

Zastosowanie wymiaru fraktalnego do analizy obrazów płomienia w procesie współspalania

Streszczenie. W pracy przedstawiono możliwość zastosowania wymiaru fraktalnego do identyfikacji stanu procesu współspalania pyłu węglowego i biomasy. Przebadano dziewięć wariantów (klas) procesu współspalania z różnymi wartościami mocy cieplnej, wydatku powietrza i paliwa, przy 30% udziale biomasy. Wyniki pokazały, że wartość średnia wymiaru fraktalnego (szacowanego różnymi metodami) wykazuje tendencję do grupowania, co stwarza możliwości wykorzystania tego narzędzia w systemie automatycznej klasyfikacji.

Abstract. This paper presents use of the fractal dimension to identify co-firing pulverized coal and biomass process state. In research nine variants (classes) of co-firing process with different heating power, fuel at 30% of the biomass share and air flow were tested. Experimental results show that average value of fractal dimensions (estimated by various methods) tends to group, which makes possibilities to use this implements as the automatic classification system. (**The use of the fractal dimension for analysis of co-firing flame image**).

Słowa kluczowe: analiza fraktalna, wymiar fraktalny, płomień, współspalanie, analiza danych.

Keywords: fractal analysis, fractal dimension, flame, co-firing, data analysis.

Wstęp

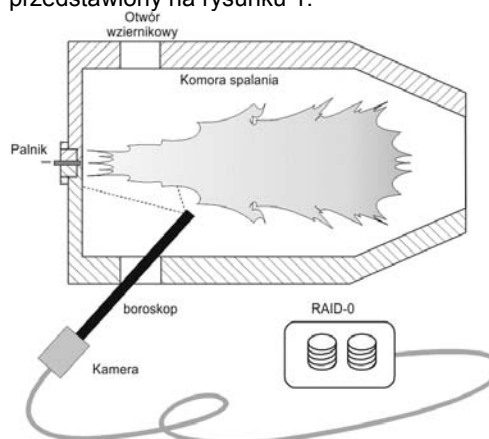
Podstawowym paliwem spalany w polskiej energetyce zawodowej o ugruntowanej technologii jego wykorzystania jest węgiel kamienny. Wprowadzanie coraz bardziej restrykcyjnych obostrzeń dotyczących ochrony środowiska wymaga działań w kierunku unowocześnienia pracujących systemów oraz istniejących technologii spalania [1]. Podejmowane są próby redukcji ilości emisji związków szkodliwych do atmosfery, przy możliwie najlepszej sprawności. Jednym ze sposobów redukcji emisji szkodliwych związków jest współspalanie węgla i biomasy z wykorzystaniem istniejących instalacji energetyki zawodowej. Jednak biomasa posiada inne właściwości fizykochemiczne, niż węgiel kamienny, nie jest mieszaniną jednorodną, posiada inny stopień granulacji. Zwiększanie wagowego udziału biomasy w procesie współspalania obniża wydajność i sprawność kotła. Prowadzenie takiego procesu wymusza stosowanie monitorowania i diagnostyki stanu procesu spalania wszystkich paliw kopalnych [2].

Sygnał pochodzący z systemu monitorowania płomienia zawiera wiele informacji o procesie spalania, stąd jego analiza może przebiegać na wiele różnych sposobów. Jednym z nich jest analiza czasowo-częstotliwościowa [3, 4], analiza temperatury [5], analiza obrazu [6], oraz metody prognozowania szeregów czasowych z wykorzystaniem modeli ARMA i ARIMA [7]. W niniejszej pracy, dane z systemu monitorowania płomienia analizowane są w postaci szeregów czasowych parametrów geometrycznych płomienia, dla każdego wariantu współspalania. Po ustabilizowaniu się procesu w komorze spalania, wykorzystano pierwszy tysiąc obrazów, w odstępach 30 ms dla każdego z dziewięciu wariantów. Autorom nie są znane badania procesu współspalania pyłu węglowego i biomasy wykorzystujące wymienione parametry geometryczne płomienia. W pracy, wykorzystując analizę fraktalną, podjęto próbę rozróżnienia poszczególnych wariantów procesu współspalania.

