



## PUBLIKACJE

### TYTUŁ

Zastosowanie przyrządów Kamika do badania rozkładu pyłu węglowego i popiołu, jak również pomiaru zawartości pyłu w spalinach

### AUTORZY

Stanisław Kamiński, Dorota Kamińska, KAMIKA Instruments

### DZIEDZINA

zanieczyszczenia, pyły, spaliny, popiół

### PRZYRZĄD

IPS P, ISP K, 2DiSA

### SŁOWA KLUCZOWE

procentowy rozkład objętości ziarn w kanałach przetwornika, procentowy rozkład wagi ziarn na sitach, rozkład wagi ziarn, rozkład objętości ziarn, kanały przetwornika, kierunek ruchu, sferyczne, szerokości, amplituda

### ŹRÓDŁO

### ABSTRAKT

Każdy technolog zmagający się z dokładnym określeniem rozkładu uziarnienia pyłu węglowego, popiołu, mąki wapiennej i gipsu syntetycznego musi się zastanowić ile takie pomiary zajmą mu czasu i jak często będzie mógł te pomiary powtórzyć dla kontroli prowadzonego przez siebie procesu spalania węgla lub odsiarczania spalin. Na ogół takie pomiary wykonuje się sporadycznie w stosunku do masy użytego w procesie technologicznym materiału wierząc, że pył węglowy lub mąka wapienna ma uziarnienie stabilne co nie zawsze odpowiada rzeczywistości. Poza tym, obecnie prowadzone pomiary są zawsze spóźnione. Wyniki badań otrzymuje się, gdy surowiec już został użyty i nie można przeprowadzić żadnej korekcji uziarnienia

## **ZASTOSOWANIE PRZYRZĄDÓW KAMIKA DO BADANIA ROZKŁADU WIELKOŚCI CZĄSTEK PYŁU WĘGLOWEGO I POPIOŁU, JAK RÓWNIEŻ POMIARU ZAWARTOŚCI PYŁU W SPALINACH»**

Każdy technolog zmagający się z dokładnym określeniem rozkładu uziarnienia pyłu węglowego, popiołu, mąki wapiennej i gipsu syntetycznego musi się zastanowić ile takie pomiary zajmą mu czasu i jak często będzie mógł te pomiary powtórzyć dla kontroli prowadzonego przez siebie procesu spalania węgla lub odsiarczania spalin. Na ogół takie pomiary wykonuje się sporadycznie w stosunku do masy użytego w procesie technologicznym materiału wierząc, że pył węglowy lub mąka wapienna ma uziarnienie stabilne co nie zawsze odpowiada rzeczywistości. Poza tym, obecnie prowadzone pomiary są zawsze spóźnione. Wyniki badań otrzymuje się, gdy surowiec już został użyty i nie można przeprowadzić żadnej korekcji uziarnienia.

Powyższą sytuację można zmienić wykorzystując nowoczesne metody pomiaru, które mogą w warunkach laboratoryjnych kontrolować bieżące surowce w czasie rzeczywistym i pomóc w podejmowaniu decyzji czy dany surowiec nadaje się do dalszej produkcji lub czy młyny węglowe są zdadne do dalszego przemiału.

Takimi przyrządami są optyczno-elektroniczne urządzenia pomiarowe, które przy pomocy zastosowanej metody „Elsieve” mogą symulować pomiary według analiz sitowych lub areometrycznych dokładniej niż za pomocą klasycznych manualnych metod i do tego wielokrotnie szybciej. Dlaczego jest to możliwe? Dlatego, że te przyrządy mierzą w sposób automatyczny, rejestrują i obliczają wyniki bez udziału człowieka, a pierwotny pomiar jest rejestrowany na 4096 wirtualnych sitach i według tych sit sumowany jest na te kilka sit kontrolnych. Z laboratorium wyniki pomiarów mogą być przez Internet lub firmową sieć wysłane wszędzie w postaci dokumentu elektronicznego.

Należy podkreślić, że każdy pojedynczy analizator może zgodnie z programem komputerowym współpracować z klasycznymi metodami pomiaru wg sit mechanicznych uzupełniając wyniki z tych sit i „rozciągając” zakres pomiarowy tam, gdzie nie można mierzyć sitami.

