

OPTYCZNE SYSTEMY POMIARU ZAPYLENIA SPALIN KOTŁOWYCH

Artur BŁASZCZUK, Wojciech NOWAK, Dominika LIS
Wydział Inżynierii i Ochrony Środowiska, Politechnika Częstochowska
ul. Dąbrowskiego 73, 42-200 Częstochowa
ablaszczuk@is.pcz.czest.pl, wnowak@is.pcz.czest.pl

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z pomiarami koncentracji pyłu stosowanymi w energetyce, z wykorzystaniem optycznych systemów pomiarowych, w szczególności pyłomierzy optycznych. Omówione zostały również tendencje rozwoju optycznych systemów pomiarowych, które aktualnie wykorzystywane mogą być w pomiarach koncentracji pyłu w gazach spalinowych. Szczegółowo została opisana budowa i zasada działania pyłomierzy na wybranych przykładach, z wyjaśnieniem zasady pomiaru światła rozproszonego podczas dwukrotnego trawersowania przestrzeni pomiarowej kanału spalinowego. Główną uwagę poświęcono również problemom towarzyszącym pomiarom koncentracji pyłu w spalinach kotłowych, z jednoczesnym wskazaniem źródeł błędów, na jakie należy zwracać szczególną uwagę podczas przeprowadzania pomiarów na obiekcie rzeczywistym.

1. Wprowadzenie

Energetyka zawodowa wykorzystuje optyczne systemy pomiarowe nie tylko do monitoringu koncentracji pyłu w gazach spalinowych ale i również w celu otrzymania informacji na temat ilościowego oraz jakościowego składu spalin. Pomiary *in-situ* stężenia pyłu w gazach spalinowych realizowane są w głównej mierze pyłomierzami optycznymi. Zasada pomiaru pyłomierzami optycznymi oparta jest na prawie fizycznym Lamberta-Beer'a (1), które opisuje pochłanianie promieniowania elektromagnetycznego, przy przechodzeniu przez ośrodek niejednorodny optycznie. Podczas pomiaru zapylenia ośrodka poprzez prześwietlanie objętości kontrolnej monochromatyczną wiązką należy uwzględnić występowanie następujących zjawisk: załamanie wiązki na ziarnach pyłu o nieregularnych kształtach, rozproszenie wiązki światła oraz jej odbicie. Wpływ na stopień atenuacji światła (tj. absorpcji oraz rozproszenia) w ośrodku dwufazowym mają własności optyczne materii absorbującej światło oraz ilość tej materii. Pierwszy czynnik jest opisywany za pomocą współczynnika absorpcji, natomiast ilość materii – koncentracją cząstek pyłu w objętości pomiarowej. Bezpośredni wpływ na stopień atenuacji ma również droga optyczna, jaką przebywa wiązka światła. Im dłuższa będzie droga optyczna wiązki pomiarowej tym proporcjonalnie więcej światła zostanie pochłonięte. Zależność natężenia światła przechodzącego przez ośrodek zapyłony od jego grubości ma charakter funkcji wykładniczej i wyrażana jest następującym równaniem:

$$I(x) = I_o \cdot e^{(-k \cdot c \cdot L)} \quad (1)$$

gdzie: $I(x)$ [W/m^2] jest natężeniem wiązki światła po przejściu przez ośrodek o grubości x [m]; I_o [W/m^2] – natężenie światła padającego na ośrodek; k [m^2] – współczynnik absorpcji zależny od rodzaju pyłu oraz optyki przyrządu pomiarowego (dla pyłu powstałego w wyniku spalania węgla kamiennego w kotle pyłowym bez instalacji odsiarczania $k = 2500$); L [m] reprezentuje długość drogi optycznej wiązki światła w ośrodku pomiarowym; e jest tzw.

