na ważonym obiekcie są usuwane podczas jego ważenia.



Rysunek 55. Waga XA 210.5Y.A - jonizator w konstrukcji wagi,
Maksymalne obciążenie 210g, działka elementarna $d=1 \times 10^{-5} \text{g}$,
Adiustacja wewnętrzna automatyczna, OIML certyfikacja. Zgodność z PN-EN 12341:2024

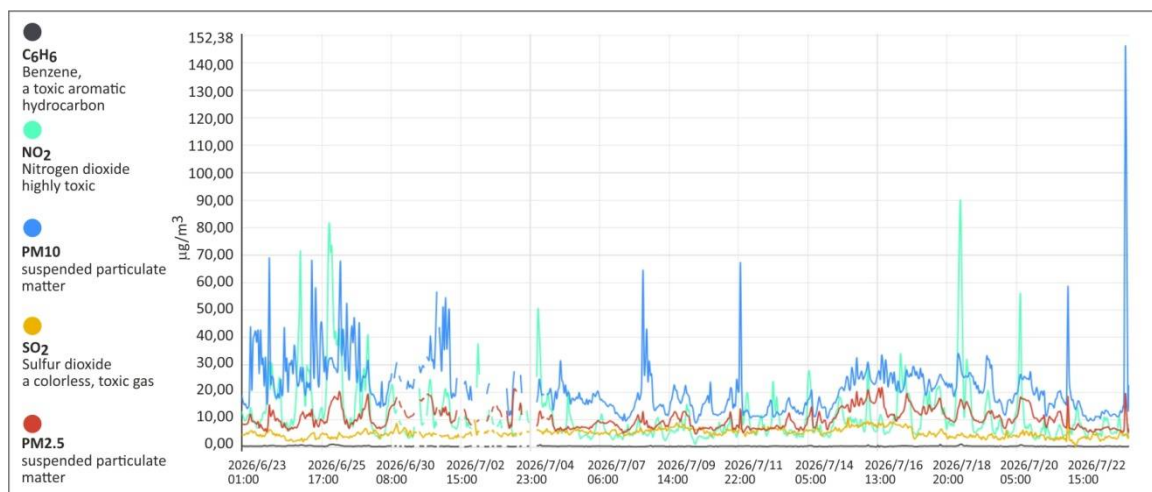
Zgodność normatywna jonizatorów

Ze względu na swoją konstrukcję dejonizatory wewnętrzne wag serii XA 5Y nie powinny być traktowane jako urządzenie stosowane do neutralizacji pól elektrostatycznych na stanowisku pracy. Zgodnie z normą ANSI/ESD S20.20 lub IEC 61340-5-1, która określa wymagania dla stworzenia i utrzymania programu kontroli wyładowań elektrostatycznych (ESD) w celu ochrony wrażliwych podzespołów elektronicznych.

Waga i dejonizator mogą być jednym z elementów wykorzystywanych do skutecznego zarządzania ESD. Głównym celem dejonizatora wagi jest zapewnienie warunków dla dokładnego pomiaru masy. Wszystkie elementy ważone, zwłaszcza w obszarach zagrożonych ESD powinny być podczas procesu produkcyjnego lub kontrolnego pozbawione ładunków statycznych przed procesem ważenia.

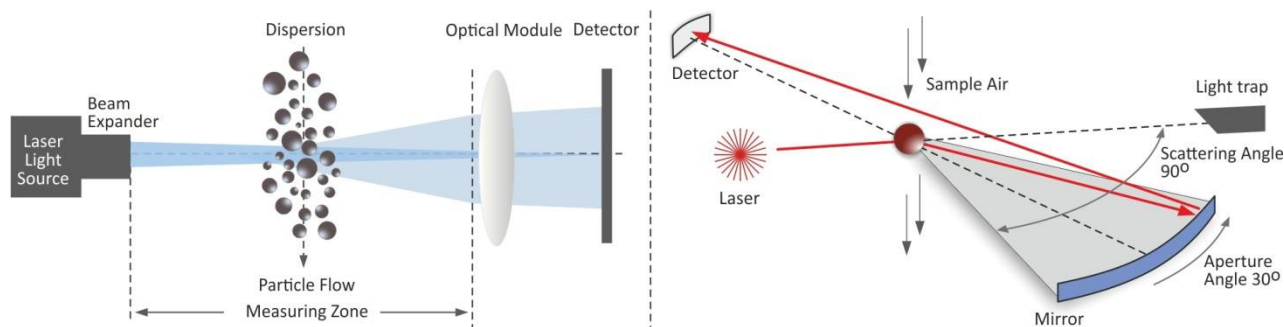
9. Pomiar stężenia pyłu metodą automatyczną

