

**POMIAR KONCENTRACJI I STRUMIENIA MASY  
PYŁU WĘGLOWEGO PODAWANEGO DO  
PALNIKÓW KOTŁÓW ENERGETYCZNYCH**

MAZUR Maria, TEISSEYRE Mieczysław  
Politechnika Wrocławska, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów  
Wrocław, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27

**STRESZCZENIE**

W referacie przedstawiono grawimetryczną metodę pomiaru koncentracji i strumienia masy pyłu węglowego. Metoda ta może być stosowana w pomiarach także innych sypkich materiałów transportowanych pneumatycznie. W oparciu o wyniki badań przemysłowych określono wpływ konfiguracji geometrycznej pyłoprzewodu na warunki aspiracji próbki pyłowo-gazowej.

**1. WSTĘP**

Optimalizacja procesu spalania paliwa w kotłach pyłowych wiąże się z kontrolą rozkładu strumienia masy fazy stałej w rozgałęzionej sieci transportu pneumatycznego paliwa do poszczególnych palników oraz z kontrolą stopnia przemiału paliwa osiąganego w układach młynowych. Istnieją wprawdzie techniczne możliwości realizacji ciągłego pomiaru koncentracji i strumienia masy fazy stałej transportowanej pneumatycznie jak również jej składu granulometrycznego ( m.in. [1]), ale utrudnienia techniczne i wysokie koszty takich układów pomiarowych znacznie ograniczają możliwości ich stosowania.

W praktyce pomiarowej, zwłaszcza w energetyce, powszechne zastosowanie znalazła metoda ekstrakcyjna polegająca na okresowej aspiracji próbki mieszanki pyłowo-gazowej z pyłoprzewodów oraz odseparowaniu fazy stałej i gazowej w sposób umożliwiający określenie

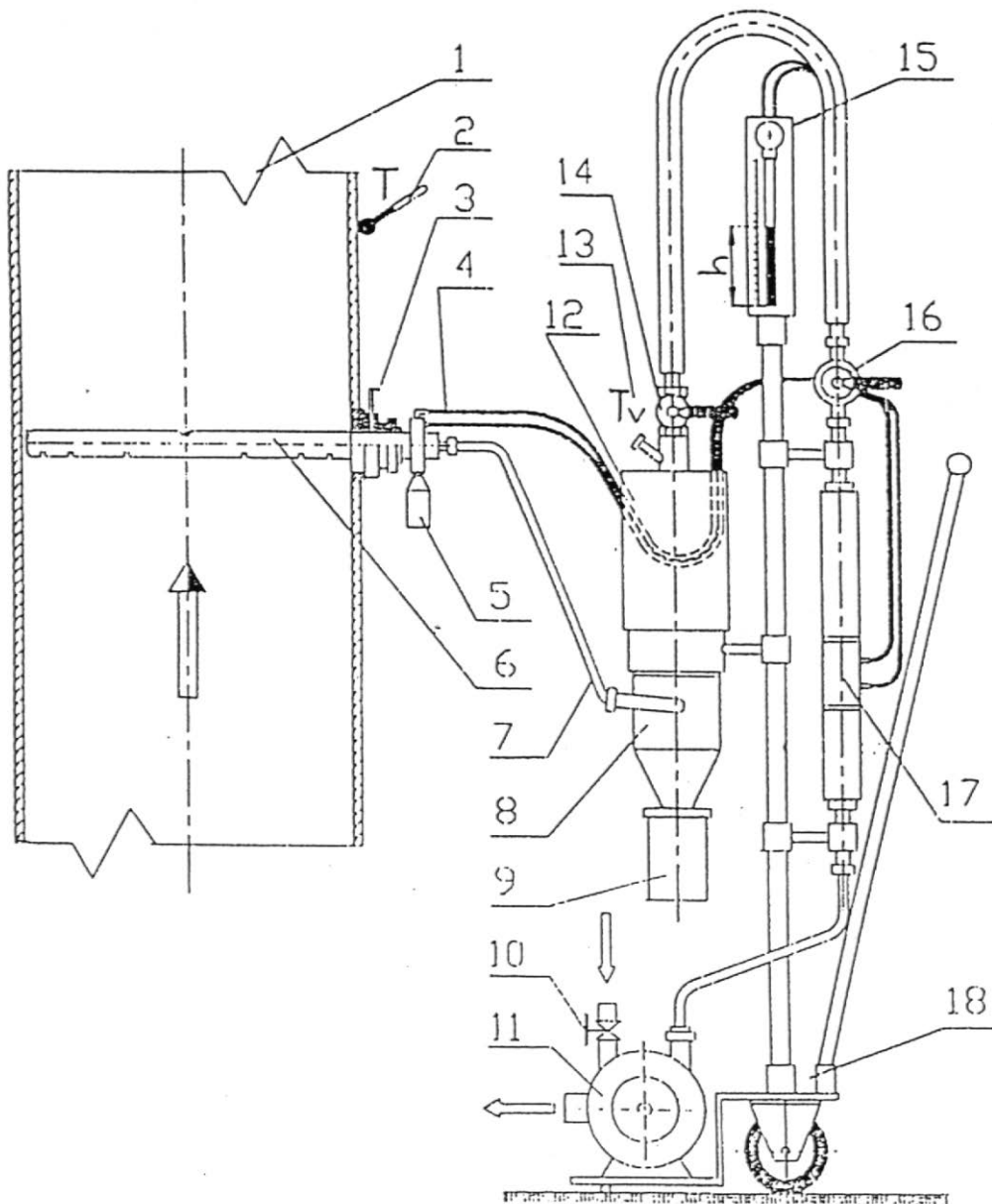
ich mas. Stosowane metody i urządzenia pomiarowe muszą zapewniać reprezentatywność pobranej próbki pod względem uziarnienia fazy stałej oraz jej koncentracji w gazie nośnym. Reprezentatywność zdeterminowana jest zachowaniem odpowiednich warunków aspiracji, wysoką skutecznością separacji pyłu ze strumienia gazu oraz dokładnym oznaczeniem masy fazy stałej i fazy gazowej. Źródłem największych błędów w ocenie koncentracji pyłu węglowego jest aspiracja próbki pyłowo-gazowej do przyrządu pomiarowego.