Niektóre analizatory są zbudowane tak, że oprócz analiz sitowych mogą dwu lub trójwymiarowo skanować każde ziarno i przez to określać kształt ziaren, który ma wpływ na reaktywność danej sproszkowanej substancji w procesie technologicznym.

W Polsce popularna jest produkcja gazobetonów z popiołów elektrownianych. Do kontroli powierzchni właściwej mielonych popiołów używanych do gazobetonów stosuje się stosuje się optyczno-elektroniczne przyrządy pomiarowe.

### **PRZEGLĄD OPTYCZNYCH METOD POMIAROWYCH**

Optyczne metody pomiaru wielkości cząstek stałych można podzielić na metody, w których wykorzystuje się:

- 1) dyfrakcję Fraunhofera [1];
- 2) pomiar w ognisku optycznym [2];
- 3) pomiar w równoległej wiązce promieniowania w świetle przechodzącym [3];

Ad 1) Zasada pomiaru, w której stosuje się dyfrakcję Fraunhofera polega na wykorzystaniu załamania promieniowania laserowego na cząstkach i rejestracji kąta odchylenia tego promieniowania na ekranie wyposażonym w detektory. Natężenie oświetlenia dla poszczególnych kątów odchylenia świadczy o rozkładzie wielkości cząstek. Jest to dosyć prymitywna, analogowa metoda pomiaru, o małym zakresie dynamiki pomiaru. Tego pomiaru można prawidłowo używać tylko do pomiaru cząstek kulistych.

Ad 2) Zasada pomiaru w ognisku optycznym polega na pomiarze rozproszenia światła lub pomiarze natężenia światła odbitego przez cząstki przechodzące przez miejsce gdzie znajdują się ogniska układów optycznych: oświetlającego i odbierającego promieniowanie. W tym wypadku pomiar odbywa się na małej powierzchni przestrzeni pomiarowej, z powodu określonych wymiarów ogniska optycznego. Jeśli w małą powierzchnię nie trafi cała cząstka to pomiar jest błędny. Całkowity wynik, odnoszący się do całego przekroju strumienia masy jest wielokrotnością powierzchni ogniska optycznego w stosunku do przekroju pomiarowego wydatku gazu i jest mnożony od 200 do 500 razy, co może powodować dodatkowe duże błędy.

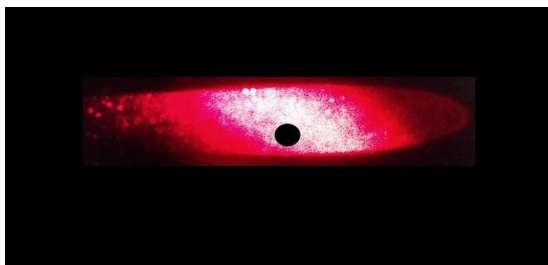
Ad 3) Zasada pomiaru w równoległej wiązce promieniowania polega na utworzeniu dużych płaszczyzn pomiarowych o jednakowej czułości w każdym ich punkcie, ograniczonych tylko rozstawieniem i średnicą układów optycznych. Cząstka przechodząca przez płaszczyznę pomiarową wywołuje rozproszenie strumienia promieniowania proporcjonalne do wymiaru cząstki.

Metoda pomiaru w równoległej wiązce promieniowania nie ma wad poprzednich metod i wykorzystywana jest w analizatorze IPS.

Do powyższych metod można stosować promieniowanie laserowe i podczerwone. Długość fali promieniowania z diod laserowych i emitujących bliską podczerwień są zbliżone do siebie i wynoszą od 600 do 900 nm. Długość 900 nm jest bliska maksymalnej czułości fotodiod.

Dla układów pomiarowych wykorzystujących optykę geometryczną wymagana jest jednorodność natężenia strumienia promieniowania, ponieważ to zapewnia jednorodną czułość w danym obszarze pomiarowym.

Z dokonanego przeglądu wynika, że ważnym elementem urządzeń do pomiaru granulacji materiałów jest źródło światła. Obecnie istnieje wiele różnych diod laserowych wytwarzających koherentny i skoncentrowany strumień promieniowania, ale te diody nie nadają się do zastosowania w optyce geometrycznej. Jest trudno uzyskać laserowy strumień promieniowania o jednakowym natężeniu w każdym jego punkcie. Światło laserowe o jednakowym natężeniu promieniowania jest trudne do wykonania.



Rys 1. Nierównomierny rozkład światła laserowego.

