Analizator AWP2/3 do ciągłego pomiaru ilości węgla w energetycznych popiołach lotnych - przykłady i perspektywy zastosowań -

Janusz GOŁAŚ¹, Henryk JANKOWSKI¹, Bogdan NIEWCZAS², Janusz PIECHNA³, Antoni SKIBA⁴, Stanisław SZCZĘŚNIAK², Wojciech SZKUTNIK⁴ Zbigniew SZKUTNIK¹, Ryszarda WARTAK⁴, Cezary WOREK¹

 Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
 ⁽²⁾Zakład Aparatury Pomiarowej "Kwant", ul.Słomiana 17, 30-316 Kraków,
 ⁽³⁾Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa, ul. Nowowiejska 24, 00-665 Warszawa,
 ⁽⁴⁾Elektrociepłownia "Będzin" S.A., ul. Małobądzka 141, 42-500 Będzin,

Wstęp

Wytwarzanie odpadowych popiołów lotnych jest nieuniknionym skutkiem produkcji energii elektrycznej w węglowych elektrowniach cieplnych. Ilustruje to rys.1 na którym przedstawiono charakterystyczne cechy paliwa węglowego na tle innych paliw [12].

Węglowe elektrownie cieplne dominują w systemach energetycznych wielu krajów, a ich rola praktycznie jest ustabilizowana w gospodarce światowej. Dlatego kontrola pozostałości niespalonego węgla w popiołach jest stale aktualnym zagadnieniem eksploatacyjnym ze względu na optymalizację procesu spalania i ochronę środowiska [4,6,19,20,22,23]. Jednocześnie w dyspozycji przemysłowej pozostaje odpadowy popiół lotny i dalsze wykorzystanie tego tworzywa mineralnego może być uzależnione od jego własności fizykochemicznych. Zawartość niespalonego węgla jest istotnym parametrem przy dalszym przetwarzaniu popiołu na materiały budowlane (np.cement) [4,15] i wykorzystaniu jako adsorbenty substancji toksycznych [4,20]. Tak więc proces technologiczny w elektrowni ukierunkowuje się nie tylko na optymalizację wytwarzania energii elektrycznej, ale również na produkcję pełnowartościowego tworzywa mineralnego (popiołu). Tym samym elektrownie dążą do uzyskania urządzeń kontrolno-pomiarowych do ciągłego określania zawartości niespalonego węgla w popiele lotnym podczas pracy kotła energetycznego.

W powszechnie stosowanej metodzie laboratoryjnej określa się bezpośrednio masę węgla w popiele (metoda loss-on-ignition/LOI) [10]. Natomiast w systemach ciągłego pomiaru zawartości węgla wykorzystuje się szereg zjawisk fizycznych umożliwiających wyznaczanie tego parametru pośrednio, przy czym pomiar może być wykonywany z znaczną częstotliwością, co ma znaczenie w automatycznym sterowaniu. Przemysłowe zastosowanie znalazły następujące metody [11]: (1) absorpcja mikrofal; (2) metoda pomiaru pojemności elektrycznej; (3) emisja w zakresie podczerwieni (określanie ilości węgla dopalającego się w komorze temperaturowej); (4) optyczna technika odbicia rozproszonego. W pracy przedstawiono system pomiarowy ciągłego oznaczania węgla resztkowego w procesie produkcyjnym elektrowni, do konstrukcji którego wykorzystano technikę optycznego odbicia rozproszonego. Szerzej omówiono elektroniczny zespół pomiarowy i konstrukcję



Rys.1. Porównanie charakterystycznych parametrów paliw: A - zawartość popiołu; W_r - wartość opałowa; sp - substancja palna; cl - zawartość części lotnych; *1* - olej opałowy; *2* - antracyt; *3* - węgiel kamienny; 4 - węgiel brunatny; *5* - łupki palne; *6* - torf; *7* - drewno.

monochromatycznego fotometru przemysłowego. Opracowane urządzenia pracują w Elektrowniach Skawina, Jaworzno i Będzin.

Metoda pomiaru

Spektrofotometria w szerokim zakresie długości fal światła jest szeroko stosowana do pomiarów składu substancji w zautomatyzowanych urządzeniach analitycznych [3,4,17]. Dla nieprzeźroczystych ciał stałych informacje analityczne uzyskuje się techniką odbicia rozproszonego. Promieniowanie *a* (rys.2,3) padając na powierzchnię próbki *e* może ulec odbiciu zwierciadlanemu *c* oraz przechodząc w głąb analizowanego materiału po szeregu procesach absorpcji i odbicia ponownie osiągnąć jego powierzchnię, i zostać wypromieniowane we wszystkich kierunkach (odbicie rozproszone *d*). Rozproszone światło kierowane jest do odpowiednio usytuowanego detektora, na przykład w geometrii 45° [3,24].

