

Andrzej Kotyra*, Waldemar Wójcik*

Diagnostyka procesu spalania pyłu węglowego wykorzystująca analizę obrazu

1. Wprowadzenie

Potrzeba zmniejszenia emisji szkodliwych substancji powstających w procesie spalania pyłu węglowego, do których zaliczyć należy przede wszystkim tlenki azotu i siarki (NO_x , SO_x), stała się przyczyną upowszechnienia nowych technik spalania, do których zalicza się tzw. spalanie strefowe. Co więcej, istnieje zauważalna tendencja wykorzystywania paliw odnawialnych, jak mieszanki paliw i biomasy. Wymienione czynniki, będąc mniej szkodliwe dla środowiska naturalnego, z drugiej strony negatywnie wpływają na stabilność płomienia oraz przyczyniają się do obniżenia efektywności procesu spalania. Konieczne staje się zatem stosowanie układów monitorujących, które minimalizowałyby występowanie tych negatywnych zjawisk. Dlatego istotnym problemem jest utrzymywanie stałych warunków pracy palnika.

W palnikach pyłowych, spalanie mieszanki paliwowo-powietrznej ma charakter turbulenty. Nawet przybliżone modelowanie rozkładu temperatury i przepływu jest zagadnieniem niezmiernie złożonym. Jeżeli procesowi spalania towarzyszy płomień, to takie jego cechy jak np. kształt, rozkład jasności i częstotliwości migotania są odzwierciedleniem zachodzących procesów fizykochemicznych. Dlatego też płomień należy traktować jako pierwotne i najszybsze źródło informacji o zachodzącym procesie spalania. Zarówno coraz większa dostępność, przy coraz lepszych parametrach półprzewodnikowych, przetworników obrazowych, jak i wzrost dostępnej mocy obliczeniowej, wpływają na upowszechnienie się technik wykorzystujących przetwarzanie obrazu, które obejmują także obszar diagnostyki procesu spalania [1].

Wizyjne systemy przeznaczone do diagnostyki procesu spalania pozwalają na określenie parametrów geometrycznych płomienia (np. rozmiar, położenie), cech promieniowania emitowanego przez płomień (rozkład irradycji, widmo) oraz częstotliwości migotania płomienia i rozkładu temperatury itd. Uzyskana informacja razem z informacją o składzie spalin i parametrach fizykochemicznych paliwa może być użyteczna do optymalizacji procesu spalania [1].

* Katedra Elektroniki, Politechnika Lubelska w Lublinie

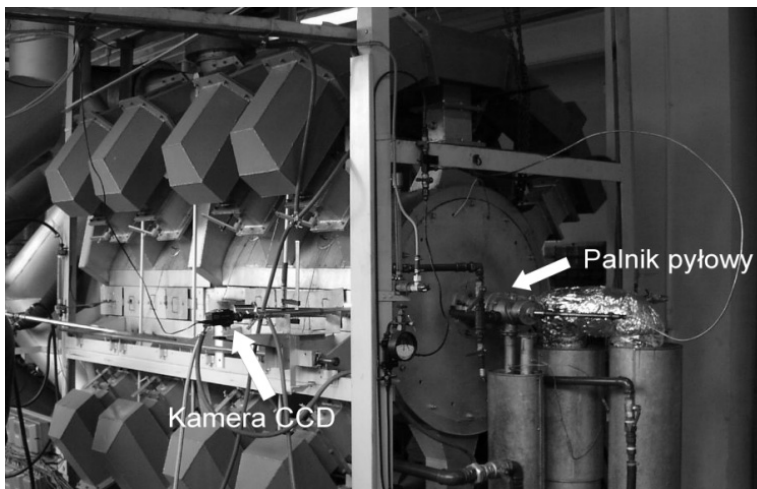
W najbardziej ogólnym przypadku, wykorzystanie informacji o procesie spalania zawartej w płomieniu polegałoby na wykorzystaniu obrazu całego lub części płomienia, rejestrowanego za pomocą kamery. Takie podejście wymagałoby analizowania bardzo dużej ilości danych (nie mówiąc już o trudnościach związanych z umiejscowieniem kamery w pobliżu pracującego palnika). Jest to zatem podejście przydane przede wszystkim na etapie badawczym, kiedy nie ma ograniczeń wprowadzanych przez pracę w czasie rzeczywistym.