Stanowisko pomiarowe

Badania spalania pyłu węglowego i rozdrobnionej biomasy przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym, zbudowanym z cylindrycznej komory spalania o długości ok. 2,5 m i średnicy ok. 0,7 m. Wewnątrz komory znajduje się, wykonany w skali 1:10 w stosunku do palników przemysłowych, model wirowego palnika pyłowego wraz z palnikiem olejowym. Obydwa palniki umieszczone są w jednej osi i mogą pracować jednocześnie. Mieszanka

paliwowa wraz z powietrzem pierwotnym dostarczana jest do palnika pyłoprzewodem. Istnieje możliwość niezależnej regulacji tak wydatku paliwa, jak i przepływu powietrza. Zmiana wydatku węgla i biomasy dokonywana jest poprzez regulację prędkości obrotowej podajnika. Podczas pracy stanowiska, komputerowy system akwizycji danych dokonuje pomiaru i rejestracji szeregu wielkości, m.in. prędkości przepływu powietrza pierwotnego, wtórnego, średnich temperatur w komorze, składu gazów w odległości 1 m od czoła palnika i na wylocie komory paleniskowej. Komora spalania zaopatrzona jest w dwa podłużne otwory rozmieszczone po obu jej stronach, które umożliwiają obserwację płomienia. W badaniach wykorzystano kamerę cyfrową z matrycą z pełnym przenoszeniem ramki, wyposażoną w interfejs CamerLink. Kamera przymocowana była do boroskopu wysokotemperaturowego, zainstalowanego we wzierniku komory spalania pod kątem ok. 45° do osi palnika. W celu ochrony części optycznej przed zabrudzeniami (sadzą, popiołem) i wpływem wysokiej temperatury, obrazowód chłodzony był wodą i przedmuchiwany sprężonym powietrzem. Ze względu na ograniczenia sprzętowe, w trakcie przeprowadzonych badań ograniczono szybkość rejestracji sekwencji obrazów do 150 klatek/s. Obrazy płomienia rejestrowane były w 24-bitowej skali RGB i ograniczone do rozmiarów 1280x1024 pikseli (bez kompresji). Widok komory spalania wraz z zaznaczonym umiejscowieniem kamery został przedstawiony na rysunku 1.



Rys.1. Widok ogólny stanowiska pomiarowego

Parametry procesu

Badania procesu współspalania pyłu węglowego i rozdrobnionej biomasy rozpoczęto od wygrzania laboratoryjnej komory spalania, podobnie jak ma to miejsce w przypadku kotłów przemysłowych. Testy wykonano dla dziewięciu wariantów, z różnymi ustawieniami mocy cieplnej (P_{th}), współczynnika wydatku powietrza (λ) dla stałej zawartości biomasy (30%). Dokładne wartości mocy cieplnej i współczynnika wydatku powietrza zestawiono w tabeli 1.

Wykorzystanie płomienia jako źródła informacji o procesie spalania jest jednym ze sposobów diagnozowania tego procesu. Informacja uzyskiwana z obrazu płomienia nie posiada praktycznie żadnych opóźnień. Obecność płomienia związana jest z miejscem w przestrzeni, której towarzyszy egzotermiczna reakcja utleniania. Trudno jest jednak w takim przypadku jednoznacznie wskazać granicę w której spalanie występuje, ponieważ stężenia reagentów nie zmieniają się w sposób skokowy. W płomieniu pyłowym, głównym źródłem promieniowania jest obłok rozgrzanych do wysokiej temperatury cząstek stałych (pyłu węglowego, sadzy, popiołu itp.). Występujące w płomieniu zjawiska pochłaniania i rozpraszania promieniowania wprowadzają dodatkowe niejednoznaczności w określeniu granicy płomienia.