Metody grawimetryczne bazujące na pomiarach masy są metodami niestety dość czasochłonnymi, jeżeli ocena dotyczy wszystkich elementów metody. Obecnie w dobie cyfryzacji na znaczeniu zyskują szybkie metody – automatyczne, które dostarczają informacji o bieżącym stanie jakości powietrza atmosferycznego. W użytkowaniu jest z pewnością wiele urządzeń, których zasada pomiaru wykorzystuje zazwyczaj jedną z dwóch metod tj. metodę rozpraszania światła lub metodę absorpcji promieniowania beta.



Rysunek 56. Przykład automatycznego monitoringu jakości powietrza,
Dane 1 godzinne, Radom, ul. Tochtermana,
Lokalizacja stacji: Szer. geograficzna (N): 51.399084°, Dł. geograficzna (E): 21.147474

Metoda laserowa rozpraszania światła (OPC) → optyczny licznik cząstek, polega na pomiarze intensywności światła odbitego i rozproszonego przez cząstki pyłu zawieszone w strumieniu powietrza. Cząstka pyłu przemieszczająca się w tunelu jest oświetlona światłem laserowym pod kątem 90°. Światło rozproszone od każdej cząstki jest odbierane przez lustro i wykrywane przez fotodiodę. Sygnał ten jest następnie przesyłany do wielokanałowego klasyfikatora wielkości, w którym analizator wysokości impulsu klasyfikuje każdy impuls proporcjonalnie do wielkości cząstki. Każdy błysk światła to jedna cząstka, więc zliczenie tych impulsów jest wystarczające dla określenia stężenia pyłu.

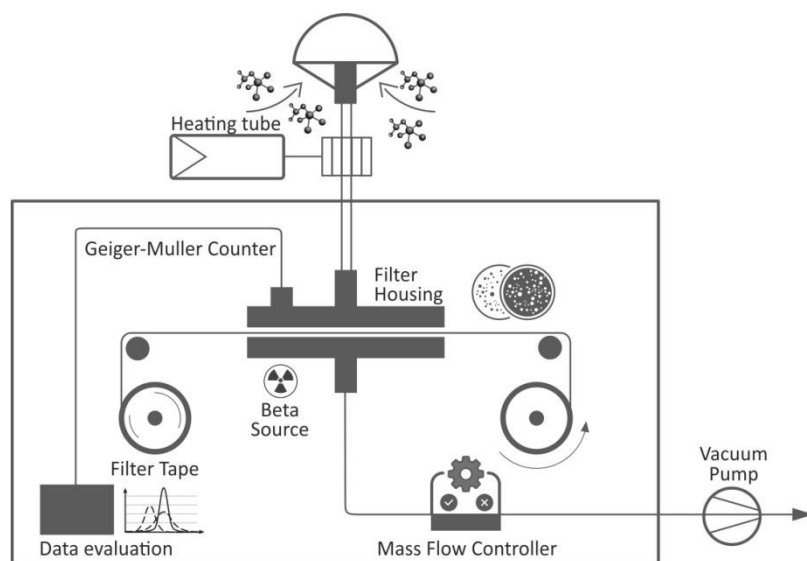


Rysunek 57. Metoda automatyczna rozpraszania światła

W automatycznych miernikach optycznych wewnętrznym źródłem odniesienia jest wbudowany wzorec optyczny tzw. optical span reference lub filtr referencyjny o stałym, znanym współczynniku rozproszenia lub tłumienia światła. Wewnętrzna przesłona mechaniczna kieruje wiązkę lasera na materiał symulujący stałe stężenie pyłu np. matowe szkło lub specjalny element rozpraszający zamiast na komorę pomiarową z powietrzem. Pozwala to na automatyczną kontrolę stabilności emitowanej wiązki laserowej, czystości soczewek oraz czułości fotodetektora.