Omawiane systemy wykorzystują zazwyczaj jeden przetwornik obrazowy (kamerę CCD), ale istnieją również rozwiązania do diagnozowania w przestrzeni 3D [1]. Przykłady innych rozwiązań funkcjonują zarówno w skali laboratoryjnej [2], jak i przemysłowej [3].

2. Opis stanowiska pomiarowego i metodyka badań

Testy spalania mieszaniny pyłu węglowego i biomasy (osady papiernicze) zostały przeprowadzone na stanowisku pomiarowym w Instytucie Energetyki. Zasadniczym jego elementem jest cylindryczna komora spalania o długości 2,5 m i średnicy ok. 0,7 m, wewnątrz której znajduje się wykonany w skali 1:10 model wirowego palnika pyłowego oraz palnik olejowy. Mieszanka paliwowa wraz z powietrzem pierwotnym dostarczana jest do palnika pyłoprzewodem.

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 rysunku 1.



Rys. 1. Stanowisko testowe z zaznaczonym umiejscowieniem kamery względem palnika pyłowego

Kamerę usytuowano prostopadle 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 [4]. Na ich podstawie stwierdzono, że jest to najbardziej wrażliwy obszar płomienia na zmiany parametrów spalania, takich jak np. skład chemiczny, właściwości fizyczne paliwa, oraz przepływ i temperatura powietrza pierwotnego i wtórnego.

Do celów rejestracji zastosowano monochromatyczną, analogową kamerę CCD pracującą z szybkością 25 klatek/s. Ze względu na wysoką temperaturę panującą w pobliżu pracującego palnika i ograniczony rozmiar otworu wziernikowego, zastosowano obrazowód o długości 0,7 m. Obraz został zarejestrowany w pamięci masowej komputera. Wielkość ramki obrazu wynosiła 352×288 punktów, przy 8-bitowej skali szarości. Ze wspomnianej ramki wyodrębniony został do dalszej analizy obszar o rozmiarach 152×182 pikseli.

2.1. Metodyka badań

Testy spalania badanego paliwa były przeprowadzane według określonej kolejności. W pierwszej fazie, komora spalania była wygrzewana za pomocą pomocniczego palnika olejowego. Gdy temperatura w jej wnętrzu uzyskała odpowiedni poziom, włączano instalację dostarczającą pyłoprzewodem paliwo stałe, które było spalane jednocześnie z paliwem ciekłym. W takich warunkach temperatura wewnątrz komory spalania w dalszym ciągu wzrastała do poziomu, kiedy możliwe było całkowite wyłączenie palnika olejowego. Temperatura i przepływy powietrza pierwotnego oraz wtórnego pozostawały stałe, a jedynym zmienianym parametrem była prędkość podajnika paliwa stałego. Doprowadzano w ten sposób do spalania niestabilnego, z całkowitym zgaśnięciem płomienia włącznie.

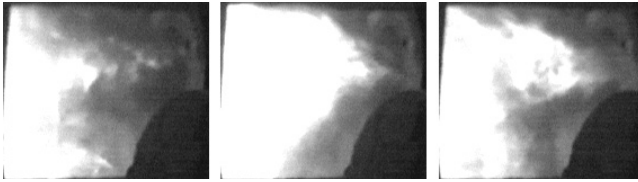
Podczas przeprowadzanych testów spalania stwierdzono występowanie czterech rodzajów płomieni:

- 1) Płomień niestabilny, przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Sekwencja obrazów zarejestrowana podczas spalania niestabilnego

- 2) Płomień stabilny, jak na rysunku 3 przy zapłonie paliwa w pobliżu wieńca palnika pyłowego, ale w zmieniającej się odległości. Charakterystyczny dla spalania mieszaniny węgla i biomasy.



Rys. 3. Sekwencja obrazów zarejestrowana podczas spalania stabilnego przy współspalaniu węgla i biomasy

- 3) Płomień stabilny przy zapłonie paliwa bardzo blisko wylotu palnika pyłowego, w praktycznie stałej odległości, jak na rysunku 4. Charakterystyczny dla spalania czystego pyłu węglowego.