## 2. ZASADA POMIARU METODĄ GRAWIMETRYCZNĄ

Warunki realizacji pomiaru określone są odpowiednimi normami [2,3]. Zasadnicze różnice dotyczą metody określania prędkości gazu w pyłoprzewodzie oraz konstrukcji sondy aspiracyjnej. Zgodnie z polską normą [2] należy wykonać pomiar prędkości gazu w pyłoprzewodzie rurką spiętrzającą, natomiast norma ISO [3] zaleca metodę obliczeniową, w której prędkość gazu wyznaczana jest w oparciu o wynik pomiaru ilości gazu doprowadzonego do młyna po przeliczeniu go na warunki panujące w pyłoprzewodach (temperatura, ciśnienie i stopień zawilżenia gazu). Opisana w normie ISO wielootworowa obrotowa sonda aspiracyjna zapewnia uzyskanie uśrednionej próbki pyłowo-gazowej bez konieczności przesuwania sondy wzdłuż osi pomiarowej i przekładania sondy do kolejnych króćców pomiarowych zlokalizowanych w pyłoprzewodzie, tak jak to jest wymagane w przypadku jednootworowej sondy aspiracyjnej opisanej w polskiej normie.

W grawimetrycznym pomiarze stężenia i strumienia masy pyłu w gazach odlotowych powszechne zastosowanie znalazły sondy umożliwiające skojarzenie pomiaru prędkości z aspiracją próbki pyłowo-gazowej, natomiast w ciągłych pomiarach strumienia objętości gazu stosuje się często wielootworowe sondy spiętrzające umożliwiające uśrednianie ciśnienia spiętrzenia w osi pomiarowej. Kompilacją tych dwóch rozwiązań jest sonda aspiracyjno-prędkościowa stanowiąca wyposażenie przyrządu przedstawionego na rys. 1. Dzięki jej zastosowaniu uzyskuje się uśrednioną w osi pomiarowej próbkę pyłową oraz informację o średniej wartości prędkości fazy gazowej.