Ilustracją takiego natężenia światła jest Rys. 1, gdzie w tle 150  $\mu\text{m}$  szczeliny ze światłem laserowym narysowana jest 40  $\mu\text{m}$  cząstka. Pomiar wspomnianej cząstki w

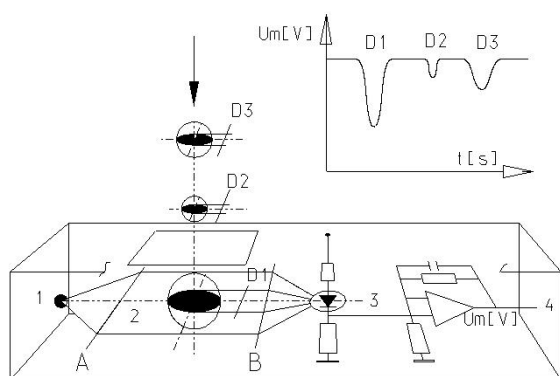
różnym miejscu tej szczeliny metodą światła rozproszonego da różne wyniki pomiarów. Przy użyciu „dyfrakcji laserowej” wyniki też będą różne. Wynika to z geometrii promieniowania diody laserowej oraz ustawienia diody względem szczeliny.

Wiele poprawniejszym promiennikiem dla optyki geometrycznej jest dioda infrared (IR). Promieniowanie diod IR jest bardziej równomierne niż diod laserowych.

### ZASADA DZIAŁANIA CZUJNIKA IPS

System pomiarowy (IPS) Infrared Particle Sizer funkcjonuje w oparciu o czujnik cząstek przedstawiony na Rys.1, który zbudowany jest ze źródła energii świetlnej-fotodiody emitującej światło w zakresie bliskiej podczerwieni (1), układu soczewek i przesłon (A) i (B) wyznaczających powierzchnię pomiarową (2) oraz detektora fotodiodowego (3) z zespołem elektronicznym (4) wstępnego przetwarzania sygnału.

Przestrzeń pomiarowa ukształtowana jest przez zespół optyczny w taki sposób, że jej powierzchnia jest znaczna w stosunku do wielkości mierzonych cząstek. Takie ukształtowanie oraz równomierna czułość w obszarze całej powierzchni zapewnia całkowitą eliminację błędów krawędziowych i jednakowe wykrywanie każdej cząstki.



Rys 2. Sposób pomiaru cząstek.

Znane jest równanie opisujące zależność pomiędzy średnicą cząstki a amplitudą impulsu elektrycznego. Uwzględniając charakterystykę przetworzenia strumienia świetlnego na sygnał elektryczny w zespole elektronicznym uzyskuje się charakterystykę pomiarową w jednostkach fizycznych (mikrometrach), o nieliniowości w obszarze małych średnic analizowanych cząstek. Do stworzenia takiego układu przydatne jest dowolne źródło promieniowania o stabilnej i równomiernej charakterystyce świecenia. Okazało się, że dioda laserowa do takich precyzyjnych badań nie nadaje się.

### SPOSOBY OPRACOWYWANIA WYNIKÓW POMIARÓW

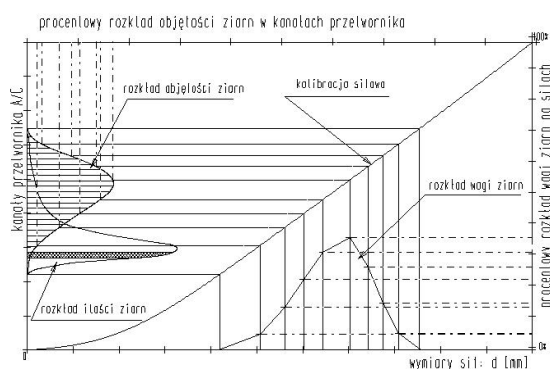
#### POMIAR WEDŁUG KALIBRACJI SFERYCZNEJ

Istnieje ścisła zależność pomiędzy maksymalnym wymiarem ziarna a amplitudą impulsu elektrycznego na wyjściu z czujnika pomiarowego. Zmierzone i policzone impulsy pozwalają jednoznacznie, dokładnie i powtarzalnie określić zbiór ziaren w jednostkach elektrycznych, to jest w kanałach przetwornika, które można zapisać w pamięci komputera. Wymiar cząstki w jednostkach elektrycznych jest jednocześnie numerem kanału. Otrzymane wyniki kalibruje się przy pomocy wzorców kulistych. Po kalibracji uzyskuje się rzeczywiste wymiary cząstek. W celu przejścia od rozkładów ilościowych do objętościowych wpisuje się cząstkę o danym wymiarze w kulę. Objętość kuli jest zawsze większa od niż objętość rzeczywistej cząstki, wówczas

rozkłady wagowe cząstek kulistych opisanych na rzeczywistych wymiarach cząstek będą jednoznacznie zawsze większe niż rozkłady sitowe tych samych cząstek.