Metoda absorpcji promieniowania beta (BAM) polega na mierzeniu, jak bardzo pył zatrzymany na filtrze osłabia strumień emitowanych elektronów. Promienie beta to szybkie elektrony tj. naładowane cząstki wyrzucane przez rozpad niestabilnych jąder atomowych. Kiedy promienie beta przechodzi przez substancję następuje jonizacja i wzbudzenie atomów substancji zgromadzonej na taśmie filtracyjnej. To z kolei prowadzi do osłabienia intensywności promieni beta, które jest proporcjonalne do masy, grubości substancji przez którą przenika promieniowanie

Im więcej pyłu osadzi się na taśmie filtracyjnej, tym mniej promieniowania beta dociera do detektora. Zasada tej metody wykorzystuje prawo Lamberta lub Bouguera-Lamberta, które mówi, że absorpcja elektronów zależy niemal wyłącznie od masy substancji, a nie od jej składu chemicznego, koloru czy kształtu cząstek. Schemat takiej metody pokazano na rysunku 58.



Rysunek 58. Metoda absorpcji promieniowania beta

W pierwszym etapie urządzenie przesyła promienie beta przez czystą taśmę filtracyjną do detektora, aby określić sygnał bazowy – punkt odniesienia. Następnie pompa zasysa powietrze przez głowicę selektywną (np. PM10 lub PM2,5), a pył odkłada się na mierzonym fragmencie taśmy. Przesuw taśmy po absorpcji pozwala na naświetlenie promieniowaniem beta odcinka taśmy z próbką. Znając poziom tłumienia oraz tłumienie dla taśmy czystej (blank) następuje wyliczenie masy zatrzymanego pyłu oraz stężenia pyłu w $\mu\text{g}/\text{m}^3$ przy znanej ilości przefiltrowanego powietrza. W tej metodzie źródłem promieniowania jest słaby izotop najczęściej węgla ^{14}C lub krypton ^{85}Kr .

Wewnętrznym źródłem odniesienia w tej metodzie są certyfikowane folie kalibracyjne tzw. span foils lub calibration shims o precyzyjnie znanej gęstości powierzchniowej. Re-kalibracja polega na wykonaniu cyklicznego testu podczas którego folia jest automatycznie wsuwana w szczelinę pomiarową pomiędzy źródło promieniowania beta a detektor. Tłumienie promieniowania przez folię wzorcową jest stałe i fabrycznie zdefiniowane, detektor sprawdza, czy odczyt masowy zgadza się ze wzorcem. Pozwala to skompensować m.in. starzenie się źródła promieniowania czy dryft elektroniki.

Z punktu widzenia użyteczności metod automatycznych kluczowe są procedury kontrolne takie jak np. Quality Assurance Level 1 -3 i Annual Surveillance Test (AST). W zakresie normalizacji wdrożenie oraz użytkowanie wewnętrznych źródeł odniesienia reguluje norma PN-EN 14181, Emisja ze źródeł stacjonarnych – Zapewnienie jakości automatycznych systemów pomiarowych. Konieczność okresowej weryfikacji dryftów urządzenia z użyciem wewnętrznego filtra lub folii jest obowiązkiem operatorów tych systemów. Wyniki powinny być rejestrowane np. poprzez karty kontrolne Shewharta, co pozwala wykryć dryft układu optycznego bądź radiometrycznego przed wystąpieniem awarii.

Istotność problemu jest dość wyraźna, toteż zastosowanie mają także inne normy takie jak EN 15267-1 i EN 15267-2, Określają one ogólne zasady certyfikacji i oceny systemów zarządzania jakością u producentów aparatury pomiarowej. Wymuszają one, aby każde wewnętrzne źródło odniesienia było produkowane w sposób powtarzalny, a jego parametry były identyfikowalne metrologicznie → traceability.