Koncentracja pyłu  $Y$  wyznaczana jest jako stosunek strumienia masy pyłu  $M_s$  do strumienia masy fazy nośnej  $M_v$  w pobranej do przyrządu próbce mieszaniny pyłowo-gazowej. Koncentracja pyłu jest więc funkcją masy pyłu  $m$  wytrąconego w czasie aspiracji  $\Delta\tau$  w separatorze o skuteczności  $\eta_c$  oraz funkcją stałej zwężki  $K_v$ , ciśnienia różnicowego  $\Delta P_v$  i



Rys.1. Schemat przyrządu pomiarowego EMITEST 10P97 [4]:

1 - pyłoprzewód, 2 - termometr, 3 - łącznik pyłoszczelny, 4 - przewody impulsowe, 5 - wskaźnik położenia sondy, 6 - sonda, 7 - przewód elastyczny, 8 - cyklonowy separator pyłu, 9 - zbiornik pyłu, 10 - zawór regulacji „by pass”, 11 - agregat zasysający, 12 - wymienna gilza filtracyjna, 13 - termometr, 14 - zawór regulacyjny dławieniowy, 15 - manometr, 16 - zawór trójdrogowy, 17 - zwężka pomiarowa, 18 - podstawa jezdna.

Fig.1. Scheme of measuring instrument EMITEST 10P97 [4]:

1 - pulverized material pipe, 2 - thermometer, 3 - dustless connection, 4 - pressure differential line, 5 - sampler direction indicator, 6 - sampler, 7 - hose, 8 - cyclone, 9 - sample bottle, 10 - bypass valve, 11 - pump, 12 - exchange filter, 13 - thermometer, 14 - control valve, 15 - gauge, 16 - three-way valve, 17 - flow meter, 18 - truck.

gęstości gazu w zwężce  $\rho_v$ :

$$Y = \frac{M_s}{M_v} = \frac{m}{\eta_c \Delta\tau} \frac{1}{K_v \sqrt{\Delta P_v \rho_v}}, \quad (1)$$

Strumień masy pyłu  $M_p$  w pyłoprzewodzie wyznacza iloczyn koncentracji  $Y$  oraz strumienia masy gazu  $M_g$  wyrażonego jako funkcja stałej sondy  $K$ , ciśnienia spiętrzenia  $\Delta P$ , gęstości fazy nośnej  $\rho$  i średnicy pyłoprzewodu  $D$ :

$$M_p = Y M_g = Y K \sqrt{\Delta P \rho} \frac{\pi D^2}{4}. \quad (2)$$

Dla określonych obiektów możliwe jest wprowadzenie do równań (1) i (2) odpowiednich stałych  $C_Y$  i  $C_M$  przyrządu pomiarowego, co znacznie ułatwia realizację procedur obliczeniowych:

$$Y = C_Y \frac{m}{\Delta\tau} \sqrt{\frac{T_v}{\Delta P_v}}, \quad (3)$$

$$M_p = C_M \frac{m}{\Delta\tau} \sqrt{\frac{T_v \Delta P}{T \Delta P_v}} D^2. \quad (4)$$

Grawimetryczna metoda pomiaru umożliwia także ocenę równomierności rozplywu fazy nośnej i transportowanego materiału bez konieczności obliczania wartości obu strumieni masowych. Dla układu  $n$  przewodów współpracujących z określonym obiektem udział strumienia masy gazu w  $i$ -tym pyłoprzewodzie  $k_{gi}$  wyznaczyć można jako funkcję mierzonych bezpośrednio parametrów: ciśnienia spiętrzenia  $\Delta P_i$  i temperatury  $T_i$  gazu w pyłoprzewodzie

$$k_{gi} = \frac{\sqrt{\Delta P_i / T_i}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta P_i / T_i}} 100\%, \quad (5)$$

natomiast udział strumienia masy fazy stałej  $k_{pi}$  jako funkcję pobranej masy próbki pyłu  $m_i$  oraz ciśnienia różnicowego  $\Delta P_{vi}$  i temperatury  $T_{vi}$  w zwężce pomiarowej

$$k_{pi} = \frac{m_i \sqrt{T_{vi} / \Delta P_{vi}}}{\sum_{i=1}^n m_i \sqrt{T_{vi} / \Delta P_{vi}}} 100\%. \quad (6)$$