podstawą logarytmu naturalnego ($e \approx 2,718$), natomiast c [m^{-3}] reprezentuje koncentracje pyłu w woluminie pomiarowym. Powyższe równanie (1) można wyrazić w prostszej postaci [1]:

$$c = (k \cdot E) / L \quad (2)$$

w której bezwymiarowa wielkość E jest ekstynkcją (tj. absorbcją) opisującą osłabienie strumienia światła monochromatycznego, w wyniku przejścia przez ośrodek niejednorodny optycznie ($E = \log(I/I_0)$). Stopień osłabienia wiązki światła zależy jest również od rozmiaru cząstek pyłu oraz od długości fali światła trawersującej przekrój pomiarowy. Fale świetlne w zakresie widzialnym nie są absorbowane przez pozostałe składniki gazów spalinowych, jak np. NO_2 , CO_2 czy H_2O . W przypadku wprowadzania długości fali świetlnej bliskiej pasmu absorpcji molekuł danego gazu, ma miejsce zjawisko anormalnego załamania (dla NO_2 spodziewać się można tego zjawiska przy prześwietlaniu ośrodka falą świetlną o długości $0,740 \mu\text{m}$) [2]. W celu wyznaczenia współczynnika k na drodze empirycznej przeprowadza się w praktyce porównanie wskazań ekstynkcji, mierzonej przez pyłomierz optyczny, z wynikiem pomiaru gravimetrycznego.

2. Pyłomierze optyczne

W monitoringu zapylenia spalin kotłowych najczęściej wykorzystywane są pyłomierze ekstynkcyjne [3, 4], których zasada działania oparta jest na metodzie podwójnego przejścia wiązki przez wolumin pomiarowy (tj. transmisja optyczna). Światło wysłane przez diodę LED wychodzi z głowicy pomiarowej, następnie trafia do kanału, gdzie jego intensywność spada w wyniku pochłaniania i odbicia części sygnału od cząstek pyłu, odbija się od reflektora i wraca w konsekwencji do głowicy pomiarowej. Osłabienie natężenia światła zależne jest od koncentracji pyłu w kanale. W celu zapewnienia poprawnego działania tego typu pyłomierzy, układ optyczny utrzymywany jest w ciągłej czystości, poprzez stały nadmuch powietrza. Wśród pyłomierzy ekstynkcyjnych (transmisyjnych), pod względem rozmieszczenia źródła koherentnej fali świetlnej oraz samego układu pomiarowego możemy wyróżnić trzy rozwiązania konstrukcyjne [1]: (1) nadajnik ze źródłem światła zainstalowany jest po jednej stronie kanału, z kolei odbiornik po przeciwnej stronie kanału, np. pyłomierz D-R 290; (2) nadajniki i odbiornik zainstalowane są razem po jednej stronie kanału, natomiast po przeciwnej stronie kanału zainstalowany jest reflektor (tj. głowica z lustrem), np. pyłomierz D-R 281; (3) nadajnik oraz odbiornik zainstalowane są po obu stronach kanału, np. pyłomierz Codel 200t.

Główną podstawową zaletą pyłomierzy ekstynkcyjnych jest szeroki zakres pomiarowy mieszczący się od kilku mg/m^3 do kilku g/m^3 , który umożliwia pracę układu pomiarowego nawet w trakcie występowania okresowych awarii układów odpylania spalin. Ponadto nie należy zapominać, iż pewne ograniczenie w tego typu pyłomierzach stanowi również długość drogi optycznej, jaką przebywa wiązka pomiarowa podczas pomiaru koncentracji pyłu w spalinach. Nie powinna ona być większa niż 8-10 m oraz nie krótsza niż 0,5 m [5]. Nie bez znaczenia pozostaje również wpływ temperatury gazów spalinowych, która nie powinna być większa niż 300°C .