Natężenie światła rejestrowane przez detektor jest funkcją stężenia oznaczanej substancji w badanej próbce. Dla modelowej substancji niejednorodnej optycznie np. białej farby z cząstkami pigmentu, oświetlonej monochromatycznym światłem dyfuzyjnym



Rys.2. Schemat zjawiska rozpraszania światła. Detektor usytuowany w geometrii 45° [24].



Rys.3. Układ do badania rozpraszania światła przy geometrii 45° [24].

zależność tę określili Kubelka i Munk [9] podając wyrażenie na albedo *H* powierzchni próbki, które przy założeniu, że próbka jest nieskończenie gruba przyjmuje postać:

$$H_{\infty} = \frac{J}{I} = 1 + \frac{s}{r} - \sqrt{\frac{s^2}{r^2} + 2\frac{s}{r}}$$

gdzie

I - natężenie światła padającego na powierzchnię próbki,

J - natężenie światła ulegającego odbiciu rozproszonemu,

s - stała absorpcji, oraz r stała rozpraszania charakterystyczne dla danego materiału.

Stosunek *s/r* odzwierciedla [5,9,24] stężenie danej substancji w próbce, a przebieg zależności $H_{\infty}(s/r)$ przedstawiono na rys.4. Ponieważ znaczne zmiany H(s/r) zachodzą przy małych *s/r* technika rozproszonego odbicia jest szczególnie przydatna przy oznaczaniu substancji o niewielkim stężeniu, i z taką sytuacją spotykamy się oznaczając węgiel resztkowy (w postaci niewielkich cząstek) w popiele, który jest mieszaniną kilkunastu minerałów (głównie: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃). Przewidywana znaczna dokładność metody w



Rys.4. Zależność albedo $H_{\infty}(s/r)$ dla substancji niejednorodnej optycznie (s - stała absorpcji, r - stała rozpraszania) przy oświetleniu monochromatycznym [6].



Rys.5. Przebieg $R(\lambda)$ całkowitego odbicia światła (λ : 250 - 2500nm) od próbek odpadowego popiołu lotnego dla różnych zawartości węgla (wziernik z szkła FLOAT) [16].

obszarze 0-10wg.% węgla w popiele odpowiada wymaganiom technologicznym elektrowni.

Przy doborze długości fali λ monochromatycznego źródła światła należy uwzględnić złożony chemicznie skład popiołu i możliwość wpływu skomplikowanej struktury widma optycznego na sygnał pomiarowy [5]. Na rys.5. przedstawiono zależności względnego natężenia światła odbitego R(λ) zmierzone w zakresie λ : 250-2500nm dla próbek otrzymanych z popiołu o różnej zawartości węgla.

Próbki preparowano laboratoryjnie i umieszczano w kuwetach z typowego szkła FLOAT. Pomiary wykonano spektrofotometrem Λ -19 Perkin-Elmer w geometrii kuli Ulbrichta przy wykorzystaniu wzorca aparaturowego Standard SRS/HRF. Przebiegi reprezentują typowe zachowanie się sygnału światła odbitego dla tego typu materiałów. W obszarze ultrafioletu i częściowo w obszarze widzialnym (250-500nm) można zaobserwować rozległą krawędź absorpcji. Jej kształt można wiązać z faktem, że popiół jest mieszaniną wielu minerałów oraz wpływem materiału wziernika (kuwety). W obszarze długofalowym spektrum widzialnego i bliskiej podczerwieni (650-1500nm) dla próbek o danej zawartości węgla intensywność światła odbitego (R) praktycznie utrzymuje się na niezmiennym poziomie natomiast wielkość sygnału (R) zależy od zawartości węgla w poszczególnych próbkach. Ze wzrastającymi λ sygnał ulega zaszumieniu. Wynikający z pomiarów przedział pracy źródła światła λ : 750-1500nm (rys.5) obejmuje zakresy pracy światłowodów telekomunikacyjnych i stwarza bardzo szerokie możliwości doboru półprzewodnikowych optoelektronicznych emiterów i detektorów światła.

Spektrofotometry laboratoryjne są rozbudowanymi urządzeniami analitycznymi przeznaczonymi do pracy w przyjaznych warunkach zewnętrznych, a do techniki odbicia rozproszonego stosuje się specjalną geometrię pomiaru (sfery pomiarowe). Budując urządzenia instalowane na linii produkcyjnej dogodnie jest stosować punktowe źródła światła (diody elektroluminiscencyjne i laserowe) i detektory (fotodiody) rozmieszczone w geometrii 45° (rys.3). Zasadniczym jednak problemem jest uzyskanie kontrolowanego kontaktu optycznego z badaną substancją i zapewnienie stabilnej pracy układów optoelektronicznych.