Teoretycznie aspiracja próbki pyłowo-gazowej powinna być realizowana w warunkach izokinetycznych, tzn. takich, że prędkość wlotowa gazu do sondy  $w_a$  równa jest lokalnej prędkości medium w pyłoprzewodzie  $w$  czyli współczynnik izokinetyczności

$$H = \frac{w_a}{w} = 1. \quad (7)$$

Równanie (7) oznacza równość strumienia masy gazu w przekroju wlotowym sondy aspiracyjnej  $M_a$  wyrażonego jako funkcja całkowitego pola przekroju wlotowego sondy  $A_a$ , stałej rurki spiętrzającej  $K$ , ciśnienia spiętrzenia  $\Delta P$  i gęstości mieszaniny pyłowo-gazowej  $\rho_{sg}$  oraz strumienia masy gazu w zwężce pomiarowej  $M_v$ :

$$A_a K \sqrt{\Delta P \rho_{sg}} = K_v \sqrt{\Delta P_v \rho_v}. \quad (8)$$

Zależność pomiędzy zastępczą gęstością dla mieszaniny pyłowo-gazowej  $\rho_{sg}$  a gęstością fazy gazowej  $\rho$  opisuje równanie Gasterstäda

$$\rho_{sg} = \rho (1 + K_G Y), \quad (9)$$

w którym  $K_G$  jest wielkością empiryczną charakteryzującą warunki transportu pneumatycznego fazy stałej (np. ziarnistość i gęstość fazy stałej czy konfigurację geometryczną przewodu transportowego). W praktyce pomiarowej wyznacza się więc gęstość gazu  $\rho$ , ale wówczas nie jest spełniona równość (8). Łatwo wykazać, że rolę czynnika regulującego spełniać może współczynnik izokinetyczności  $H$ . Z warunku

$$A_a K \sqrt{\Delta P \rho} H = A_a K \sqrt{\Delta P \rho_{sg}} \quad (10)$$

wynika zależność

$$H = \sqrt{1 + K_G Y} > 1. \quad (11)$$

Nadizokinetyczna aspiracja fazy gazowej jest w rzeczywistości faktycznie quasi-izokinetyczną aspiracją mieszaniny pyłowo-gazowej, pod warunkiem dostatecznie dobrego określenia wartości  $H$ .

### 3. POMIARY PRZEMYSŁOWE

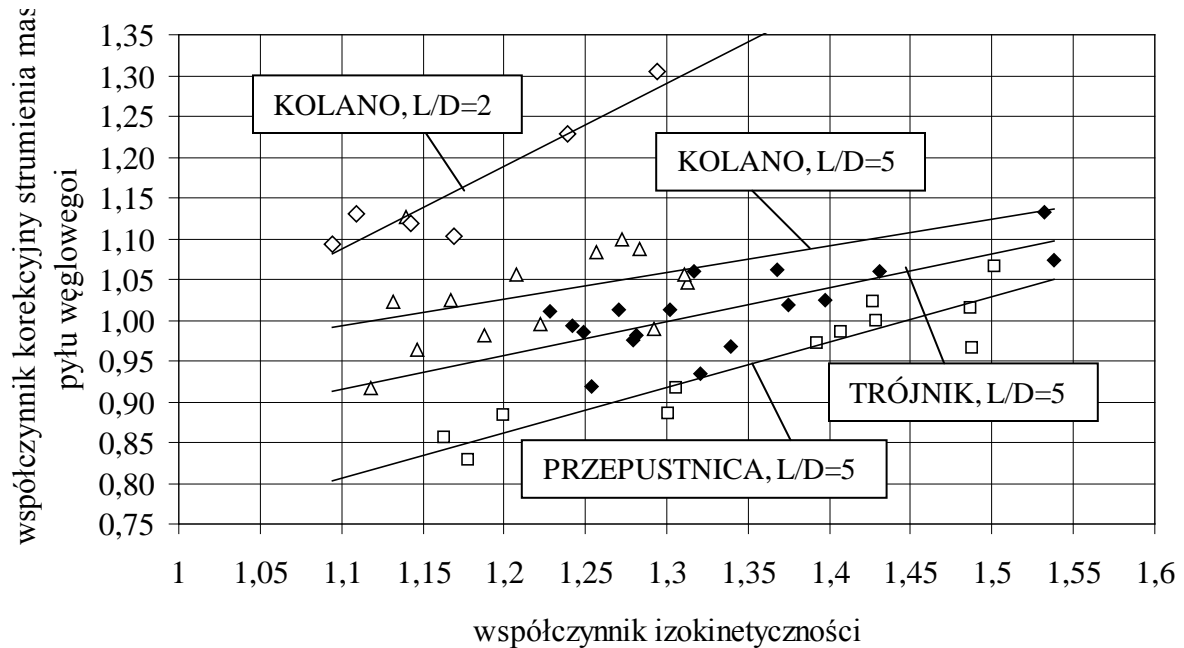
Analiza danych pomiarowych przekazanych przez jedną z elektrowni stosujących od trzech lat przyrząd EMITEST 10P wskazywała na występowanie znacznych niekiedy rozbieżności pomiędzy wartościami strumienia masy pyłu węglowego wyznaczonymi w bezpośrednim pomiarze a wartościami wynikającymi z charakterystyki podajnika młyna. W celu wyjaśnienia tego problemu przyjęto określony tok postępowania. Przede wszystkim przeprowadzono klasyfikację danych pomiarowych ze względu na rodzaj zaburzenia strugi