Tabela 1. Warianty procesu spalania

Wariant	P_{th} , kW	λ	Paliwo, kg/h	Powietrze wtórne, nm^3/h
1	250	0,75	36,0	73,2
2	250	0,65	39,4	62,9
3	250	0,85	35,2	103,6
4	300	0,75	43,5	96,4
5	300	0,65	42,6	67,4
6	300	0,85	44,2	132,5
7	400	0,75	59,7	181,3
8	400	0,65	56,8	152,8
9	400	0,85	59,4	205,1

Na podstawie przeprowadzonych badań, m.in. metod gradientowych i poziomicowych, do analizy wybrano obszary płomienia wyznaczone metodą aktywnego konturu. Wybór metody podyktowany był najkrótszym czasem uzyskania wyniku w postaci zamkniętego konturu. Pozwoliło to na analizę kształtu płomienia z wykorzystaniem geometrycznych wskaźników kształtu, deskryptorów Fouriera lub falkowych.

W ramach przeprowadzonych badań, podjęto próbę identyfikacji stanu procesu współspalania węgla i biomasy za pomocą jednego z narzędzi chaosu (wymiaru fraktalnego). Do analizy wykorzystano deskryptory kształtu: obszar oraz długość konturu płomienia. Pole powierzchni obszaru A jest zdefiniowane jako miara wielkości obiektu i obliczane na podstawie sumy liczby pikseli wewnątrz i na brzegu danego obszaru. W przypadku tak zdefiniowanego pola powierzchni obszaru, stopnie szarości poszczególnych pikseli nie są brane pod uwagę. Długość konturu L obliczana jest jako suma odległości pomiędzy pikselami rozpatrywanego brzegu obszaru z zależności (1)

$$(1) \quad L = aN_b - bN_w$$

gdzie: N_b – liczba zewnętrznych boków punktów konturu, N_w – liczba wierzchołków konturu, $a = \frac{\pi(1+\sqrt{2})}{8}$, $b = \frac{\pi}{8\sqrt{2}}$.

Taki sposób obliczania zapewnia estymator długości o zerowej wartości średniej i minimalnej wariancji dla odcinków nachylonych pod różnym kątem. Jeżeli piksele obrazu płomienia tworzą obszary rozłączne, wówczas długość konturu stanowi sumę długości poszczególnych

obszarów. Dla każdego z dziewięciu wariantów wyznaczono po tysiąc wartości długości konturu i pola powierzchni obszaru płomienia.

Analiza fraktalna

Analiza fraktalna dostarcza miary ilościowej w postaci wymiaru fraktalnego. Pojęcie fraktala zostało zdefiniowane przez Mandelbrota [8] i oznacza zbiór charakteryzujący się następującymi cechami:

- jest samopodobny (po wycięciu z niego dowolnie małej części i jej powiększeniu, powstaje obiekt, który wiernie naśladuje całość);
- jest opisywany zależnościami rekurencyjnymi, a nie wzorami matematycznymi;
- jego wymiar nie jest liczbą naturalną;
- ma naturalny wygląd („poszarpany”, „kłębiasty”, itp.).