Przemysłowy system pomiarowy (analizator) przeznaczony do oznaczania ilości węgla w pyle gazów spalinowych (popiele) składać się zatem będzie z zespołu pobierania próbek popiołu, zespołu pomiarów optycznych, jednostki nadzorczej i opracowania danych oraz urządzeń pomocniczych.

Głowica pomiarowa do pomiarów optycznych

Budowa układu optycznego fotometru

Przyjęto założenie, że popiół do badań optycznych będzie skutecznie za pomocą cyklonu oddzielany od gazów spalinowych i zbierany w komorze osadczej z płaskim szklanym wziernikiem umożliwiającym kontakt optyczny z układem fotometru o geometrii 45°, i umiejscowionym w głowicy pomiarowej. Zastosowanie płaskiego wziernika umożliwiło testowanie dwu wersji układów optycznych fotometru: w układzie z detektorem umieszczonym zenitowo i dwoma emiterani światła (rys.6) oraz w układzie z emiterem umieszczonym zenitowo i czterema detektorami (rys.7). W układzie zenitowego oświetlenia (rys.7) część strumienia światła z emitera poprzez dzielnik wyprowadzona jest na dodatkowy detektor (sygnał referencji optycznej).

Elementy optoelektroniczne i schemat blokowy układu elektronicznego

Zastosowano wysokowydajne diody elektroluminiscencyjne i fotodiody detekcyjne [7], które sa nowoczesnymi elementami półprzewodnikowymi. Emitery charakteryzują się znaczną mocą wytwarzanego promieniowania, a także zawierają zintegrowany fotoelement (monitor) służący jako źródło odniesienia referencji optoelektronicznej do stabilizacji natężenia światła. Pozwala to konstruować wieloemiterowe stabilne układy optoelektroniczne [21]. Schemat blokowy układu elektronicznego głowicy pomiarowej przedstawiono na rys.8. Sygnał świetlny, oświetlający badaną próbkę wytwarzany jest przez emiter - diodę LED mającą swoje maksimum charakterystyki widmowej w bliskiej podczerwieni (ok. 880nm). Po zasileniu jej sygnałem zmiennym poprzez moduły drajwera i modulatora otrzymujemy strumień świetlny o natężeniu będącym liniową funkcją sygnału modulującego. Po oświetleniu próbki część odbitego strumienia świetlnego dociera do diod detekcyjnych sygnału. W zależności od ustawień multipleksera analogowego do toru pomiarowego może być podawany sygnał z diody detekcyjnej referencji optycznej. Wzmacniacz dopasowuje sygnał z diod detekcyjnych do odpowiednich poziomów a filtr górnoprzepustowy oddziela składową stałą od składowej zmiennej. Detektor synchroniczny wraz z filtrem dolnoprzepustowym zamienia sygnał zmienny na sygnał stały, który jest podawany na multiplekser analogowy. Multiplekser analogowy rozdziela sygnały detektorów oraz sygnały z czujnika temperatury oświetlacza oraz czujnika temperatury przedziału elektroniki. Przetwornik A/D przetwarza sygnał analogowy podawany przez multiplekser na postać cyfrową, która jest odczytywana i zapisywana w pamięci mikrokontrolera. Nadrzędny komputer sterujący całym systemem pomiarowym poprzez optoizolowane łącze RS485 nadzoruje pracę głowicy pomiarowej i pobiera wyniki do dalszej obróbki. Temperatura elementów optoelektroniczych głowicy pomiarowej jest stabilizowana przy pomocy pompy Peltiera, dla której sygnały sterujące wytwarza regulator, a zasilacz sterowany dostarcza odpowiednich napięć/pradów.



Rys.6. Schemat pomiarowy fotometru (geometria 45°) do pomiaru optycznego odbicia rozproszonego z zenitowo umieszczonym detektorem. Rys.7. Schemat pomiarowy fotometru (geometria 45°) do pomiaru optycznego odbicia rozproszonego z zenitowo umieszczonym emiterem.

Układ optomechaniczny głowicy pomiarowej

Fotometr stabilnie związany z korpusem głowicy pomiarowej stanowi zespół optomechaniczny zapewniający podłączenie do komory osadczej popiołu i uzyskanie poprzez wziernik kontaktu optycznego z próbką popiołu. Ponieważ gorący popiół pobierany jest bezpośrednio z procesu produkcyjnego zespół optomechaniczny głowicy pomiarowej powinien zapewnić stabilizację termiczną układu optycznego fotometru i podzespołów elektronicznych głowicy pomiarowej dla wszystkich sytuacji występujących podczas eksploatacji urządzenia [25]. Uzyskano to poprzez kontrolę rozpływu ciepła w wykonanej z metalu obudowie głowicy pomiarowej (rys.9).