medium dwufazowego przed przekrojem pomiarowym (kolano, trójnik, przepustnica) i jego odległość od przekroju pomiarowego odniesioną do średnicy pyłoprzewodu. Ponadto do dalszej analizy zakwalifikowano tylko te układy sieciowe, w których wykonano co najmniej 5 pomiarów w ustabilizowanych warunkach pracy bloku energetycznego ( na przekazanych arkuszach pomiarowych znajdowały się informacje np. o zmianie paliwa lub mocy bloku w czasie wykonywania badań). W celu maksymalnego ujednoczenia warunków odniesienia, sumaryczny strumień masy gazu nośnego w analizowanych sieciach określono zgodnie normą ISO [3], tzn. w oparciu o pomiar zwężką ilości powietrza podawanego do młyna oraz bilans wilgoci, natomiast strumień masy gazu  $M_{gi}$  w poszczególnych pyłoprzewodach zasilanych z określonego młyna wyznaczano w oparciu o współczynnik rozdziału określony równaniem (5). Współczynnik korekcyjny strumienia masy pyłu węglowego  $k_{Mp}$  obliczano jako stosunek strumienia masy pyłu węglowego  $M_p$  wyznaczonego w oparciu o charakterystykę podajnika młyna do sumy strumieni masy pyłu w poszczególnych pyłoprzewodach wynikających ze zmierzonej bezpośrednio koncentracji  $Y_{zi}$

$$k_{Mp} = \frac{M_p}{\sum_{i=1}^{i=n} Y_{zi} M_{gi}}. \quad (12)$$

Współczynnik izokinetyczności  $H$  obliczano jako średnią arytmetyczną wartości określonych w poszczególnych pyłoprzewodach zgodnie z równaniem definiującym (7) przez porównanie prędkość aspiracji  $w_{ai}$  wyznaczonej z pomiaru strumienia masy gazu zaaspirowanego do przyrządu i średniej prędkości gazu w pyłoprzewodzie  $w_i$  wyznaczonej ze strumienia masy gazu  $M_{gi}$ , a więc pośrednio z pomiaru ilości powietrza podawanego do młyna.

Wyniki przeprowadzonej analizy ilustruje rys.2. Pomimo znacznego rozrzutu wartości pomiarowych ujawniają się pewne prawidłowości związane z konfiguracją geometryczną przewodu. Gdyby przyjąć, że strumień masy pyłu węglowego wyznaczony z charakterystyki podajnika młyna jest wartością rzeczywistą, to wiarygodny wynik pomiaru koncentracji pyłu za przepustnicą uwarunkowany jest współczynnikiem izokinetyczności  $H_p=1,45$ , za trójnikiem  $H_T=1,3$ , natomiast za kolaniem  $H_K=1,12$ . Wartości te określone zostały dla długości prostki spełniającej wymogi obu norm [2,3] tzn  $L/D=5$ . Zmiana odległości od elementu zaburzającego strugę także będzie bowiem wpływać na optymalną wartość współczynnika izokinetyczności . Wskazuje na to charakterystyka uzyskana dla kolana przy  $L/D = 2$ .



