

Andrzej KOTYRA, Waldemar WÓJCIK
POLITECHNIKA LUBELSKA, KATEDRA ELEKTRONIKI

Wykorzystanie cech obrazu płomienia do oceny procesu spalania

Dr inż. Andrzej KOTYRA

Jest adiunktem w Katedrze Elektroniki Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. W 1991 r. ukończył studia na Wydziale Elektrycznym. Pracę doktorską obronił w 2002. W swojej pracy naukowej zajmuje się analizą danych pomiarowych oraz diagnostyką spalania pyłu węglowego.



e-mail: a.kotyra@pollub.pl

Dr hab. inż. Waldemar WÓJCIK

W 1975 r. ukończył studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, doktorat obronił w Politechnice Lubelskiej w 1985r, a habilitację w Politechnice Lwowskiej (2001). W swojej pracy naukowej zajmuje się procesami cieplnymi, fizyką ciała stałego, sterowaniem procesów technologicznych, optoelektroniką, zastosowaniami algorytmów do analizy danych. Szczególnie dużo uwagi poświęca zastosowaniu techniki światłowodowej do monitorowania procesów cieplnych.



e-mail: waldemar.wojcik@pollub.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania laboratoryjne, na podstawie których określono rodzaje płomieni towarzyszące różnym warunkom procesu spalania. Zmienianymi parametrami był rodzaj spalanej paliwa, wydatki pyłu węglowego oraz powietrza pierwotnego i wtórnego. W analizie uwzględniono niektóre parametry geometryczne opisujące kształt płomienia, takie jak pole obszaru płomienia, długość jego konturu i współrzędne środka ciężkości.

Słowa kluczowe: przetwarzanie obrazu, płomień, spalanie.

Application of flame image features to assessment of combustion process

Abstract

The paper presents flame characterisation using image processing. A laboratory combustion chamber and the methodology of investigations are described. The experiments were carried out on a laboratory stand equipped with a scaled down 1:10 swirl burner, while flows of the primary, secondary and tertiary air as well as coal were changed in order to produce different states of the combustion process. Flame images were captured by a monochrome CCD camera, mounted in an inspection opening as shown in Fig. 1a, b. During the combustion tests, four main types of flames were observed, namely: a flame corresponding to the combustion chamber warming-up phase using an auxiliary oil burner (Fig. 4a), a flame corresponding to the simultaneous operation of both main and auxiliary burner (Fig. 4b), a coal flame with instability caused by variability of the air/fuel ratio (Fig. 4c), and, finally, a flame that was typical for flame extinguishing (Fig. 4d). Since the flame was the only luminous object, determination of its area and edge was based on the pixel amplitude. Several shape parameters, such as the flame area, the flame area contour length as well as the coordinates of its gravity center were used for qualitative description of the flames under consideration. The presented analysis shows that the discussed flame shape features can be helpful for classification of various states of the combustion process and, thus, for avoiding the unstable conditions. It can result in improving the combustion efficiency and safety.

Keywords: image processing, flame, combustion.

1. Wstęp

Optymalizacja procesu spalania przeprowadzona pod kątem minimalizacji emisji szkodliwych substancji oraz niedopału, wymaga posiadania informacji o tym procesie. Nawet uproszczona analiza procesu spalania jest przedsięwzięciem bardzo skomplikowanym, co w szczególności dotyczy spalania węgla kamiennego w palnikach pyłowych.

Spalanie można określić jako szybką egzotermiczną reakcję utleniania charakteryzującą się wydzielaniem ciepła, świeceniem oraz propagacją w przestrzeni. Przemieszczenie się tej reakcji jest ograniczone do pewnej strefy zwanej płomieniem, który stanowi bezpośrednie źródło nieopóźnionej informacji o procesie spalania. Ocena jakości procesu spalania metodami optycznymi polega zatem na wykorzystaniu informacji zawartych w promieniowaniu

emitowanym przez płomień. W praktyce, wystarczająca bywa detekcja odejścia od stanu określanego jako spalanie optymalne, ponieważ umożliwia to wprowadzenie odpowiedniej korekcji.