W szczególności (rys.9) stabilizację termiczną układu optycznego fotometru (1) zapewnia jego zamocowanie poprzez złącze Peltiera (2) do aktywnego termicznie radiatora (3). Kontrolę temperatury radiatora (3) realizuje połączony z nim cieplnie, wyposażony w grzałkę (6) rurowy przenośnik ciepła (7). Otacza on jednocześnie zasobnik (4) z blokiem elektroniki pomiarowej, co umożliwia stabilizację temperatury pracy tego podzespołu.

Przedstawione rozwiązanie zapewnia kontrolę i stabilizację termiczną głowicy pomiarowej zarówno w warunkach ciągłego pomiaru (dopływ ciepła od gorącego popiołu) jak również po odłączeniu głowicy od zespołu pobierania próbek (serwis i wprowadzanie korekty) w szerokim zakresie temperatur otoczenia (-25/+40°C).

Zespół pobierania próbek popiołu lotnego

Zespół izokinetycznego pobierania próbek (rys.9) posiada cyklon (10), połączony przez styczny kanał wlotowy (11) i centralny kanał wylotowy (12) z kanałem emisyjnym (18)

zapylonego popiołem gazu. Podczas przepływu gazu przez cyklon (10) następuje oddzielenie cząstek popiołu, które poprzez stożek osypowy (13) przemieszczają się do komory osadczej (14). Dno komory osadczej stanowi wziernik (8) głowicy pomiarowej (rys.8). Dno komory osadczej pochylone jest względem poziomu pod kątem α (rys.8). Do komory osadczej doprowadzona jest dysza czyszcząca (15) połączona przez elektromagnetyczny zawór odcinający (16) ze stacją przygotowania sprężonego powietrza (17), które jest oczyszczane i odpowiednio podgrzewane.

Konstrukcja zapewnia cykliczne (np. co 5 min) pobieranie próbek popiołu z kanału emisyjnego (spalinowego). Po dokonaniu pomiaru, popiół za pomocą sprężonego powietrza usuwany jest z powrotem do kanału emisyjnego i następuje czyszczenie wziernika, po czym w komorze osadczej gromadzona jest kolejna próbka. Rozwiązanie (rys.10) przewiduje także umieszczenie ponad komorą osadczą specjalizowanego zaworu , który umożliwia obsłudze pobieranie popiołu do analizy laboratoryjnej.

Realizację procesu pomiaru i pracę głowicy pomiarowej, zespołu pobierania próbek oraz urządzeń pomocniczych (rys.15) zapewnia blok automatyki przemysłowej (urządzenia te są zainstalowane na kanale emisyjnym – co przedstawiono na załączonych fotografiach), jak również jednostka nadzorcza analizatora popiołu znajdująca się w sterowni bloku energetycznego.

Odpowiedni zasób doświadczeń uzyskany w trakcie kolejnych uruchomień i eksploatacji szeregu wersji przedstawianego analizatora pozwolił ZAP "Kwant" uruchomić produkcję systemu AWP2/3 umożliwiającego prowadzenie ciągłego pomiaru na trzech kanałach emisyjnych (rys.15 oraz fotografie). Jednocześnie przyrząd umożliwia bardzo



Rys.8. Schemat blokowy układów elektronicznych głowicy.



Rys.9. Optyczna głowica pomiarowa (B) i zespół pobierania próbek popiołu (A) z kanału emisyjnego elektrowni cieplnej oraz blok automatyki przemysłowej (C):
(1) - fotometr; (2) - złącze Peltiera; (3) - radiator; (4) - zasobnik elektroniki;
(5) - powietrzna szczelina izolacyjna; (6) - grzałka; (7) - rurowy przenośnik ciepła;
(8) - opornik cieplny; (9) – wziernik; (10) - cyklon; (11) - styczny kanał wlotowy;
(12) - centralny kanał wylotowy; (13) - stożek osypowy; (14) - komora osadcza;
(15) - dysza czyszcząca; (16) zawór elektromagnetyczny; (17) - stacja przygotowania powietrza; (18) - kanał emisyjny.

wygodny dostęp do próbek popiołu, które mogą być dostarczane do laboratorium zakładowego.