W odróżnieniu od pyłomierzy ekstynkcyjnych, pyłomierze pracujące na zasadzie rozproszenia światła od cząstek pyłu charakteryzują się wysoką rozdzielczością pomiaru. Umożliwiają one pomiar stężenia pyłu w zakresie od $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ do ponad $100 \text{ mg}/\text{m}^3$, nie mniej jednak mogą pracować jedynie podczas prawidłowo działających układów odpylania spalin (tj. brak możliwości pomiaru przy wysokich stężeniach pyłu). Pomiar w tego typu pyłomierzach odbywa się za pośrednictwem modulowanej wiązki światła, emitowanej pod

kątem 30° (pyłomierz D-R 300) lub 60° (pyłomierz FWE 200) w przekroju pomiarowym, która oświetla cząstki pyłu w spalinach. Oświetlone cząstki pyłu w przekroju pomiarowym odbijają światło. Odbite rozproszone światło jest zbierane przez odbiornik i kierowane do kolektora optycznego. Stosunek intensywności światła rozproszonego do intensywności światła porównawczego jest równe koncentracji pyłu w rozpatrywanym przekroju pomiarowym. Istotną wadą pyłomierzy działających na zasadzie rozproszenia światła jest przede wszystkim prowadzenie pomiaru stężenia pyłu w bardzo wąskim obszarze strumienia spalin, bo jedynie w strefie przyściennej kanału (tj. w odległości od 150 mm do 300 mm). Z uwagi na wąski obszar prześwietlania strumienia spalin należy zwrócić szczególną uwagę podczas interpretacji otrzymanych wyników pomiarów. W szczególności dotyczy to pomiarów wykonywanych w kanałach, w których na wskutek drgań mogą występować oberwania osadów pyłowych, zgromadzonych na ściankach kanału.

3. Warunki i metodyka pomiarów

Pomiar koncentracji pyłu w spalinach został przeprowadzony metodą grawimetryczną, przy zachowaniu warunku izokinetyczności poboru próbki gazu. Porty pomiarowe, wykorzystane podczas pomiarów, zlokalizowane były za wentylatorem ciągu spalin. Gabaryty kanału spalinowego wynosiły odpowiednio: 1950×3150 mm. Kanał spalinowy wyposażony był w 6 króćców pomiarowych, przy czym pomiar stężenia pyłu w gazach spalinowych został przeprowadzony w króćcach nr 2, 3, 4 i 5. W króćcach skrajnych (tj. nr 1 oraz nr 6) nie został przeprowadzony pomiar porównawczy stężenia pyłu pyłomierzem EMIOTEST 2598, z uwagi na brak zachowania ujednoczonych warunków przepływowych. W celu oceny poprawności wprowadzonej charakterystyki prądowej pyłomierza optycznego wykonano pomiar metodą grawimetryczną stężenia pyłu w czterech osiach pomiarowych, przy czym na każdej osi znajdowały się po 4 punkty pomiarowe, będące środkami ciężkości elementarnych powierzchni równoważnych przekroju pomiarowego kanału. Dla kanału zostały wykonane po 2 serie pomiarowe, zgodnie z normą [6]. W trakcie przeprowadzania kolejnych serii pomiarowych utrzymywano na stałym poziomie wydajność kotła oraz ustawienia aparatów kierujących wentylatory podmuchu i ciągu.

4. Wyniki pomiarów

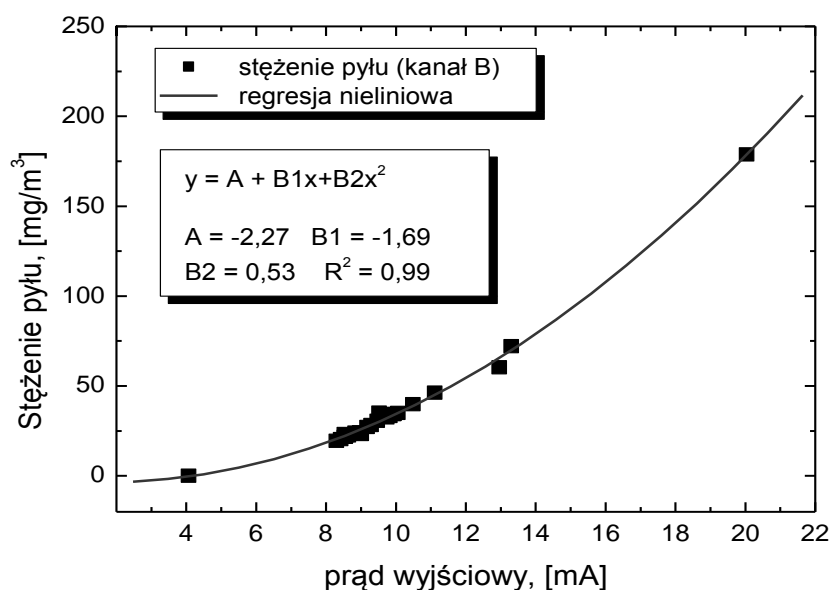
Na podstawie wykonanego pomiaru porównawczego metodą grawimetryczną została przeprowadzona analiza porównawcza uśrednionych wartości stężeń pyłu dla warunków umownych spalin suchych. Otrzymano następujące wartości błędu pomiarowego (tabela 1).