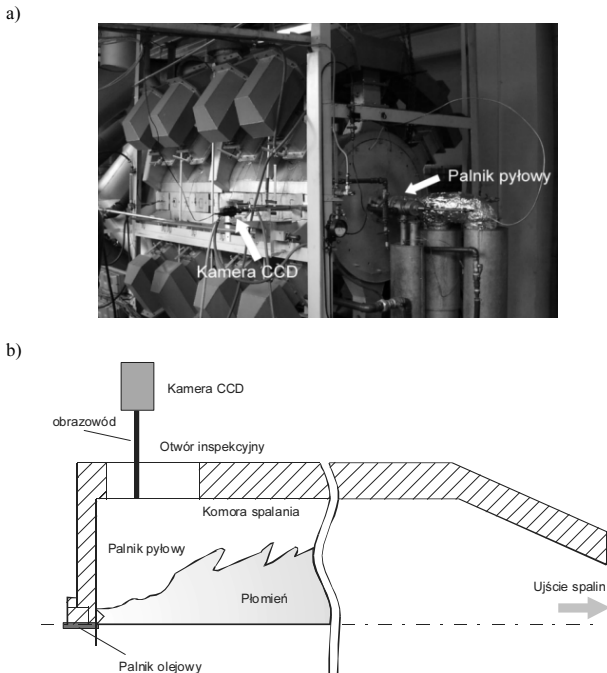
Istotnym elementem wchodzącym w skład układu monitorowania płomienia, od którego w dużej mierze zależy jego niezawodne działanie, jest głowica optyczna umieszczona wewnątrz komory spalania [1, 2]. Stosowane są głowice z jednym oraz wieloma torami optycznymi. Głowice jednokanałowe wyposażone są w układ optyczny o stosunkowo szerokim kącie akceptacji, oraz pojedynczy fotodetektor. Rozwiązanie wielokanałowe, pozwala na selektywną i niezależną detekcję promieniowania w kilku strefach płomienia, przy czym kąt akceptacji w takim przypadku jest mniejszy niż w rozwiązaniu jednokanałowym. W takim przypadku możliwy jest wybór strefy najbardziej wrażliwej na zmiany warunków procesu spalania, spowodowany np. zmianą ilości powietrza wtórnego [3].

Naturalnym rozszerzeniem możliwości sondy wielokanałowej jest zastosowanie obrazowodu zamiast wiązki światłowodowej oraz przetwornika obrazu w miejscu fotodiody [4, 5]. Takie rozwiązanie równoważne jest wielokanałowemu układowi monitorowania o bardzo dużej liczbie kanałów, którą ogranicza ilość pikseli matrycy CCD lub ilość włókien obrazowodu. Przewaga wizyjnych systemów przeznaczonych do diagnostyki procesu spalania uwidacznia się przede wszystkim w możliwości wyznaczania znacznie większej ilości parametrów płomienia, niż byłoby to możliwe z użyciem pojedynczego fotodetektora [6, 7]. Spośród nich należy wymienić widmo promieniowania emitowanego przez płomień, częstotliwości migotania płomienia, rozkład temperatury a także parametry geometryczne kształtu płomienia (np. pole powierzchni, położenie środka ciężkości, momenty geometryczne, deskryptory Fouriera, itp.). Z drugiej strony bardzo duża ilość danych generowana przez system wizyjny wymaga stosowania bardziej wyrafinowanych metod ich analizy.