## METODA ELSIEVE [4]

Przy opracowaniu nowych metod pomiarowych, które mogą być dokładniejsze, szybsze, mierzące w szerszym zakresie musi być zwrócona uwaga na kompatybilność wyników pomiędzy starymi metodami i nowymi. Nowa metoda pomiaru musi być zawsze porównywalna ze starą jeśli pomiar wykonywany starą metodą jest poprawny. Wyniki pomiarów zbioru cząstek otrzymywane przy pomocy optyczno-elektronicznych metod powinny symulować obecnie stosowane pomiary według sit mechanicznych.



Rys 3 Kalibracja sitowa przyrządu

optycznego. Przejście od wirtualnych sit elektronicznych do sit mechanicznych.

Wszystkie optyczno-elektroniczne przyrządy Kamiki stosują takie symulacje zgodnie z metodą Elsieve, która wykorzystuje cyfrowe metody pomiaru tylko jednego wymiaru cząstki zapisanego w pamięci komputera przy pomocy kanałów przetwornika A/C.

Kanały przetwornika odpowiadają 4096 wirtualnych sit. Zapisany w pamięci komputera w postaci rozkładu statystycznego ilości i wielkości zbiorów ziarn, po przeliczeniu na rozkład objętościowy można porównać z rzeczywistymi pomiarami według sit mechanicznych.

Jak przedstawiono na Rys.3 z powyższego porównania można uzyskać charakterystykę, która będzie kalibracją sitową optyczno-elektronicznego przyrządu pomiarowego.

Kalibracja jest przypisana dla określonego materiału składającego się z typowych co do kształtu, ale różnych co do wielkości ziarn.

W przypadku ziarn o kształcie innego typu należy zrobić inną kalibrację i stworzyć bibliotekę kalibracji sitowych.

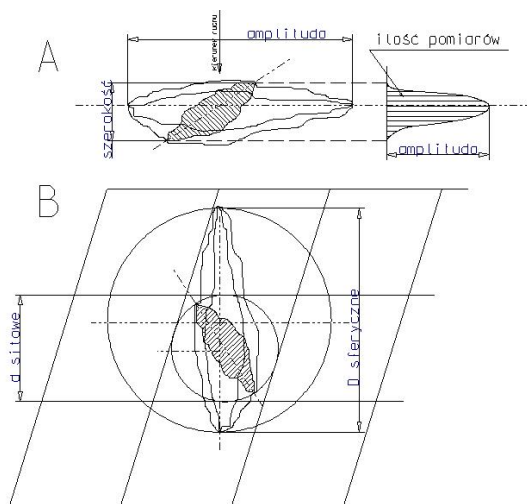
Z biblioteki takich kalibracji zapisanych w komputerze można wybrać właściwą i przeliczyć statystycznie rozkład cząstek zapisanych w jednostkach elektrycznych na wymiary rzeczywiste i dokładnie zasymulować pomiary sitowe.

## METODA 2DISA OKREŚLENIE KSZTAŁTU CZĄSTKI [5]

Kontynuując poprzednie rozważania i analogicznie przyjmując, że istnieje ścisła zależność pomiędzy minimalnym wymiarem cząstki a szerokością impulsu elektrycznego, do tego znając dwa wymiary prostopadłe do siebie, obliczone według kalibracji sferycznej można określić dodatkowy współczynnik kształtu cząstki równy stosunkowi wymiaru maksymalnego do minimalnego.