Jednostka nadzorcza analizatora popiołu i oprogramowanie [18]

Zadaniem jednostki nadzorczej jest kontrolowanie i sterowanie podstawowymi zadaniami wykonywanych przez system pomiarowy tj.:

- procesem zbierania i usuwania próbek
- procesem czyszczenia powietrzem komory pomiarowej

- stabilizacją temperatury głowicy i układu pobierania próbek
- procesem pomiaru optycznego
- obliczaniem zawartości węgla w popiele
- sygnalizowaniem stanów awaryjnych
- archiwizacją i transmisją danych pomiarowych

Wykonany zespół nadzorczy zamontowany jest w metalowej szafie przystosowanej do zainstalowania w sterowni bloku energetycznego(fotografie). Podstawowymi zespołami są: komputer przemysłowy (IBM PC), monitor monochromatyczny, klawiatura przemysłowa, podzespoły automatyki i zasilacze.

Opracowany program może sterować pracą trzech głowic pomiarowych zamontowanych na różnych kanałach odprowadzających spaliny. Zapewnia komunikację z użytkownikiem i obsługuje lokalną bazę danych. Uwzględniono specyficzne cechy pomiaru optycznego wprowadzając szereg funkcji, np.:

- wzorcowanie wprowadzające poprawki na zmiany w optyce układu (np. zmatowienie wziernika)
- cechowanie według odpowiednich wzorców,
- korekcję dostosowującą algorytm obliczeniowy do rodzaju spalanego węgla

Dodatkowo oprogramowanie zapewnia serwisowe monitorowanie sygnałów głowicy pomiarowej.



Rys.10. Analizator węgla w popiele - schemat funkcjonalny

Ocena pracy układu fotometrycznego

Diody elektroluminiscencyjne i fotodiody są szybkimi i niezawodnymi elementami optoelektronicznymi mogącymi pracować w różnych warunkach. Jednak, aby uzyskać dobre własności metrologiczne układu optoelektronicznego należy uwzględnić wpływ temperatury elementów na sygnał pomiarowy [2]. W warunkach laboratoryjnych mierzono sygnał (*I*) uzyskany z detektora fotometru (rys.6) głowicy pomiarowej rejestrowany z optycznego wzorca białego. Na rys.9 przedstawiono względną zmianę sygnału $\delta I/I_{tp}$ w zależności od temperatury fotometru (I_{tp} - sygnał przy temperaturze fotometru 34°C). Wpływ temperatury jest bardzo wyraźny. Natomiast liniowy charakter tej zależności pozwala łatwo wprowadzić programową poprawkę.

Przemysłowe zastosowanie analizatora prowadzi do podjęcia zagadnienia oceny stabilności pracy urządzenia w długoterminowych sesjach pomiarowych. Przeprowadzono wielodniowe obserwacje dryftu sygnału pomiarowego uzyskiwanego z głowicy pomiarowej (rys.9) dla dwóch rozwiązań układu optycznego fotometru (rys.6 i rys.7), a tym samym dwóch sposobów uzyskiwania sygnału pomiarowego (przy referencji optoelektronicznej i optycznej). Pomiary przeprowadzono w laboratorium umieszczając na wzierniku optyczny wzorzec biały. Regulację temperatury fotometru (45±0.05 °C) zapewniały podzespoły



Rys.11. Względna zmiana sygnału $\delta l/I_{tp}$ w zależności od temperatury fotometru $(I_{tp}$ - sygnał przy temperaturze fotometru 34°C).



Rys.12. Względna zmiana sygnału $\delta I/I_o$ w zależności od czasu trwania pomiaru $(I_o - sygnał zmierzony na początku pomiarów) dla głowicy z zenitowo umieszczonym detektorem (układowo wykorzystywany jest sygnał uzyskiwany z obwodów optoelektronicznych emitera i detektora tzw. referencja optoelektroniczna).$



Rys.13. Względna zmiana sygnału $\delta I/I_o$ w zależności od czasu trwania pomiaru (I_o - sygnał zmierzony na początku pomiarów) dla głowicy z zenitowym emiterem (układowo wykorzystywane jest odniesienie wartości sygnału detektora do natężenia światła padającego na próbkę tzw. referencja optyczna).

głowicy pomiarowej. Głowice testowano bezpośrednio po wytworzeniu.

Na rys.12 przedstawiono względną zmianę sygnału $\delta I/I_o$ w zależności od czasu trwania pomiaru (I_o -sygnał zmierzony na początku pomiarów) dla głowicy z zenitowo umieszczonym detektorem i sygnałem uzyskiwanym z obwodów optoelektronicznych emitera i detektora (referencja optoelektroniczna). Ciągłe obserwacje prowadzono przez 24 doby. Uzyskany przebieg bardzo dobrze da się dopasować krzywą pierwiastkową Kt^{1/2} i zapewne odzwierciedla procesy starzeniowe zachodzące w testowanym urządzeniu. W badaniach starzeniowych podzespołów elektronicznych przebiegi z czynnikiem czasowym t^{1/2} wiąże się z procesami dyfuzji w składnikach materiałowych [1,8,13]. Wtedy, w eksploatacji urządzenia należałoby się liczyć z 1.8% dryftem parametru $\delta I/I_o$ na 1000 h pracy.