2. Laboratoryjne testy spalania węgla

Testy spalania pyłu węglowego zostały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym, którego zasadniczym elementem jest cylindryczna komora spalania o długości 2,5 m i średnicy ok. 0,7 m. Wewnątrz komory znajduje się wykonany w skali 1:10 model wirowego palnika pyłowego oraz palnik olejowy. Obydwa palniki umieszczone są w jednej osi i mogą pracować jednocześnie. Mieszanka paliwowa wraz z powietrzem pierwotnym dostarczana jest do palnika pyłoprzewodem. Regulację wydatku węgla dokonywana jest poprzez zmianę prędkości obrotowej jego podajnika. Na przebieg procesu spalania istotny wpływ ma ponadto wartość przepływu powietrza wtórnego.

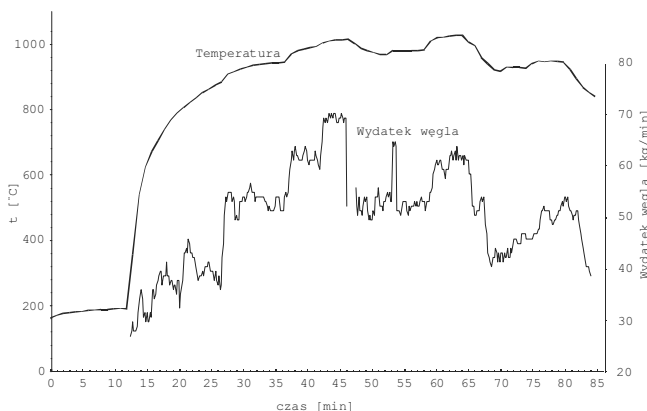
Komora spalania zaopatrzona jest w dwa podłużne otwory rozmieszczone po obu jej stronach, które umożliwiają obserwację płomienia. Widok komory spalania wraz z zaznaczonym umiejscowieniem kamery został przedstawiony na rys. 1a, b.



Rys. 1. a) Widok ogólny stanowiska pomiarowego z zaznaczeniem umiejscowienia palnika oraz kamery, b) Usytuowanie palnika pyłowego i olejowego oraz miejsce zamocowania kamery CCD
 Fig. 1. a) General view of the laboratory combustion stand. Camera and pulverized burner mounting is indicated with an arrow, b) Camera and burner placement inside the combustion chamber

Kamerę usytuowano prostopadłe do osi płomienia, w sposób umożliwiający rejestrację obrazu obszaru płomienia w pobliżu wylotu palnika. Takie umiejscowienie kamery podyktowane zostało wynikami wcześniejszych badań przeprowadzonych z użyciem wielokanałowej sondy światłowodowej [1]. Na ich podstawie stwierdzono, że jest to najbardziej wrażliwy obszar płomienia na zmiany parametrów spalania, takich jak np. skład chemiczny, właściwości fizyczne paliwa, przepływ oraz temperatura powietrza pierwotnego i wtórnego.

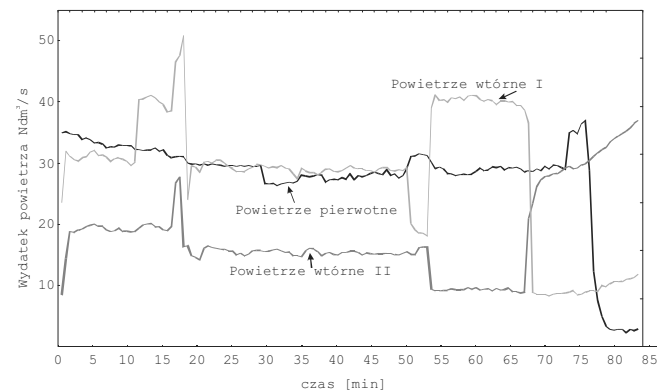
Testy spalania paliw pyłowych przeprowadzono według następującej procedury. Na początku włączany był tylko palnik olejowy. W tym czasie temperatura wewnątrz komory spalania powoli wzrastała do ok. 200°C. W 10. minucie od momentu rozpoczęcia testu, włączany został podajnik z węglem, którego prędkość obrotowa początkowo była na poziomie 80 obr/min. Dostarczany do palnika pył węglowy ulegał zapłonowi od pracującego palnika olejowego. W 26. minucie testu wyłączono palnik olejowy; w dalszym ciągu testu pracował tylko palnik pyłowy.