Rys. 4. Sekwencja obrazów zarejestrowana podczas spalania stabilnego przy spalaniu pyłu węglowego

- 4) Płomień stabilny jak w punkcie 3), ale w warunkach zmniejszonego wydatku paliwa stałego, przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 5. Sekwencja obrazów zarejestrowana podczas spalania stabilnego przy zmniejszonym wydatku paliwa stałego

3. Wyniki badań i dyskusja wyników

Analiza kształtu płomienia została poprzedzona jego wyodrębnieniem w badanej sekwencji obrazów. Podczas prezentowanych badań, luminancja obszaru płomienia w rejestrowanych obrazach była znacznie większa niż jakiegokolwiek innego obiektu. Dlatego segment obrazu odpowiadający płomieniowi mógł zostać łatwo określony na podstawie amplitudy pikseli. Przyjęto arbitralnie, że rozpatrywany piksel należał do obrazu płomienia, jeżeli jego amplituda była nie mniejsza niż 75% wartości maksymalnej.

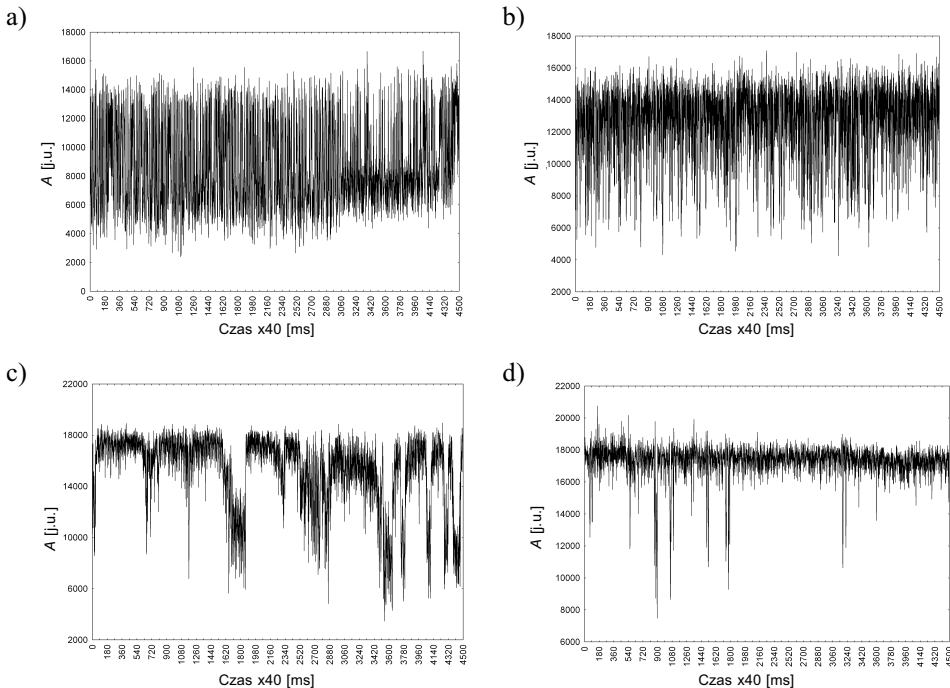
Analiza kształtu płomienia polegała na zbadaniu niektórych jego cech, a w szczególności:

- masy,
- współrzędnych środka ciężkości,
- długości konturu.

Masa A jest miarą intensywności świecenia obszaru płomienia, zdefiniowana jako suma funkcji jasności $f(x, y)$ wszystkich pikseli o współrzędnych x, y , zakwalifikowanych jako obraz płomienia:

$$A = \sum_{x,y} f(x, y) \quad (1)$$

Przebiegi zmienności w czasie parametru A , odpowiadające scharakteryzowanym powyżej rodzajom płomieni, zostały przedstawione na rysunkach 6a–d. Jeśli piksele obrazu płomienia tworzą obszary rozłączne, wówczas masa całego obszaru płomienia stanowi sumę mas poszczególnych obszarów.