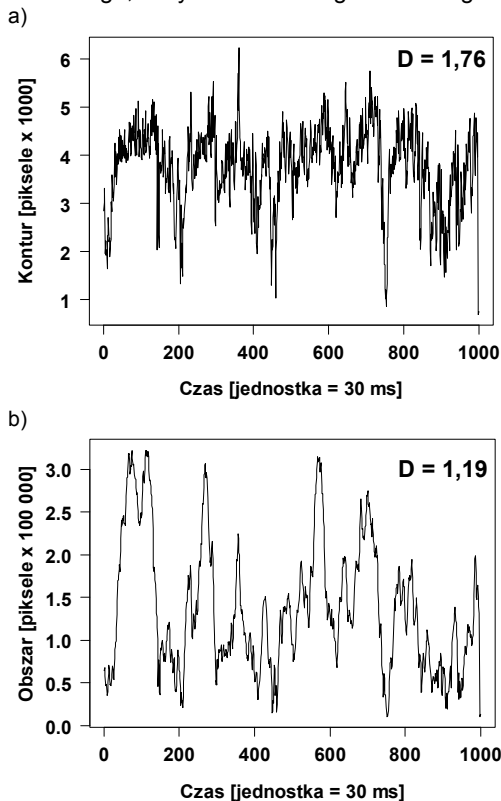
Wymiar fraktalny jest wykorzystywany w wielu dziedzinach prowadzonych badań jako jedno z kryteriów służących do automatycznej klasyfikacji i rozpoznawania obiektów. Przykładowe obszary jego zastosowania obejmują analizę i interpretację szeregów czasowych (np. notowania spółek giełdowych, kursy walut), sygnałów i obrazów medycznych (np. sygnały EEG, obrazy MRI mózgu), rozpoznawanie skupisk zieleni, zmienności gatunkowej roślin, linii brzegowych, zjawisk atmosferycznych, czy też identyfikację osób na podstawie tęczy oka. Podczas szacowania wymiaru fraktalnego wykorzystywana jest koncepcja samopodobieństwa. Wyraża się ona w tym, iż obiekt składa się z kopii (odpowiednio przekształconych) części samego siebie. Cechę tę można zauważyć na przykładzie większości obiektów obserwowanych w naturze (linie brzegowe, chmury, góry, drzewa, domy, twarze, skrzydła motyli, skorodowany metal, itd.).

Wymiar fraktalny charakteryzuje stopień złożoności obiektów wykorzystując ocenę tego, jak szybko wzrastają długość, powierzchnia czy objętość, jeśli pomiar dokonywany jest z coraz większą dokładnością. W przypadku obiektów fraktalnych wykorzystana jest zasada, że dwie wielkości – długość, powierzchnia czy objętość z jednej strony a stopień dokładności z drugiej – nie zmieniają się w sposób dowolny lecz są związane prawem potęgowym, które pozwala wyznaczyć jedną wartość na podstawie drugiej. Istnieje wiele estymatorów wymiaru fraktalnego [9], wśród których największe znaczenie posiadają:

- wymiar Richardsons – otrzymywany przez zliczanie liczby kroków potrzebnych do przemierzenia konturu w funkcji długości kroku;
- wymiar Minkowskiego – obliczany za pomocą metody cyrklowej, polegającej na poszukiwaniu liniowej zależności pomiędzy logarytmami długości badanej krzywej i rozstawu cyrkla użytego do jej pomiaru;
- wymiar Kolomogorowa (wymiar pojemnościowy) – otrzymywany przez zliczanie kwadratowych (lub sześciennych) elementów pokrywających badany zbiór.

Z punktu widzenia zastosowania, wymiar fraktalny jest miarą uniwersalną, ponieważ można jej użyć zarówno dla obiektów jednowymiarowych (szeregi czasowe), dwuwymiarowych (obrazy), jak i trójwymiarowych. Wartość wymiaru fraktalnego zawiera się w przedziale ograniczonym od dołu wymiarem euklidesowym obiektu, a od góry – wymiarem przestrzeni, w której dany obiekt jest zanurzony. Dla szeregów czasowych jest to przedział $<1; 2>$. Im bardziej wymiar fraktalny będzie zbliżony do 1, tym bardziej wykres szeregu czasowego będzie zbliżony do linii prostej (mała liczba zmian i mniejsze zagęszczenie na płaszczyźnie). Jeżeli wymiar fraktalny będzie zbliżony do 2, wykres będzie się bardziej zagęszczał na płaszczyźnie

(częstsze zmiany w różnych kierunkach). Podłoże takiego zachowania doskonale wyjaśnia charakterystyka wymiaru fraktalnego sformułowana przez Petersa [10]. Zgodnie z nią, wymiar fraktalny, który opisuje w jaki sposób szereg czasowy wypełnia swoją przestrzeń, jest wynikiem wszystkich czynników wpływających na system, którego wytworem jest dany szereg czasowy. Rysunek 2 ilustruje przykładowy związek między wartością wymiaru fraktalnego, a wykresem szeregu czasowego.