Podstawą prawną monitoringu imisyjnego w zakresie powietrza atmosferycznego jest nadal norma PN-EN 12341:2024. Prace normatywne nad systemami automatycznymi dążą do tego, aby codzienna samokontrola analizatora za pomocą wewnętrznego źródła odniesienia eliminowała konieczność częstego kalibrowania pyłomierza automatycznego za pomocą filtrów grawimetrycznych. Należy zauważyć, że prace normatywne nie skupiają się na samym fakcie istnienia wzorca optycznego, ale na zmatematyzowaniu i sformalizowaniu sposobu, w jaki urządzenie interpretuje sygnał z tego źródła.

Problemy jakościowe metod automatycznych dotyczą identycznej prędkości zasysania powietrza w sondzie oraz stałej objętości zasysanego powietrza. Innym problemem jest zbyt duża wilgotność, która powoduje „sztuczny” przyrost masy cząstek. Pyły pęcznieją, co w metodzie promieniowania Beta jest źródłem błędów. Jak wiadomo woda wiąże drobne cząstki w konglomeraty, które w metodzie optycznej fałszują wyniki → pył PM 2.5 jest rejestrowany jako pył PM10. W tanich wersjach czujników optycznych mikroskopijne krople zamglenia lub pary wodnej są interpretowane przez sensor jako cząstki stałe → AQI podczas deszczu może być nawet kilkukrotnie zawyżony.

10. Wyposażenie dodatkowe

10.1. Wzorce masy

Wykorzystywane są do kontroli dokładności wskazań wag, poprzez porównanie wyniku ważenia wzorca masy z jego wartością podaną w świadectwie wzorcowania. Wybór wzorców dokonuje laboratorium.

10.2. Dejonizator

Jest konieczny, gdy ważone obiekty posiadają niezrównoważone ładunki na swoich powierzchniach. Optymalnym rozwiązaniem jest dejonizator zewnętrzny DJ-04 lub DJ-05.

10.3. Stół antywibracyjny

Podłoże na którym znajduje się waga powinno być stabilne, co można uzyskać wykorzystując stoły antywibracyjne. To rozwiązanie eliminuje w znacznym stopniu drgania podłoża dając stabilną podstawę konieczną dla wykonywania dokładnych pomiarów.



Rysunek 59. Pomiar masy filtrów – akcesoria w metodzie pomiarowej

10.4. Dodatkowa osłona wagi

Utrzymanie stabilnej temperatury w laboratorium wymaga zazwyczaj wymiany powietrza, co może wpływać negatywnie na dokładność pomiaru masy. Ograniczenie tego zjawiska uzyskuje się poprzez dodatkowe szklane osłony, czasami optymalizowane względem ich wymiarów.

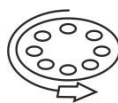
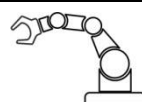
10.5. Usługa wzorcowania

Informacja o masie zważonej substancji / pyłu powinna być spójna, prawdziwa, czyli taka na podstawie której można wnioskować o rzeczywistym poziomie zanieczyszczenia powietrza. Okresowe wzorcowanie wag → spójność pomiarowa, niepewność prowadzonej analizy.

10.6. Kwalifikacja operacyjna wagi

Weryfikacja tego na ile poprawnie, czyli zgodnie z założeniami działa waga czy też system automatyczny jest dokonywane w ramach tzw. kwalifikacji operacyjnej. Jest to szereg testów funkcjonalnych oraz metrologicznych, które są wykonywane w miejscu instalacji urządzenia.

11. Główne parametry metrologiczne

Typoszereg	Obciążenie maksymalne	Działka elementarna wagi	Metoda pomiaru	Maksymalny rozmiar filtra
UYA ^{*)}	2g	0.0001mg		ϕ 25mm
MYA ^{*)}	2g ÷ 51g	0.001mg		ϕ 25 ÷ 150mm
XA ^{*)}	51g ÷ 210g	0.01mg		ϕ 25 ÷ 90mm 210x297mm
AS ^{*)}	62g ÷ 520g	0.1mg ÷ 0.01mg		ϕ 25 ÷ 90mm
AK-6.5Y.F ^{**)}	0.5g	0.001mg ÷ 0.0001mg		ϕ 25 ÷ 47mm
UMA 2.5Y.F ^{**)}	2g	0.001mg ÷ 0.0001mg		
RB 2.5Y.F ^{**)}	2g	0.001mg		
RMC 2.5Y.FC ^{**)}	2g	0.001mg ÷ 0.0001mg		
RW 5Y.F153 ^{**)}	2g ÷ 520g	0.1mg ÷ 0.0001mg		ϕ 25 ÷ 90mm