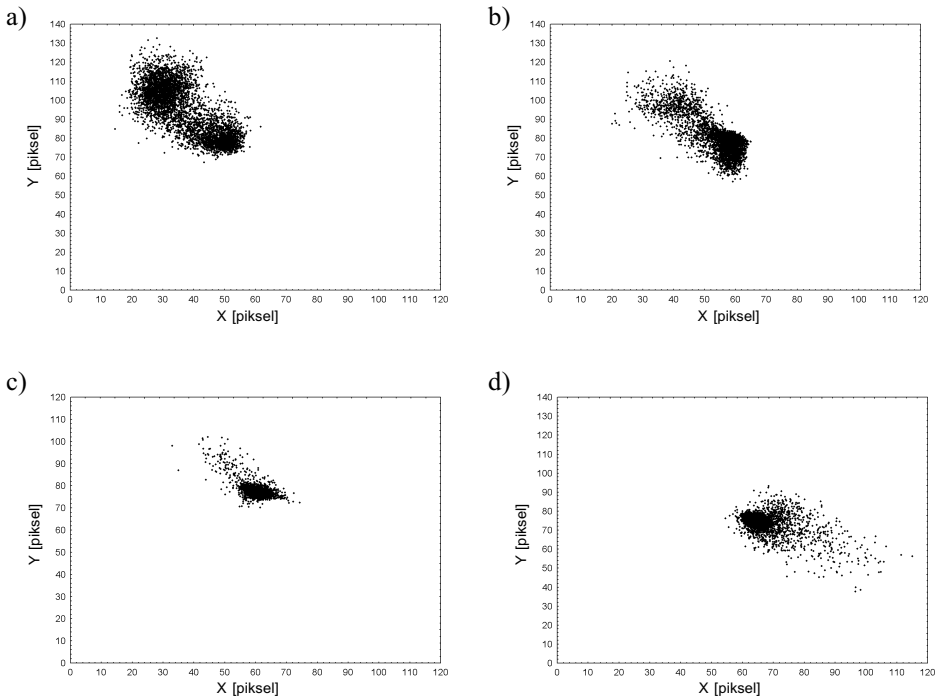


Rys. 6. Zmiany masy obszarów płomienia wyznaczonych dla różnych warunków przebiegu procesu spalania odpowiednio: stabilnego (a); niestabilnego (b); stabilnego przy zapłonie przy palniku (c); stabilnego przy zmniejszonym wydatku paliwa (d)

Współrzędne środka ciężkości obrazu płomienia wyznaczone są jako znormalizowane momenty $m_{0,1}$ i $m_{1,0}$, przy czym moment $m_{p,q}$ wyznaczany jest na podstawie zależności:

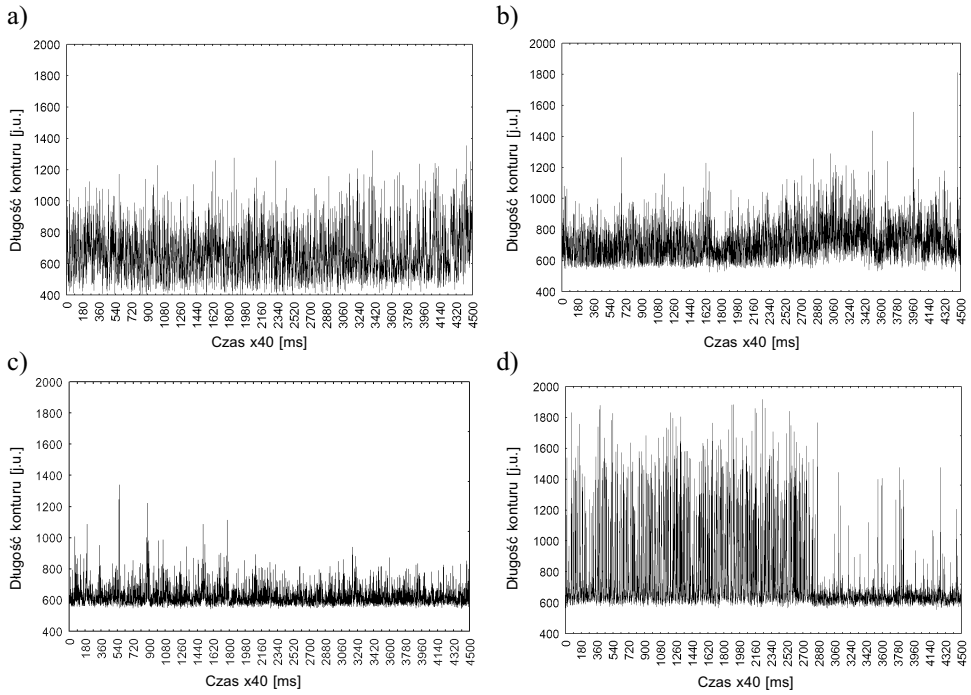
$$m_{p,q} = \frac{1}{A} \sum_{x,y} x^p y^q f(x,y) \quad (2)$$

Zmiany położenia środka ciężkości obrazu płomienia przedstawione są na rysunkach 7a–b.