Rys. 2. Zmiany wydatku węgla oraz temperatury wewnątrz komory spalania podczas testu spalania
 Fig. 2. Variation of the coal flow and temperature during combustion test

Obroty podajnika, które wynosiły początkowo 80 obr/min zwiększono skokowo najpierw do 110 obr/min, a następnie do 130 obr/min i 150 obr/min. W ten sposób zwiększano dopływ paliwa stałego do palnika. Jednak wydatek paliwa stałego nie jest proporcjonalny do prędkości obrotowej podajnika ze względu na zmienną w czasie zawartość węgla znajdującej się w podajniku. Zmiany wydatku węgla oraz temperatury wewnątrz komory spalania w funkcji czasu zostały przedstawione na rys. 2.

Zmiany wydatku powietrza pierwotnego i wtórnego w czasie eksperymentu przedstawione zostały na rys. 3. Wydatek powietrza pierwotnego, pomijając fazę wygaszania, ulega jedynie niewielkim zmianom. W dalszej części testu zmieniano wydatki powietrza wtórnego. Całkowity wydatek powietrza wtórnego tworzą dwie składowe przepływy powietrza – powietrze wtórne I oraz powietrze wtórne II, doprowadzane osobno do palnika. Zgaszenie płomienia pyłowego następowało w wyniku wyczerpania zasobów paliwa stałego poprzez stopniowe zmniejszanie jego wydatku. Typowy czas testu spalania wynosił 85 minut.



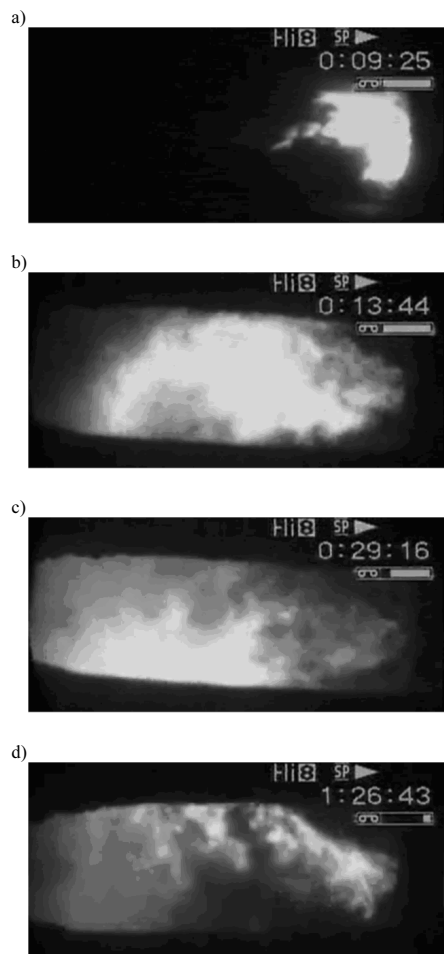
Rys. 3. Zmiany wydatku powietrza pierwotnego oraz wtórnego (składowe powietrze wtórne I, powietrze wtórne II)
 Fig. 3. Variation of the primary, secondary and tertiary air flows during combustion test

3. Dyskusja wyników

Podczas testu spalania, obrazy płomienia były rejestrowane przez system rejestracji w skład którego wchodziła kamera CCD współpracująca z obrazowodem oraz pamięć masowa. Obrazy płomienia w 8-bitowej skali szarości ograniczone do rozmiarów 328x153 pikseli, rejestrowane były szybkością 15 klatek/s i poddawane późniejszej analizie.