*) waga posiada funkcję programową tzw. ważenia różnicowego, wyniki z pomiarów są zapisywane w bazie danych wagi oraz mogą być przesyłane do dowolnej aplikacji zewnętrznej, rejestracja filtrów oznaczonych kodem EAN może być realizowana poprzez zewnętrzny skaner kodów kresowych, dejonizacja filtrów dla wag serii UYA, MYA, AS, odbywa się wykorzystując zewnętrzny dejonizator, wagi serii XA mogą być wyposażone w dejonizator wewnętrzny, kontrola wskazań wagi odbywa się wykorzystując typowe wzorce masy.

**) system współpracuje z programem komputerowym w zakresie generowania i gromadzenia wyników badań dla serii filtrów przed ekspozycją i po ekspozycji, dejonizacja filtrów odbywa się poprzez dejonizatory zewnętrzne dla AK-6.5Y.F oraz UMA.2.5Y.F lub wewnętrzne dla systemu RB, RMC, RW. Kontrola poprawności wskazań układów automatycznych i robotycznych odbywa się wykorzystując certyfikowane wzorce masy umieszczone w magazynach tych systemów.

12. Podsumowanie

Jakość środowiska w którym żyjemy zawsze była przedmiotem oceny, jednak wraz z dostępem do bardzo zaawansowanych technik pomiarowych otrzymaliśmy wiedzę na temat tego jak bardzo szkodliwe i niebezpieczne mogą być jego elementy. Zazwyczaj mocno akcentowane są skutki zdrowotne, co jest oczywiste, ale badania naukowe wskazują także na destrukcję sfery nieożywionej. Dotyczy to konstrukcji budynków, mostów w obszarze korozji, zmian chemicznych struktury, wpływu mikroorganizmów na procesy starzenia itd. Dostrzegając istotność tego problemu należy projektować metody badawcze na miarę potrzeb w zakresie ekonomii, ergonomii oraz oczekiwanej dokładności analizy.

Można powiedzieć, że obecnie stan techniki i możliwości projektowe pozwalają na tworzenie dość skomplikowanych rozwiązań w zakresie pomiarów masy. Istotnym ograniczeniem w tym zakresie jest czas realizacji projektu oraz ekonomia, czyli koszty wytworzenia. W wielu przypadkach wystarczające są podstawowe manualne wagi o rozdzielczości $10^{-5} \div 10^{-6}$ g, ale i tu jest spore pole do optymalizacji metody, zwłaszcza gdy ważone filtry gromadzą ładunki elektrostatyczne. W tym przypadku znacznym wsparciem są badania producenta, które zazwyczaj kończą się modyfikacją elementów wagi, wskazując optymalne rozwiązanie. Takie aplikacje tworzy również Laboratorium Badawcze Centrum Metrologii Badań i Certyfikacji firmy Radwag.

Od dawno wiadomo, że czas to pieniądz, zwłaszcza w produkcji wielkoseryjnej. Ta złota maksyma znalazła także swoje miejsce w systemach monitoringu i nadzoru nad jakością powietrza atmosferycznego. Zwiększenie wydajności pracy oraz minimalizacja ryzyka które jest nieodzownym elementem każdego procesu wymagało wprowadzenia automatyzacji, także w procesie pomiaru masy. Specyfika metody ważenia bazująca na średniej wartości wymusza wykonanie kilku pomiarów masy tego samego filtra, co przy ilości kilkuset filtrów jest trudne do wykonania metodą manualną. Rozwiązaniem tego problemu są układy automatyczne serii UMA i robotyczne serii RB/RMC jakie firma Radwag zaprojektowała do tego celu. Warto tu zauważyć, że te urządzenia są także wykorzystywane w badaniach naukowych związanych z tym obszarem, gdzie oczekuje się znacznie lepszej dokładności mierzenia względem wymagań zawartych w normach. Jest to spore wyzwanie dla producenta w zakresie optymalizacji konstrukcji, środowiska pracy i systemów przetwarzania sygnału pomiarowego.