Dla uzyskania współczynnika kształtu należy spełnić kilka podstawowych warunków:

- 1) Należało zwiększyć częstotliwość pomiaru, czyli skanowania cząstek z 500kHz do 12MHz. 24-krotne zwiększenie częstotliwości umożliwiło zwiększenie dokładności pomiaru szerokości
  - 2) Mierzyć prędkość poruszania się cząstki w przestrzeni pomiarowej, aby uniezależnić się od pomiarów w stanie przejściowym przyrządu (rozpędzanie się lub inne regulacje sprężarki)
  - 3) Uwzględnić rachunkowo ciężar właściwy cząstek użytych do wzorcowania przyrządu i do bieżącego pomiaru.
  - 4) Uwzględnić wpływ kalibracji metody Elsieve na zmianę rzeczywistych wymiarów cząstki.
- Szerokość impulsu jednoznacznie określa najmniejszy wymiar cząstki to jest jej grubość Rys.4.



Rys.4 Porównanie metod pomiaru

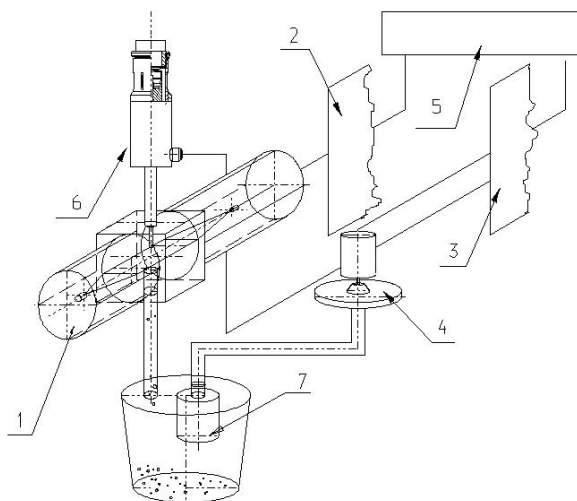
A. pomiar optyczno – elektroniczny

B. pomiar sitowy

Współczynnik kształtu

$WK = (\text{Amplituda} / \text{szerokości}) \text{ impulsu}$

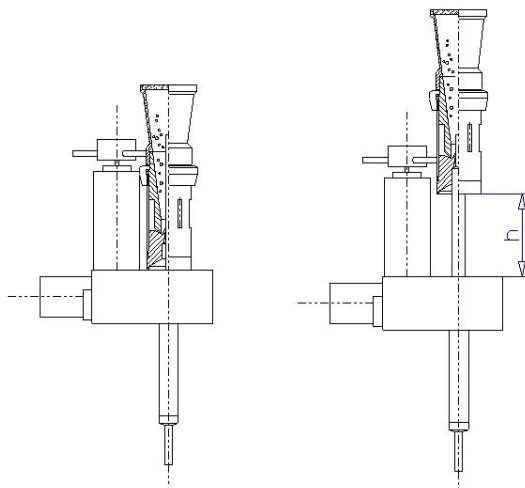
## DOZOWANIE CZĄSTEK W APARATURZE IPS



Rys.5 Pomiar i sterowanie w systemie IPS

Dozowanie cząstek, zwłaszcza w ośrodku powietrznym jest wypadkową wielu czynników składających się na sam proces dozowania jak i na właściwości fizykochemicznych dozowanego materiału. Rozwiązanie przyjęte w systemie IPS zakłada ciągłą kontrolę procesu dozowania w trakcie pomiaru poprzez utrzymywanie prawie stałego natężenia cząstek w przestrzeni pomiarowej.

Rys.5 ilustruje schematycznie sposób dozowania w systemie IPS. Cząstki materiału poddawanego analizie nasypuje się za pomocą specjalnego próbnika do pojemnika dozownika (6), który zostaje pobudzony do drgań poprzez współzależny układ wibracyjny ultradźwiękowy, który pracuje z rozdzielczością 16000000. Stosuje się także dozowniki aerodynamiczne [6], (przedstawiony na rys.6) do dozowania większych cząstek do 2 mm. Obydwa typy dozowników wykorzystują ten sam układ sterujący, przedstawiony na rys.5. Układ pomiarowo-sterujący składa się z czujnika cząstek (1) połączonego z komputerem (5) za pomocą układu pomiarowego (2). Z komputera (5) wychodzą sygnały do dozownika (6) i sprężarki (4) przez układ sterujący (3). Cały system IPS pracuje w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Parametry sterowania mogą się zmieniać do 50 razy na sekundę. Pojemnik dozownika jest także włączony w obieg układu zasysania, którego wysokość wlotu  $h$  jest regulowana automatycznie podczas dozowania. Cząstki z pojemnika zasysane są do otworu wlotowego i dalej w strumieniu powietrza przechodzą przez przestrzeń pomiarową sondy, a następnie opadają na dno zbiornika lub zatrzymują się na filtrze sprężarki



Rys.6 Sposób pracy dozownika aerodynamicznego

Sprężarka sterowana jest za pomocą specjalnego układu elektronicznego z torem pomiarowym. Istotną cechą tego typu dozowania jest jego pełna kontrola przez układ pomiarowy. Obydwa dozowniki stosuje się zamiennie.