Rys. 2. Przykładowe szeregi czasowe parametrów geometrycznych płomienia dla wariantu nr 6 oraz ich wymiar fraktalny (D) oszacowany metodą Hall-Wood: a) długość konturu; b) obszar

Dla rzeczywistych obiektów nie można obliczyć wymiaru fraktalnego w sposób analityczny, dlatego opracowano szereg metod numerycznych, które podają jego wartość przybliżoną [11]. Szeregi czasowe wykorzystane w niniejszej pracy odpowiadały dwóm cechom geometrycznym, pierwszą była długość konturu płomienia, a drugą – pole powierzchni jego obszaru. W celu uzyskania materiału do badań, w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono testy spalania mieszanin pyłu węglowego i biomasy, przy różnych wydatkach powietrza i paliwa.

Wyniki

Podczas analizy zastosowano siedem estymatorów wymiaru fraktalnego, które zostały porównane i dokładnie opisane w [12]. Były to: box-count, Hall-Wood, variogram, madogram, rodogram, incr1, Genton robust. Obliczenia wykonano w środowisku R, za pomocą funkcji zaimplementowanych w pakiecie fractalDIM [13]. Wartości wymiaru fraktalnego uzyskane różnymi metodami poddano analizie pod kątem występowania wyników odstających i ekstremalnych. Po ich wyeliminowaniu, obliczono średnią arytmetyczną i odchylenie standardowe wymiaru fraktalnego (tab. 2.).

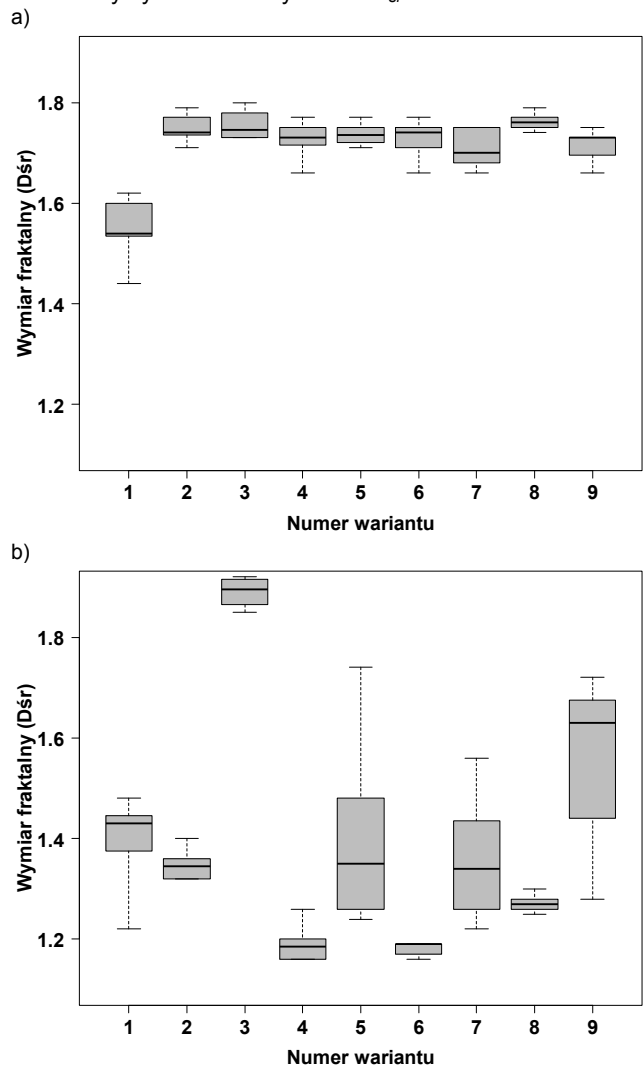
Wykresy pudełkowe prezentujące rozrzut wartości średniej wymiaru fraktalnego dla poszczególnych wariantów zamieszczono na rysunku 3. W przypadku parametru kontur (rys. 3a), występują 2 separowalne zakresy zmian