W przemysłowej pracy urządzenia, biorąc pod uwagę, że co ok. 48h wprowadzane są korekty do algorytmu obliczania zawartości węgla, obserwowany dryft zasadniczo nie wpływa na jakość pomiarów.

Obserwację 6-cio dobową (rys.13) wykonano dla głowicy z zenitowym emiterem (rys.7), w której możliwe jest bezpośrednie odniesienie wartości sygnału detektora do natężenia światła padającego na próbkę (referencja optyczna). Pomimo krótszego czasu obserwacji widoczny jest inny charakter czasowego przebiegu $\delta I/I_o$. Po ok. 4 dobach następuje stabilizacja parametru $\delta I/I_o$ w pasie 0.04-0.08%. Ten bardzo dobry rezultat można wiązać z zastosowaniem referencji optycznej (rys.7). Jej wykonanie komplikuje jednak konstrukcję układu optomechanicznego głowicy co może być dodatkowym źródłem dryftu, a bardziej miarodajna ocena stabilności pracy urządzenia może być sformułowana po np. 1000-godzinnym czasie obserwacji.

Dodatkowym źródłem informacji o stabilności działania układu optoelektronicznego głowic są raporty operatorów systemu zainstalowanego w elektrowni, z których wynika, że praca głowic pomiarowych praktycznie nie była źródłem błędu pomiarowego.

Cechy konstrukcyjno-eksploatacyjne analizatora

W pracy przedstawiono system pomiarowy ciągłego oznaczania węgla resztkowego w procesie produkcyjnym elektrowni, do konstrukcji którego wykorzystano technikę

optycznego odbicia rozproszonego. Technikę tę wykorzystuje się również w przemysłowym analizatorze firmy Mark&Wedell Asketeknik [14], w którym izokinetycznie pobierana z kanału emisyjnego próbka gromadzona jest w szklanej cylindrycznej komorze osadczej. Fotometr poprzez szklaną pobocznicę określa albedo próbki, a układ procesorowy wykorzystując odpowiednie funkcje korelacyjne oblicza zawartość węgla. Procedura pomiarowa przewiduje wprowadzanie poprawek uwzględniających aktualne wyniki uzyskiwane w laboratorium zakładowym.

W przedstawionym rozwiązaniu popiół do badań optycznych jest zbierany w cylindrycznej komorze osadczej z płaskim szklanym wziernikiem stanowiącym jej dno i umożliwiającym kontakt optyczny z układem fotometru głowicy pomiarowej. Daje to możliwość operacyjnego dostępu dla innych metod analitycznych do próbki popiołu, (np. poprzez cylindryczną ścianę komory).

Zastosowanie płaskiego wziernika umożliwiło testowanie dwu wersji układów optycznych fotometru: w układzie z detektorem umieszczonym zenitowo i dwoma emiterami światła (rys.6) oraz w układzie z emiterem umieszczonym zenitowo i czterema detektorami (rys.7). W układzie zenitowego oświetlenia (rys.7) część strumienia światła z emitera poprzez dzielnik wyprowadzono na dodatkowy detektor uzyskując sygnał referencji optycznej.

Układ elektroniczny głowicy pomiarowej zapewnia stabilny pomiar (dryft 1.8%/1000h) oraz umożliwia współpracę z rozbudowanym komputerowym systemem nadzoru działania analizatora, który jednocześnie zapewnia komunikację z użytkownikiem oraz przetwarza i obsługuje bazę danych.

Stosowana metoda optyczna polega na wykorzystaniu efektu zmiany natężenia światła odbitego (R) od powierzchni próbki w zależności od zawartości węgla w próbce. Uzyskanie wartości liczbowych (% C) wymaga znajomości funkcji korelacji (R vs.%C). Na sygnał pomiarowy wpływa zarówno ilość węgla w próbce jak i szereg czynników specyficznych dla procesu produkcyjnego (rodzaj paliwa, typ kotła itp.). Rzutuje to na eksploatację urządzenia i w praktyce wiąże się z procedurą wprowadzania korekty uwzględniającej wyniki laboratoryjnych pomiarów chemicznych, które po wprowadzeniu do systemu pozwalają dobrać programowo odpowiedni algorytm obliczania zawartości węgla w popiele. W opracowanym komputerowym programie starano się stworzyć użytkownikowi ułatwienia formalne usprawniające przeprowadzanie procedury korekty.