Liczba cząstek przechodzących przez przestrzeń pomiarową w jednostce czasu, zdefiniowana jako „stężenie cząstek” jest utrzymywana automatycznie na poziomie zapewniającym efektywny pomiar a zarazem minimalne błędy koincydencji. Rozwiązanie zastosowane w IPS charakteryzuje się tym, że istnieje możliwość sterowania procesem dozowania w bardzo szerokich granicach.

## PYŁOMIERZ IPS K

W związku z coraz mniejszą koncentracją pyłu w spalinach, typowe pyłomierze grawimetryczne stają się mniej przydatne niż urządzenia optyczno-elektroniczne, które mogą mierzyć i sumować masy pojedynczych cząstek. Przy wykorzystaniu pewnych sprawdzonych elementów dotychczas wykorzystywanych pyłomierzy grawimetrycznych powstał analizator IPS K elektroniczny pyłomierz, który całkowicie symuluje pracę pyłomierza grawimetrycznego przy małych koncentracjach.

Analizator IPS K spełnia ściśle, co do sposobu odbierania próbki cząstek i porównawczo dla obliczenia masy, wymagania normy PN-Z04030-7 i ISO 9096 dotyczące pomiaru małych stężeń. Ponadto analizator ma certyfikat CE. Przy pomocy analizatora można zgodnie z normą EN 481 wyznaczyć rozkład pyłu zawieszonego PM 10, PM 2,5.

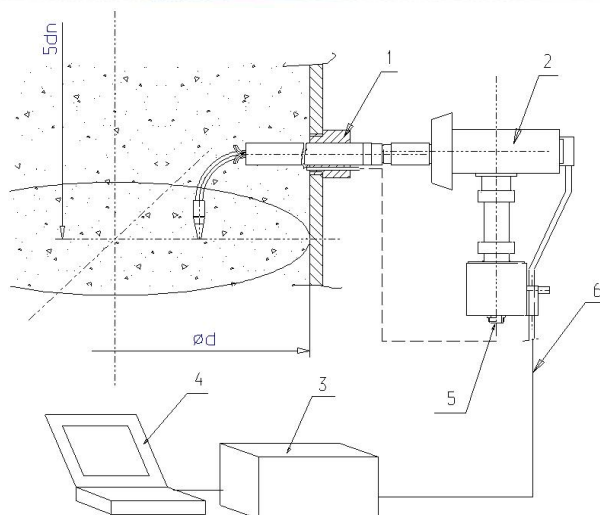
Wykonawstwo analizatora wzorowane jest na normie ISO 10012-1 dotyczącej zapewnienia jakości wyposażenia pomiarowego.

Analizator kalibrowany jest cząstkami sferycznymi według standardów i atestów firmy Thermo Scientific, USA.

Analizator IPS w wersji K [7] jest urządzeniem „on line” służącym do pomiaru pyłu PM 10 i PM 2,5 w spalinach lub kanałach powietrznych, niezależnie od ich właściwości fizycznych i chemicznych.

Zasada działania analizatora IPS polega na poborze ze strumienia gazu cząstek i pomiarze w sposób optyczny, tak samo jak w poprzednim przyrządzie. Po zakończeniu pomiaru danej próbki wyniki przedstawiane są za pomocą statystycznych parametrów zbioru, jak również rozkładów różnych właściwości cząstek.





Rys.7 Badania stężenia pyłu przy pomocy IPS K

Analizator składa się z czujnika pomiarowego, z którym zintegrowany jest elektroniczny układ automatycznej regulacji izokinetycznego poboru gazu.

Elementem wykonawczym w układzie dozowania jest miniaturowa sprężarka.