Zmiany składu spalanego paliwa w istotny sposób wpływały na kształt płomienia rejestrowanego przez system wizyjny. Podczas przeprowadzanych testów spalania można było wyróżnić następujące charakterystyczne obrazy płomieni:

- Płomień towarzyszący spalaniu wyłącznie oleju, charakterystyczny dla początkowej fazy testu (do 10. minuty jego trwania), przedstawiony na rys. 4a.
- Płomień występujący przy jednoczesnej pracy palnika olejowego i pyłowego, przy temperaturze wewnątrz komory spalania przekraczającej 800°C, charakteryzujący się dużą jasnością i stabilnością, widoczny na rys. 4b.
- Płomień towarzyszący spalaniu wyłącznie pyłu węglowego, charakterystyczny dla środkowej fazy testu, przedstawiony na rys. 4c. Podczas zmian wydatku pyłu węglowego zaobserwowano występowanie przejściowej niestabilności, charakteryzującej się odsunięciem punktu zapłonu od czoła palnika.
- Płomień występujący w czasie wygaszania stanowiska, występujący podczas spadku wydatku pyłu węglowego przy dużym wydatku powietrza, uwidoczny na rys. 4d.



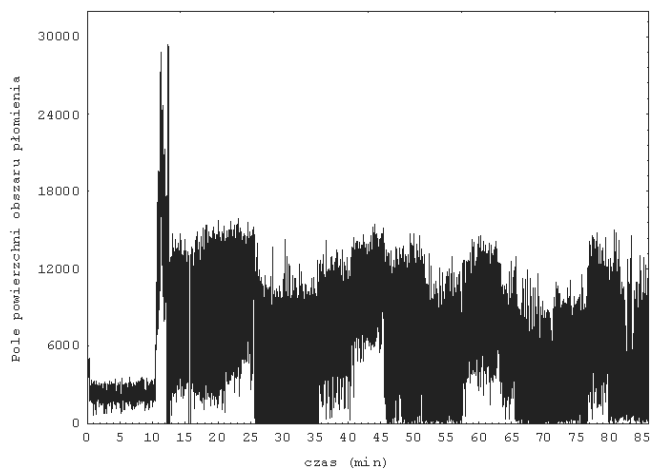
Rys. 4. Charakterystyczne obrazy płomienia zarejestrowane w czasie testów spalania: a) włączony tylko palnik olejowy, b) włączony zarówno palnik olejowy, jak i palnik pyłowy, c) włączony jest tylko palnik pyłowy, d) włączony jest tylko palnik pyłowy przy małym wydatku paliwa – wygaszanie stanowiska

Fig. 4. Typical flame images captured during combustion test for the following cases: a) only oil burner is working, b) both oil and pulverized coal burners are working, c) only pulverized coal burner is working, d) pulverized coal burner is working at low fuel flow – combustion extinction

Zmiany wydatków powierza pierwotnego, wtórnego i pyłu węglowego wpływają zarówno na położenie obszaru płomienia na płaszczyźnie obrazu, jak również na jego kształt. Przy definiowaniu granic obszaru płomienia wykorzystano fakt braku innych niż płomień źródeł promieniowania. Reprezentacja ramki w 8-bitowej skali szarości odpowiada rozpiętości jasności pikseli w zakresie od 0 do 255. Promieniowanie emitowane przez płomień miało na tyle dużą wartość, że przy zastosowanym układzie optycznym, piksele odpowiadające obszarowi płomienia były nasycone. Odpowiadało to maksymalnej możliwej amplitudzie wynoszącej 255. Za obszar płomienia arbitralnie przyjęto wszystkie te piksele, których amplituda była większa od 200.