Rozwój metod ważenia jakie są obecnie dostępne na rynku jest możliwy tylko poprzez działania Laboratorium Producenta – nie ma innej drogi. Poszukiwanie zatem optymalizacji i urządzeń dla własnych projektów badawczych ma szansę powodzenia w ramach współpracy – jest to korzystne dla obydwu stron. Warto tu nadmienić, że firma Radwag mając własne zaplecze konstrukcyjne i informatyczne jest dobrym przykładem jak potrzeby rynku zaprojektować i wdrożyć do własnych produktów, nawet tych mocno skomplikowanych.

Spis rysunków

Rysunek 1. Kontrola parametrów metrologicznych wagi – dział QC firmy Radwag	4
Rysunek 2. Automatyzacja w pomiarach masy – układ robotyczny RB 2.5Y	5
Rysunek 3. Emisja pyłu pierwotnego z przemysłu - widok cząstek PM	6
Rysunek 4. Schemat tworzenia się oraz przemian pyłu zawieszonego w atmosferze.....	7
Rysunek 5. Różne rodzaje cząstek stałych.....	8
Rysunek 6. Udział procentowy frakcji wdychalnej, tchawicznej i respirabilnej w ogóle zawieszonych w powietrzu cząstek zgodnie z normą EN 481.	9
Rysunek 7. Przykład pobornika osobistego.....	10
Rysunek 8. Antropogeniczne źródła emisji pyłu	11
Rysunek 9. Badanie emisji cząstek stałych metodą WLTP oraz RDE	12
Rysunek 10. Schemat powstawania cząstek stałych w silnikach spalinowych.	12
Rysunek 11. Metoda pomiaru masy filtrów	16
Rysunek 12. Rozkład temperatury w pomieszczeniu przy zastosowaniu klimatyzacji biurowej.....	18
Rysunek 13. Zmienność masy filtrów w trakcie kondycjonowania.....	19
Rysunek 14. Adiustacja fabryczna z wykorzystaniem certyfikowanych wzorców	20
Rysunek 15. Schemat funkcjonalny wagi z przetwornikiem elektromagnetycznym,.....	20
Rysunek 16. Manualny pomiar masy filtra – mikrowaga MYA 5.5Y,	21
Rysunek 17. Czynniki wpływające na wartość błędu losowego w procesie pomiaru masy	21
Rysunek 18. Ogólna zasada działania adiustacji wagi elektronicznej	22
Rysunek 19. Widok masy adiustacyjnej mikrowagi serii MYA oraz wagi analitycznej XA.....	23
Rysunek 20. Korekta czułości wagi, Mikrowaga MYA 5.5Y.FA,.....	23
Rysunek 21. Obszary i rozdzielczość wag w metrologii prawnej	24
Rysunek 22. Waga XA 82/220.5Y.A – podstawowe testy metrologiczne.....	25
Rysunek 23. Pomiar masy sączka – badanie zawieszin, oczyszczalnia ścieków, waga XA 82/220.5Y.....	27
Rysunek 24. Rozdzielczość wagi / aplikacje wspierające proces pomiaru masy.....	29
Rysunek 25. Waga AS 220.X7, rozdzielczość 0.1mg, AS 82/220.X7 rozdzielczość 0.01/0.1mg	30
Rysunek 26. Mikrowaga MYA 5.5Y oraz MYA 5.5Y.FA (filtr max 70mm).....	30
Rysunek 27. Kontrola dokładności wskazań z wykorzystaniem wzorców masy – dział QC Radwag.....	31
Rysunek 28. Waga XA 82/220.5Y.A z czujnikami warunków środowiskowych THB / precyzja pomiaru	32
Rysunek 29. Reguła 3 sigma.....	33
Rysunek 30. Waga AS 82/220.R2 PLUS – możliwości funkcjonalne.....	35
Rysunek 31. Waga AS 82/220.X7 – możliwości funkcjonalne.....	36
Rysunek 32. Mikrowaga MYA 5.5Y- widok ikon funkcji Digital Weighing Auditor (DWA).....	36
Rysunek 33. Mikrowaga MYA 5.5Y,.....	37
Rysunek 34. Mikrowaga MYA 5.5Y.FA	37
Rysunek 35. Waga XA 52.5Y.F,	38
Rysunek 36. Pomiar masy filtrów AK-6 5Y.F	40
Rysunek 37. AK-6 5Y.F Magazyn filtrów – widok ogólny	41
Rysunek 38. AK-6 5Y.F - kaseta filtra.....	42
Rysunek 39. UMA 2.5Y.FC - System automatyczny do badania zmienności masy filtrów,.....	43
Rysunek 40. UMA 2.5Y.FC – schemat układu pomiarowego	44