System uzyskał przemysłową sprawność działania (cykl pomiarowy $\Delta t = 5$ min) i zdolność analityczną oznaczania węgla w popiele w przedziale 0-20%C z dokładnością 0.3-0.7 %C.

Przykłady i perspektywy zastosowań

Analizator AWP3/2 przeznaczony jest do charakteryzacji popiołów lotnych. Tak więc instalowany jest w elektrowniach wyposażonych w kotły pyłowe, w których popiół lotny stanowi 70 - 85% produktów niepalnych po spaleniu paliwa. Na rys.14 przedstawiono schemat typowej [12] instalacji kotłowej z kotłem pyłowym. Proponowane przez wytwórcę miejsca montażu próbnika zaznaczone są na schemacie (rys.14) i znajdują się w obszarze o podciśnieniu ok.1kPa.

Opracowany system ciągłego, rejestrowanego w czasie rzeczywistym, pomiaru pozostałości węgla w popiołach energetycznych pracuje w elektrowniach Skawina, Jaworzno i Będzin (fotografie) Na seminarium przedstawiony zostanie także system z analizatorem AWP3/2 pracujący w elektrowni Ostrołęka.



Rys.14. Schemat instalacji kotłowej z kotłem pyłowym. *1* - zasobnik węgla; 2 - podajnik węgla; 3 - młyn węglowy; 4 - komora paleniskowa, 5 - wentylator powietrza; 6 - wentylator młynowy; 7 - podgrzewacz powietrza; 8 - elektrofiltr; 9 - wentylator spalin; 10 - komin

Otrzymywane przez dyspozytora bieżące rezultaty pomiaru zawartości węgla mogą być w wieloraki sposób wykorzystane przez dyspozytora jak również stanowić sygnał roboczy dla podzespołów automatyki sterowania blokiem (rys. 15). Interesująca jest możliwość bieżącego przekazywania charakterystyki popiołu lotnego do stanowiska odpopielania i na składowisko popiołu dając możliwość planowej utylizacji popiołu.



Rys.15. Schemat strukturalny układu pomiarowego analizatora węgla AWP2/3.

Doniosłość problemu strat z powodu niecałkowitego spalania węgla w paleniskach pyłowych ilustruje fakt [19], że zwiększenie zawartości części palnych w popiele o 1% dla 1000MW elektrowni może kosztować elektrownię ok. 1mln US\$/rok zwiększenia kosztów paliwa. Szacuje się że w krajowych elektrowniach każdego roku powstaje 14mln ton lotnego popiołu, który może zawierać ponad 1mln ton niespalonego węgla [19]. Stąd wynika, że:

Pierwszoplanowym zastosowaniem analizatora AWP2/3 jest bieżąca kontrola i rejestracja procesu spalania, a także wytworzenie źródła sygnału dla układów automatyki sterowania kotłem.

Cechy konstrukcyjne urządzenia, które jest w pełni zinformatyzowane pozwalają Elektrowni łatwo dostosować urządzenie do swoich potrzeb, przy czym wytwórca ZAP"Kwant" oferuje pełną współpracę opartą na dotychczasowym doświadczeniu przemysłowym. Jednocześnie eksploatacja przyrządu wymaga stałej współpracy z laboratorium zakładowym ze względu na okresową kalibrację wskazań zawartości niespalonego węgla. Dlatego AWP2/3 wyposażony jest w oryginalny układ poboru próbek popiołu do celów laboratoryjnych i stąd:

Przyrząd AWP2/3 służy do systematycznego poboru próbek popiołu z kanałów emisyjnych dla laboratorium zakładowego.

Bardzo ważnym zadaniem technologiczno-ekonomicznym jest gospodarka popiołem, który okazuje się być cennym tworzywem mineralnym. Zależnie od gatunku popiołu może on znaleźć szereg zastosowań, przy czym w niektórych zastosowaniach zwraca się uwagę na zawartość węgla, dlatego:

Analizator AWP2/3 może znaleźć zastosowanie w archiwizacji danych o popiele uzyskiwanym w elektrowni, a więc marketingu tym surowcem.