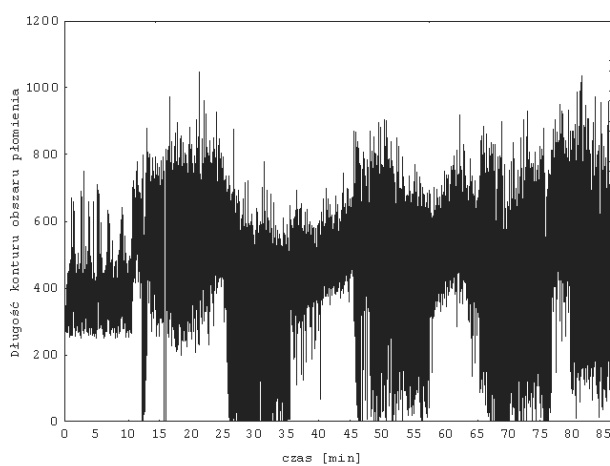
Pierwszą z branych pod uwagę miar tak określonego obszaru płomienia było pole powierzchni S , definiowane jako całkowita ilość wszystkich tworzących go pikseli. Parametr ten w prosty sposób wskazuje na wielkość płomienia, a jego zmiany w czasie testu spalania przedstawiono na rys. 5.

Analizując zmiany pola powierzchni obszaru płomienia można zauważyć, że ma on stosunkowo niewielką wartość dla pracującego palnika olejowego. Włączenie palnika pyłowego skutkuje nagłym wzrostem pola powierzchni płomienia przy jednoczesnym wzroście zmienności tego parametru. Wyłączenie palnika olejowego skutkuje spadkiem S . Wzrost lub spadek wydatku węgla powoduje odpowiednie zmiany pola powierzchni płomienia. Trudno natomiast wskazać na wyraźny wpływ regulowania wydatków powietrza na wielkość parametru S .



Rys. 5. Zmiany powierzchni obszaru płomienia podczas testu spalania
Fig. 5. Variation of the flame area during combustion test

Długość konturu stanowi sumę odległości pomiędzy pikselami wchodzącymi w jego skład, przy czym jeśli dwa piksele położone są równolegle do kierunku poziomego lub pionowego, wówczas odległość ta wynosi 1, jeśli natomiast dwa piksele konturu sąsiadują ze sobą po przekątnej, wówczas odległość między nimi wynosi $\sqrt{2}$. Jeżeli piksele obrazu płomienia tworzą obszary rozłączne, wówczas długość konturu stanowi sumę długości poszczególnych obszarów. Długość konturu, podobnie jak i inne rozpatrywane parametry zależą od wartości funkcji jasności, wyznaczającej umowny kontur płomienia. Przebieg zmienności w czasie długości konturów płomienia, podczas przeprowadzonego testu spalania przedstawiono na rys. 6.



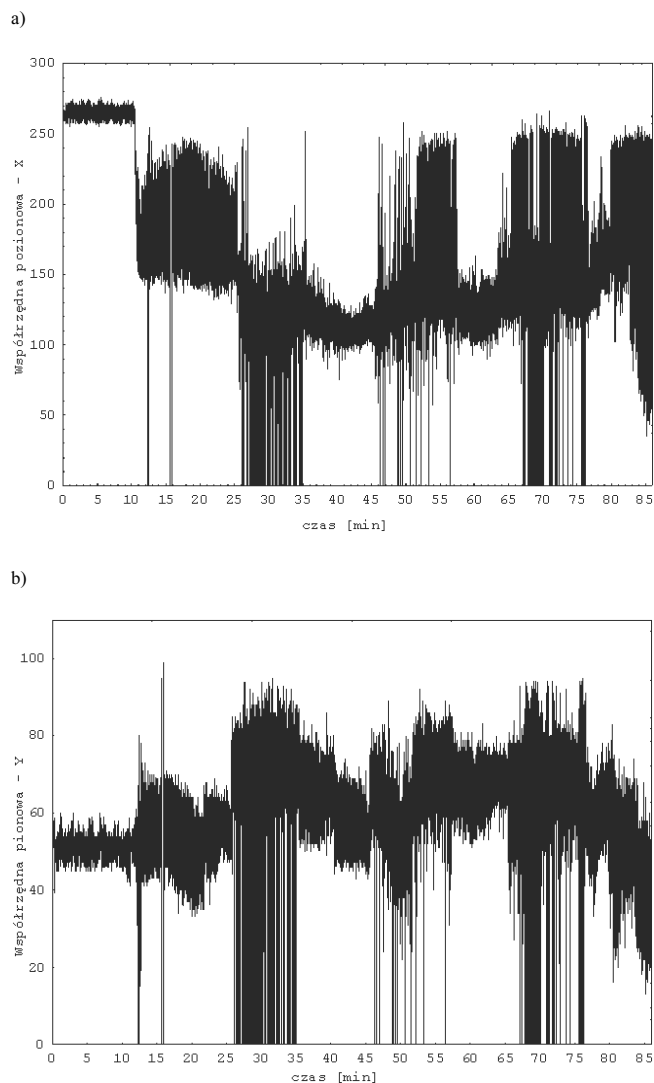
Rys. 6. Zmiany długości konturu obszaru płomienia podczas testu spalania
Fig. 6. Variation of the flame area contour length during combustion test