Tabela 1. Analiza porównawcza wartości stężeń pyłu w kanale B.

Nr serii pomiarowej	Stężenie pyłu [mg/m ³]		Względny błąd
	EMIOTEST	Pyłomierz optyczny	
1	35,8	34,2	4,5%
2	48,5	50,6	4,3%

Rozbieżności w wartościach stężeń pyłu w spalinach, zarejestrowane za pomocą pyłomierzy optycznych oraz pyłomierzem grawimetrycznym EMIOTEST, wynikały z okresowego obrywania się nawisów osadów pyłowych, wskutek przenoszonych drgań z wentylatora ciągu spalin na kanały spalinowe oraz z grubości warstwy pyłu (5÷10 cm), zlokalizowanej na ściankach kanału, która mogła stanowić wtórne źródło zapylenia. Z uwagi na to, iż prąd wyjściowy pyłomierza optycznego nie jest liniowo zależny od ekstynkcji, stężenie pyłu w

funkcji prądu wyjściowego zostało wyznaczone na podstawie pomiarów (pyłomierz EMIOTEST + pyłomierz optyczny), za pomocą funkcji regresji drugiego stopnia. Otrzymana funkcja zależności prądu wyjściowego pyłomierza i stężenia pyłu została zamieszczona na rys. 1.



Rys. 1. Charakterystyka prądowa pyłomierza zainstalowanego na kanale B

5. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę uzyskane wartości błędu pomiarowego stężenia zapylenia spalin można stwierdzić, iż pomiar realizowany za pomocą zainstalowanego pyłomierza optycznego przeprowadzony był w sposób prawidłowy. Na podstawie przedstawionej charakterystyki pyłomierza można zaobserwować, iż dla najmniejszej koncentracji pyłu w spalinach, zarejestrowany wyjściowy prąd na pyłomierzu miał wartość bliską 4 mA, z kolei przy wysokich stężeniach pyłu wartości prądu wyjściowego znajdowały się na poziomie 20 mA.

Układ pomiarowy pyłomierza optycznego zainstalowany na kanale reagował w sposób prawidłowy na zmianę koncentracji pyłu w spalinach.

Literatura

1. Filipowski K.: Monitoring zanieczyszczeń pyłowych za wysokosprawnymi urządzeniami odpylającymi w świetle obowiązujących przepisów, 2006.
2. Błaszczuk A.: Optyczne techniki pomiarowe w analizie propagacji zanieczyszczeń gazowych. Ochrona powietrza i problemy odpadów, 2004, vol. 38, 83-91.
3. FWE 200 Urządzenia do pomiaru zawartości zapylenia w mokrych gazach – materiały firmy SICK.
4. Opacity Meter and/or Dust Concentration Monitor – materiały firmy DURAG
5. Red. Namieśnik J., Chrzanowski W., Szpinek P.: Nowe horyzonty i wyzwania w analityce i monitoringu środowiskowym. Centrum Doskonałości Analityki i Monitoringu Środowiskowego (CEEAM), Wydział Chemiczny, Politechnika Gdańska.
6. PN-Z/04030-7:1994 „Badanie zawartości pyłu. Pomiar stężenia i strumienia masy pyłu w gazach odlotowych metodą grawimetryczną”.