Rys. 7. Zmiany położenia środka ciężkości obszarów płomienia scharakteryzowanych odpowiednio (a–d) jako: 1), 2), 3), 4)

Długość konturu stanowi sumę odległości pomiędzy pikselami wchodzącymi w skład konturu, 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, odpowiadający scharakteryzowanym powyżej rodzajom płomienia zostały przedstawione na rysunkach 8a–d.



Rys. 8. Zmiany długości konturów obszarów płomieni scharakteryzowanych odpowiednio (a–d) jako: 1), 2), 3), 4)

3.1. Dyskusja wyników

Stan spalania niestabilnego może zostać stwierdzony na podstawie przedstawionych wcześniej parametrów kształtu płomienia. Jak widać na rysunku 6a, takim warunkom spalania towarzyszy stosunkowo niewielka wartość średnia i duża zmienność masy obszaru płomienia. Z drugiej strony, jeszcze większa zmienność omawianego parametru występuje przy spalaniu stabilnym ze zmniejszonym wydatkiem paliwa stałego (rys. 6d), ale wartość maksymalna przybiera tu większe wartości. Środek ciężkości obszaru płomienia przy spalaniu niestabilnym (rys. 7a) wykazuje dużą zmienność położenia, koncentrując się wokół dwóch miejsc, podczas gdy przy spalaniu stabilnym, a zwłaszcza przy spalaniu czystego węgla (rys. 7c), zmienność tego parametru jest stosunkowo niewielka. W podobny sposób można charakteryzować płomienie pyłowe za pomocą ostatniego z prezentowanych wskaźników – długości konturu. Spalaniu stabilnemu i to niezależnie czy spalany jest czysty węgiel (rys. 8c), czy we współspalaniu z biomasą (rys. 8b), towarzyszy prawie jednakowa wartość minimalna tego parametru.

4. Wnioski

Przytoczone analiza pokazuje, że proste wskaźniki geometryczne mogą zostać użyte do charakteryzowania procesu spalania, umożliwiając łatwe wykrywanie stanów awaryj-

nych. 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. Wrażliwość poszczególnych parametrów na zmiany punktu pracy palnika zależy od rozmiarów i kształtu komory spalania oraz stosowanego palnika i sposobu umiejscowienia przetwornika wizyjnego.

Wyniki przeprowadzonych analiz pozwalają stwierdzić, że użycie obrazu płomienia jest celowe do jakościowej oceny procesu spalania paliw stałych. Takie rozwiązanie jest uzasadnione zwłaszcza w przypadku większej liczby palników, pracujących np. w kotle energetycznym, gdzie detekcja stanów awaryjnych zwiększy bezpieczeństwo obsługi oraz przyczyni się do bardziej efektywnego prowadzenia procesu spalania.

Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że wymienione parametry obrazu płomienia mogą być wyznaczane w czasie rzeczywistym, przy rozdzielczościach rzędu 200×200 pikseli. Pozwala to na wykorzystanie tanich przetworników obrazowych.

Literatura

- [1] Baek W.B., Lee S.J., Baeg S.Y., Cho Ch.H., *Flame image processing & analysis for optimal coal firing of thermal power plant*. Proceedings. ISIE 2001, IEEE International Symposium on Industrial Electronic, vol. 2, 2001, 928–931.
- [2] Lu G., Gilbert G., Yan Y., *Vision based monitoring and characterisation of combustion flames*. Journal of Physics: Conference Series 15, 2005, 194–200.
- [3] Marques J.S., Jorge M.P., *Visual inspection of a combustion process in a thermoelectric plant*. Signal Processing, Elsevier, vol. 80, 2000, 1577–1589.
- [4] Wójcik W., Smolarz A., Kotyra A., Wojciechowski C., Komada P., *Fibre optic flame monitoring system*. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, “Lightguides and their Applications”, vol. 4239, 2000, 129–131.