W czasie przeprowadzonych badań stwierdzono, podobnie jak w przypadku dyskusowanego wcześniej parametru S , wyraźniejszy wpływ zmian wydatku paliwa na długość konturu obszaru płomienia. Warto również zauważyć podobieństwo zmian obydwu dyskusowanych parametrów podczas przeprowadzonego testu.

Kolejnym analizowanym parametrem były współrzędne środka ciężkości obszaru płomienia, które zdefiniowane zostały jako znormalizowane momenty $m_{0,1}$ i $m_{1,0}$, przy czym moment $m_{p,q}$ wyznaczany jest na podstawie zależności:

$$m_{p,q} = \frac{1}{A} \sum_{x,y} x^p y^q f(x,y). \quad (2)$$

W powyższej zależności x , y , oznaczają współrzędne rozpatrywanego piksela należącego do obszaru płomienia, natomiast $f(x,y)$ jest jego jasnością. Zmiany położenia środka ciężkości obrazu płomienia przedstawione są na rys. 7a, 7b.



Rys. 7. Zmiany położenia współrzędnej: a) – poziomej oraz b) – pionowej środka ciężkości obszaru płomienia podczas testu spalania

Fig. 7. Variation of horizontal (a), vertical (b) coordinate of the flame area gravity center during combustion test

Położenia środka ciężkości obszaru płomienia wzdłuż osi poziomej X , pokazane na rys. 7a, ze względu na poziome usytuowanie palnika, wskazuje na jego odsunięcie od wylotu palnika. Zmienność położenia środka ciężkości obszaru płomienia jest z kolei wskaźnikiem stabilności położenia płomienia wzdłuż rozpatrywanej osi. W przypadku pracy tylko palnika olejowego, jak pokazane to było na rys. 4a, można zauważyć stabilny płomień znajdujący się w pobliżu wylotu palnika. Włączenie palnika pyłowego, przy jednoczesnym wzroście przepływu powietrza wtórnego powoduje odsunięcie się płomienia od palnika, przy jednoczesnym wzroście zmienności jego położenia. Wyłączenie palnika olejowego w 26. minucie trwania testu skutkuje jeszcze większym odsunięciem płomienia od palnika. Następujące po tym zwiększenie wydatku pyłu węglowego powoduje stabilizację położenia środka ciężkości płomienia od 35. min. do 42. min. testu. Gwałtowny spadek wydatku węgla w 45. min testu widoczny na rys. 2, powoduje podobną zmianę położenia środka ciężkości. Zmniejszenie tych zmian następuje w 53. min. testu, kiedy to następuje zwiększenie wydatku powietrza wtórnego, widoczne na rys. 3. Wygaszanie stanowiska dokonywane poprzez zmniejszanie wy-

datku węgla powoduje zwiększenie zmienności położenia środka ciężkości płomienia wzdłuż współrzędnej poziomej.