Przed czujnikiem pomiarowym znajduje się układ do pomiaru wydatku powietrza, który umożliwia określenie koncentracji cząstek w zasysanym powietrzu.

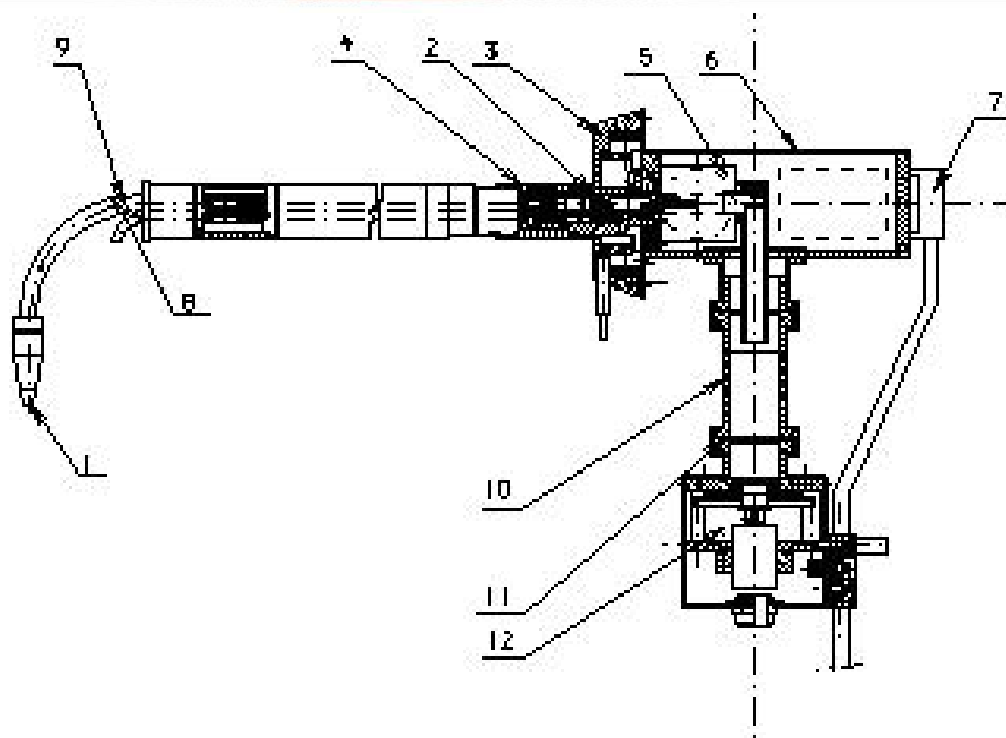
Pomiar objętości powietrza odbywa się przez sumowanie chwilowych wydatków z dokładnością 0,4%. Do obliczenia wartości wydatku uwzględnia się wpływ temperatury.

Na rys. 7 zestawiony jest układ pomiarowy IPS K. Sonda pomiarowa [2] wyposażona jest w pierścień [1] mocujący ją w badanym kanale. Sonda [2] połączona jest z elektronicznym układem sterującym [3] za pomocą 25-żyłowego kabla [6] o długości 10 m.

Obrobione cyfrowo sygnały pomiarowe są przekazywane do portu USB komputera [4].

Gdy ciśnienie w kanale różni się od ciśnienia atmosferycznego, zalecane jest połączenie wylotu sprężarki [5] z wlotem kanału, który znajduje się w pierścieniu [1].

Przy wlocie cząstek znajdują się dwa przeciwstawnie usytuowane wloty rurek, które mierzą prędkość unoszącej cząstki gazu. Dzięki temu, poprzez odpowiednie zasysanie, zapewniony jest izokinetyczny wlot cząstek do analizatora.



Rys.8 Schemat konstrukcyjny sondy pomiarowej IPS K

## SPOSÓB POMIARU

Schemat sondy pomiarowej przedstawiony jest na rysunku 8.

Dla izokinetycznego wpływu spalin przez wlot [1] mierzy się prędkość spalin za pomocą rurki Pitota [8]. Wlotowa prędkość izokinetyczna we wlocie [1] jest określona z równania ciągłości po pomiarze wydatku na zwężce [2] i porównana z pomiarem według rurki Pitota [8].

Mierzone cząstki są transportowane przez wlot [1] w strumieniu zassanych spalin. Po przejściu przez zwężkę pomiarową [2] i strefę pomiaru czujnika [5] cząstki odprowadzane są kanałem [10] przez filtr [11] i sprężarkę [12] na zewnątrz układu pomiarowego.