Rysunek 41. UMA 2.5Y.F - System automatyczny do badania zmienności masy filtrów	46
Rysunek 42. Układ pomiarowy UMA 2.4Y.F oraz widok hamowni podwoziowej	47
Rysunek 43. System robotyczny RB 2.5Y.F	48
Rysunek 44. Schemat pobornika pyłu.....	49
Rysunek 45. Elementy konstrukcyjne układu robotycznego RB 2.5Y.F	49
Rysunek 46. Widok filtra przed ekspozycją, filtr umieszczony w antystatycznej kasce oraz filtrów po ekspozycji.....	50
Rysunek 47. RB 2.5Y.F – zmienność warunków kondycjonowania	50
Rysunek 48. Wzorzec masy dla układu robotycznego RB 2.5Y.F.....	51
Rysunek 49. Układ robotyczny RMC 2.5Y.F	52
Rysunek 50. Schemat stanowiska wagowego współpracującego z cobotem	53
Rysunek 51. Etapy pracy cobota, pobór kasety filtrem, pomiar masy.	54
Rysunek 52. Pomiar ładunków elektrostatycznych na filtrze, miernik SMC typu IZD10-510.....	54
Rysunek 53. Dejonizator DJ-05.....	56
Rysunek 54. Dryft wyniku ważenia filtra typu Pallflex EMFAB TXTOHI2O-WW, 47mm.....	56
Rysunek 55. Waga XA 210.5Y.A - jonizator w konstrukcji wagi,	57
Rysunek 56. Przykład automatycznego monitoringu jakości powietrza,.....	58
Rysunek 57. Metoda automatyczna rozpraszania światła.....	58
Rysunek 58. Metoda absorpcji promieniowania beta	59
Rysunek 59. Pomiar masy filtrów – akcesoria w metodzie pomiarowej	61

Spis tabel

Tabela 1. Główne źródła emisji pyłu PM 2,5, PM10 w Polsce – rok 2023	13
Tabela 2. Rodzaje filtrów wykorzystywanych w badaniach jakości powietrza atmosferycznego.....	14
Tabela 3. Wymagania dla wagowego systemu pomiarowego	15
Tabela 4. Warunki Kondycjonowania filtrów dla różnych obszarów badania.....	17
Tabela 5. Główne parametry metrologiczne wagi XA 82/220.5Y.A.....	25
Tabela 6. Wymagania OIML dla wagi XA 82/220.5Y.A.....	25
Tabela 7. Codzienne sprawdzenie dokładności wskazań wagi – SOP dla dwóch zakresów ważenia.....	26
Tabela 8. Podstawowe parametry wag laboratoryjnych	28
Tabela 9. Średnia i wartość błędu losowego w serii pomiarów, ważenie mikro kolby, mikrowaga XA 6.5Y.....	33
Tabela 10. Powtarzalność wskazań (mg) dla małych mas zależnie od obciążenia maksymalnego	34
Tabela 11. Niepewność względna zależnie od ilości pomiarów w serii.....	34
Tabela 12. Mikrowaga UYA 2.4Y/F – komora ważenia otwierana ręcznie	38
Tabela 13. Ultra-mikrowaga UYA 2.5Y.F, automatycznie otwierana komora ważenia.....	39
Tabela 14. Pomiary masy filtrów po dejonizacji	39
Tabela 15. Precyzja pomiarów dla wzorca masy oraz filtrów ϕ 47 mm.....	42
Tabela 16. UMA 2.5Y.FC – Powtarzalność wskazań.....	45
Tabela 17. UMA 2.5Y.FC – Powtarzalność wskazań.....	45
Tabela 18. UMA 2.5Y.FC – Powtarzalność wskazań.....	45
Tabela 19. Precyzja pomiaru masy dla wzorca oraz filtra – waga manualna & system automatyczny.....	47
Tabela 20. Błąd losowy wagi dla wzorca masy i filtra	51