Położenie środka obszaru płomienia wzdłuż osi pionowej Y , pokazane na rys. 7b, wykazuje podobną zmienność położenia, ale w mniejszym stopniu, ze względu na prostopadłe względem podłoża wprowadzenie spalanej mieszanki do komory spalania. Do pewnego stopnia, dyskutowany wskaźnik można traktować jako miarę symetrii położenia płomienia względem osi palnika. Znamienna jest bardzo duża jego zmienność po wyłączeniu palnika olejowego przy stosunkowo niewielkim wydatku węgla od 26. min do 35. min trwania testu. Podobna sytuacja występuje podczas wygaszania stanowiska, gdzie dodatkowe widoczne jest wyraźne pionowe przesunięcie środka ciężkości obszaru płomienia.

4. Podsumowanie

Na podstawie zaprezentowanych wyników badań można stwierdzić, że proste wskaźniki geometryczne mogą zostać użyte do charakteryzowania procesu spalania, umożliwiając wykrywanie takich zmian parametrów wejściowych palnika, jak przede wszystkim wydatek pyłu węglowego. W warunkach przemysłowych, detekcja zmian wydatku węgla w odniesieniu do pojedynczego palnika jest często problematyczna. Stabilność płomienia nie jest pojęciem jednoznacznym, dlatego trudno jest wskazać jeden wskaźnik, na podstawie którego jednoznacznie można byłoby stwierdzić wystąpienie takiej sytuacji. Należałoby raczej rozpatrywać wiele wskaźników kształtu jednocześnie, tworząc wektor cech obszaru płomienia i badać go przy użyciu metod eksploracji danych. Wrażliwość poszczególnych parametrów na zmiany punktu pracy palnika zależy od rozmiarów i kształtu komory spalania oraz stosowanego palnika oraz sposobu umiejscowienia przetwornika wizyjnego. Nie bez znaczenia jest również zastosowane kryterium określające krawędź płomienia.

Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że przy opisanych wcześniej rozmiarach analizowanych obrazów płomienia oraz przyjętej szybkości ich akwizycji mogą być wyznaczane w czasie rzeczywistym. Pozwala to na wykorzystanie niedrogich przetworników obrazowych.

5. Literatura

- [1] W. Wójcik, A. Smolarz, A. Kotyra, C. Wojciechowski, P. Komada: Fibre optic flame monitoring system, Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, vol.4239 "Lightguides and their Applications" 2000, p. 129-131.
- [2] W. Wójcik: Światłowodowy układ do monitorowania procesu spalania, Pomiary Automatyka Kontrola, Vol.53, nr 11'2007, pp. 24-28 ISSN 0032-4140.
- [3] W. Wójcik, A. Kotyra: Strefowa diagnostyka procesu spalania. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Kontrola, Sterowanie i Automatyzacja Procesu Spalania w Kotłach Energetycznych, Zakopane, 2005, str. 168-177, ISBN 83-922258-0-5.
- [4] W. B. Baek, S. J. Lee, S. Y. Baeg, Ch. H. Cho. Flame image processing & analysis for optimal coal firing of thermal power plant, Proceedings. ISIE 2001, IEEE International Symposium on Industrial Electronic, vol. 2, pp. 928-931, 2001.
- [5] Lu G., Gilbert G., Yan Y.: Vision based monitoring and characterization of combustion flames. Journal of Physics: Conference Series 15, pp. 194-200, 2005.
- [6] W. Wójcik, A. Kotyra: Wykorzystanie obrazu płomienia do oceny stabilności spalania mieszanin pyłu węglowego i biomasy, Pomiary Automatyka Kontrola wydanie specjalne Nr 3 2005, pp. 34-36, 2005.
- [7] W. Wójcik, A. Kotyra, T. Golec, K. Gromaszek: Vision based monitoring of coal flames, Przegląd Elektrotechniczny, nr 3/2008, pp. 241-243.