W osłonie [3] znajdują się czujniki do pomiaru wilgotności i temperatury i filtr powietrza zasysanego z zewnątrz i chroniącego optykę. Wydłużoną część sondy skręca się z głowicą [6] za pomocą połączenia gwintowego [4]. W głowicy [6] znajdują się elektroniczne układy do pomiaru prędkości spalin mierzone przez rurki [8] oraz czujniki do pomiaru wydatku spalin mierzonego przez zwężkę [2]. Przewody elektryczne doprowadzone są do głowicy [6] złączem [7]. Ponadto analizator wyposażony jest w termoparę [9] do pomiaru temperatury w badanym kanale. Elektroniczne sygnały pomiarowe od czujników i sterujące sprężarką [12] są przekazywane przez złącze [7].

Na wyposażeniu analizatora znajdują się: trzy dysze wlotowe, które można dowolnie wymieniać po zdjęciu stożka wlotu [1], pięć kryz czystego powietrza, które zmienia się po zdjęciu osłony [3] filtra.

Kombinacja dysz wlotowych i kryz umożliwia stosowanie pyłomierza w szerokich granicach wielkości parametrów pomiarów.

Zamontowanie normowego filtra (11) o średnicy  $\phi 50$  umożliwia dodatkowy pomiar grawimetryczny zgodny ze standardem PN EN 13284-1.

## ZAKRES POMIAROWY SYSTEMU IPS K

- Wielkość mierzonych cząstek od 0,5 do 300 $\mu\text{m}$
- Nierównomierność czułości powierzchni pomiarowej 2,5 %
- Prędkość zliczania do 10000 cząstek na sekundę
- Liczba klas wymiarowych – 256z automatycznym podziałem na PM 10 i PM 2,5
- Długość sondy 1000 mm
- Pomiar prędkości spalin od 1 do 30 m/s
- Pomiar objętości zassanych spalin
- Pomiar stężenia zanieczyszczeń stałych od pojedynczych cząstek do 5 mg/m<sup>3</sup>
- Pomiar wilgotności i temperatury spalin oraz temperatury przyrządu
- Czas pomiaru sterowany z klawiatury

Pomiar powyższych parametrów można obserwować w czasie rzeczywistym na monitorze komputera.

Po wykonaniu pojedynczych pomiarów i znalezieniu średniego reprezentatywnego punktu stężenia pyłu można przystąpić do pomiarów monitoringowych.

Pomiar monitoringowy wykonywany jest przez określony czas np. 15min i wynik tego pomiaru zapamiętywany jest w komputerze a system przechodzi do następnego pomiaru o numerze zwiększonym o jeden. Po określonym czasie np. 1 tygodnia lub miesiąca wyniki monitoringowe można analizować w zbiorczym zestawieniu.

## SPIS LITERATURY

1. **ISO 13320** Particle Size Analysis – Laser diffraction method. ISO 2009.
2. **Model 3321** Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer, TSI Instruction Manual, 2004.
3. **S. Kamiński, D. Kamińska** Porównanie Optyczno –Elektronicznych Metod Pomiaru Granulacji // Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, 2007. Tom XII, Nr. 2 str. 85
4. **Patent RP NR. 205738**, Sposób określania zawartości frakcji ziarnowych materiałów sypkich zwłaszcza materiałów mineralnych, 2006.
5. **S.Kamiński** Dwuwymiarowa Analiza Uziarnienia Popiołów // Konferencja Zakopane 2011, Popioły z energetyki . str. 19-21.
6. **Patent RP NR. 169704**, Dozownik materiałów sypkich, 1996
7. **R. Rajczyk** Emisja mikrocząstek w procesie spalania biomasy w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej, / Rozprawa doktorska Promotor: prof. dr hab. inż. W. Nowak / Wydział Inżynierii i Ochrony Środowiska, Politechnika Częstochowska 2006.

### Słowa dodatkowe:

Procentowy rozkład objętości ziarn w kanałach przetwornika,  
Procentowy rozkład wagi ziarn na sitach  
Rozkład wagi ziarn  
Rozkład objętości ziarn  
Kanały przetwornika  
Kierunek ruchu,  
Sferyczne, sitowe, szerokość, amplituda