Rys.2 . Wpływ współczynnika izokinetyczności na wynik pomiaru strumienia masy pyłu.

Fig.2. Influence of isokinetic factor on result of pulverised coal mass flow measurement.

#### 4. PODSUMOWANIE

Zarówno rozważania teoretyczne jak i wyniki badań eksperymentalnych uzasadniają nadizokinetyczną aspirację próbki pyłowo-gazowej. Na wartość współczynnika izokinetyczności ma wpływ zarówno rodzaj zaburzenia (kolano, trójkąt, przepustnica) jak i jego odległość od przekroju pomiarowego. Pomimo orientacyjnego charakterów wyników przeprowadzonej analizy interesujący jest fakt, że dla kolana zlokalizowanego w znormalizowanej dopuszczalnej odległości od przekroju pomiarowego, wartość oszacowanego współczynnika izokinetyczności mieści się w zakresie zalecanym przez ISO  $H=1,0-1,2$ , przy czym należy podkreślić, że inne rodzaje zaburzeń strugi nie są przedmiotem zainteresowania wspomnianej normy.

Aspiracja izokinetyczna realizowana zgodnie z polską normą [2] jest faktycznie aspiracją podizokinetyczną i w efekcie prowadzi do zawyżania wyniku pomiaru koncentracji i strumienia masy pyłu oraz zniekształcenia składu granulometrycznego próbki pyłowej. Wniosek ten jest zgodny z doświadczeniami uzyskanymi w pomiarach zawartości pyłu w gazach odlotowych (m.in.[5]).

Zasygnalizowana tu pewna niejednoznaczność wyników pomiaru wykonywanego metodą grawimetryczną nie dotyczy oceny równomierności rozdziału fazy stałej i gazowej wykonanej zgodnie z równaniami (5) i (6).

Doświadczenia Autorów wskazują, że pomimo upowszechniania się automatycznych systemów kontroli przemiału i dystrybucji paliwa działających metodą „in situ”, ekstrakcyjna metoda grawimetryczna jest powszechnie stosowana. Stanowi ona m.in. bardzo użyteczne narzędzie pomiarowe w fazie prób i badań nowych technik niskoemisyjnego spalania. Może być również przydatna w ocenie pracy sieci transportu pneumatycznego innych materiałów sypkich. Są to istotne względy przemawiające za podjęciem systematycznych badań, których wyniki umożliwią uściślenie warunków aspiracji i zwiększą dokładność tej metody pomiaru.

## LITERATURA

- [1] Yong Yan, Reed A.: On-line measurement of mass flow rate and particle size of pneumatically conveyed pulverised coal, 4<sup>th</sup> International Conference on Measurement and Control of Granular Materials (MCGM'97), 17-19.09.1997, Chiny
- [2] PN-91/M.-34131:1991: Energia cieplna. Instalacje młynowe. Pobieranie próbek pyłu.
- [3] ISO 9931: 1991: Coal –Sampling of pulverized coal conveyed by gases in direct fired coal systems.
- [4] Przyrząd EMITEST 10P97 do pobierania próbek i pomiaru strumienia masy pyłu węglowego w przewodach. Instrukcja obsługi. ZBW „ENERGOTEST”, Wrocław 1999
- [5] Bohnet M.:Particulate Sampling, Air Pollution Control, part III, 1978

## CONCENTRATION AND MASS FLOW RATE MEASUREMENT OF PULVERIZED COAL IN FIRED COAL SYSTEMS

This paper presents a gravimetric method for the measurement of concentration and mass flow rate of pulverized coal. This method may be also used for measurement of the other loose materials pneumatically conveyed. Industrial research showed an influence of pipe geometric configuration on sampling conditions.