13. Literatura

1. Pyły drobne w atmosferze - Kompendium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce. Katarzyna Juda-Rezler, Barbara Toczko red. GIOŚ, Warszawa 2016.
2. ISO 7708:1995. Air quality. Particle size fraction definitions for health-related sampling
3. Health and Safety Laboratory. General methods for sampling and gravimetric analysis of respirable, thoracic and inhalable aerosols. <https://www.hsl.gov.uk/>
4. EH40/2005 Workplace exposure limits. Reference EH40/2005. ISBN 9780717667031. The Stationery Office, 2020
5. Ziarna pyłku różnych gatunków roślin, powiększenie 500x, autor: Dartmouth College Electron Microscope Facility, licencja: Domena publiczna, źródło: Wikimedia Commons. Źródło: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Misc_pollen.jpg
6. Scanning electron micrograph (SEM) of a highly vesicular glass shard of ash measuring just over 0.1 mm long, erupted during the 18 May 1980 eruption of Mount St. Helens. Źródło: <https://www.usgs.gov/media/images/ash-particle-1980-mount-st-helens-eruption-magnified-200-times>
7. https://en.wikipedia.org/wiki/Particulate_matter
8. dr hab. Edward Więcek. Kryteria zdrowotne pobierania próbek aerozoli w środowisku pracy. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2011, nr 2(68), s. 5–21.
9. PN-EN 481:1998 Atmosfera miejsca pracy. Określenie składu ziarnowego dla pomiaru cząstek zawieszonych w powietrzu. (Workplace exposure - Size fraction definitions for measurement of airborne particles)
10. Heibisch, Ralph & Fricke, Hajo-Henning & Hahn, Jens-Uwe & Lahaniatis, Majlinda & Maschmeier, Claus-Peter & Mattenklott, Markus. (2005). Sampling and determining aerosols and their chemical components. <http://doi.org/10.13140/2.1.4181.9202>
11. EN 872, Water quality. Determination of suspended solids. Method by filtration through glass fibre filters
12. EN 12341:2024 „Ambient air - standard gravimetric measurement method for the determination of the PM10 or PM2,5 mass concentration of suspended particulate matter”
13. ISO 5725-1. Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarowych i wyników pomiarów. Ogólne zasady i definicje.
14. ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.
15. PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 – „Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących”
16. PN-EN ISO 10012:2004 – „Systemy zarządzania pomiarami. Wymagania dotyczące procesów pomiarowych i wyposażenia pomiarowego”.
17. PN-EN ISO 9001:2015-10 Systemy zarządzania jakością – Wymagania.
18. PN-ISO 5725-1. Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarowych i wyników pomiarów. Część I: ogólne zasady i definicje.
19. Chyzhykov, D., Widziewicz-Rzońca, K., Błaszczak, M., Rogula-Kopiec, P. & Słaby, K. Automatic weighing system vs. manual weighing precision comparison in PM-loaded filter measurements under different humidity conditions. Environ. Monit. Assess. 195 (11). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11939-7> (2023).
20. PN-EN 14181. Emisja ze źródeł stacjonarnych – Zapewnienie jakości automatycznych systemów pomiarowych.



Zeskanuj kod **QR**



lub **odwiedź** naszą stronę internetową **radwag.com**
aby zapoznać się **z pełną ofertą naszych produktów**

radwag.com