Oryginalna konstrukcja komory pomiarowej analizatora AWP2/3 umożliwia, oprócz optycznej, zastosować inne metody analityczne do badania próbki popiołu, np. określać rezystancję elektryczną, więc:

Analizator AWP2/3 może zostać rozbudowany, stwarzając możliwość bieżącego określania rezystancji popiołu

Przyczyny niecałkowitego spalania w paleniskach pyłowych są bardzo złożone i często spektakularne dla rozwiązań technicznych danej Elektrowni. Wśród najbardziej istotnych wymienia się: jakość i własności węgla oraz stałej pozostałości - koksów, warunki pracy komory spalania i jej konstrukcja, praca młynów itp. Dlatego korzystanie z procedur ciągłego pomiaru pozostałości węgla umożliwia analizę pracy bloku energetycznego poprzez stały dostęp do danych, co zapewnia w pełni zinformatyzowany układ AWP2/3, więc perspektywicznie:

Eksploatacja analizatora AWP2/3 umożliwia znajdowanie przyczyn niecałkowitego spalania w paleniskach pyłowych.



Fotografie instalacji na obiekcie przemysłowym:

Analizator AWP 2/3 firmy ZAP "KWANT" zainstalowany w Elektrociepłowni Będzin S.A.

Literatura:

- [1] Colleman M., Hybrid Circuits, 4 (Spring 1984) 36.
- [2] Godlewski J.: Generacja i detekcja promieniowania optycznego, *PWN*; Warszawa 1997.
- [3] Gołaś J., Jankowski H., Niewczas B., Piechna J., Skiba A., Szkutnik W., Szkutnik Z., Wartak R., Worek C., "Optoelektroniczny system ciągłego pomiaru pozostałości węgla w popiołach energetycznych" COE-2000, Gliwice, 13-16 czerwca 2000.
- [4] Hasset D.J., Eylands K.E., Fuel 78 (1999) 243
- [5] Hrynkiewicz A.Z. i Rokita E. (red): Fizyczne metody badań w biologii, medycynie i ochronie środowiska. *PWN*; Warszawa 1999.
- [6] Hwang J.Y.: Unburned Carbon from Fly Ash A Hidden Treasure. Third Annual Conference on Unburned Carbon on Utility Fly Ash, 1997 Conference Proceedings, FETC Publications.
- [7] Integrated Photomatrix Ltd. Materiały firmowe, AN 171-281.
- [8] Jankowski H., Nowak S., Worek C., Posadowski W., "Preparation of Thermosensor and Low TCR Thin Resistive Materials by Heat Treatment of Metal Multilayered Precursors", CIMTEC, Venice, May28-June2, 2000
- [9] Kubelka P. u. Munk F., Z. techn. Physik 12, 593 (1931).
- [10] Kulaots I., You-Ming Gao, Hurt R.H., Suuberg E.M.: Characterization of Carbon in Coal Fly Ash. 1999 Conference on Unburned Carbon in Fly Ash, 1999 Conference Proceedings, FETC Publications.
- [11] Lamar Larrimore C., Sorge J.: Evaluation of On-Line Carbon-in-Ash Measurement Technologies. Third Annual Conference on Unburned Carbon on Utility Fly Ash, 1997 Conference Proceedings, FETC Publications.
- [12] D.Laudyn, M.Pawlik, F.Strzelczyk, "Elektrownie", WNT, Warszawa (2000)
- [13] Limburgs Universitair Centrum, Institute for Materials Research, Report 1990-1992.
- [14] Mark&Wedell Asketeknik Materiały firmowe.
- [15] McCarthy M.J., Dhir R.K., Fuel 78 (1999) 121
- [16] Pomiary wykonano spektrometrem Perkin-Elmer (Λ -19) w Katedrze Elektroniki AGH w Krakowie.
- [17] Piotrowski J., Elektronizacja, 6 (2000) 14
- [18] Raport KBN: Analizator popiołu kotłów energetycznych. Projekt celowy nr 8T10B04797C/3766, 1999/2000.
- [19] W.Rybak "Strata niecałkowitego spalania w paleniskach pyłowych", Energetyka-2000, Wrocław, t2-241 (2000)
- [20] Sarbak Z., Kramer-Wachowiak M., SITPH, Ochrona powietrza i problemy odpadów, 1 (1998) 5
- [21] Śliwczyński Ł., Lipiński M., The Design Magazine of Electronics Industry EDN, Europe, September 1, (1998) 92.
- [22] Świtoński J., Cement-Wapno-Beton, R.3/65, nr.6 (1998) 214
- [23] Unsworth J.F., Barrat D.J., Roberts P.T.: Coal Quality and Combustion Performance An International Perspective. *Elsevier*; Amsterdam, 1991.
- [24] Volz H.G.: Industrielle Farbprufung. VCH Verlagsgesellschaft; Weinheim 1990.
- [25] Zgłoszenie patentowe UP RP nr P-319853: Analizator ilości wyróżniającego się barwą składnika pyłu unoszonego w strumieniu gazu.