D_{sr} . Pierwszy zakres występuje dla wariantu nr 1, natomiast drugi – dla pozostałych wariantów.

Tabela 2. Wartość średnia (D_{sr}) i odchylenie standardowe (σ) wymiaru fraktalnego dla poszczególnych wariantów procesu spalania

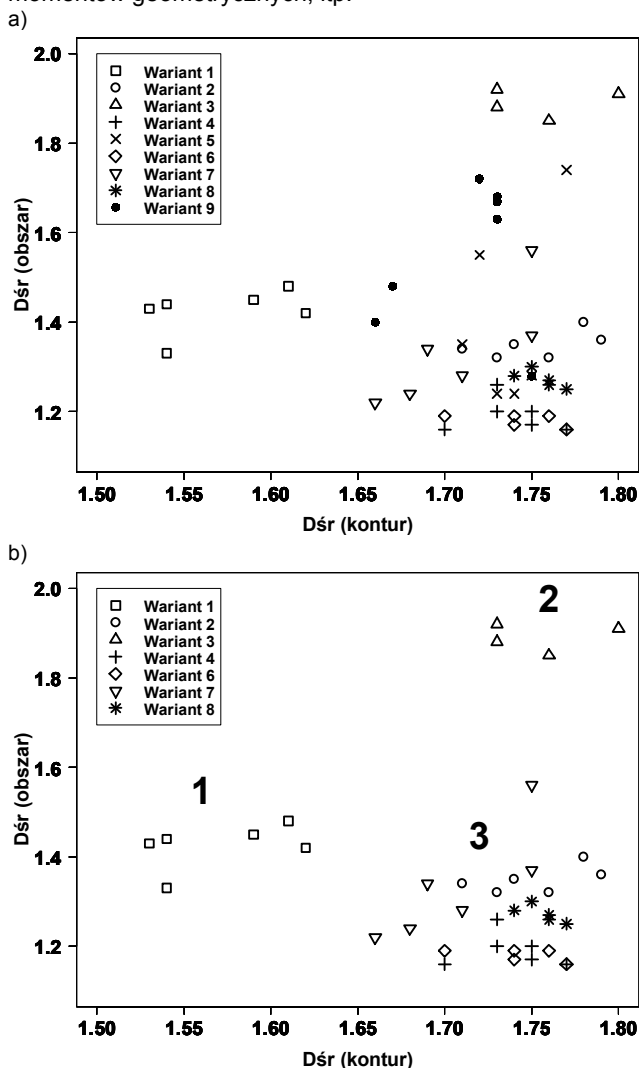
Wariant	Kontur		Obszar	
	D_{sr}	σ	D_{sr}	σ
1	1,55	0,06	1,40	0,09
2	1,75	0,03	1,35	0,03
3	1,76	0,03	1,89	0,03
4	1,73	0,04	1,19	0,04
5	1,74	0,02	1,40	0,19
6	1,73	0,04	1,18	0,01
7	1,71	0,04	1,36	0,13
8	1,76	0,02	1,27	0,02
9	1,71	0,03	1,55	0,17

Analizując podobnie wyniki dla parametru obszar (rys. 3b), można także wyróżnić 2 separowalne zakresy D_{sr} . W tym przypadku, pierwszy zakres występuje dla wariantu nr 3, a dla pozostałych wariantów – zakres drugi. Kolejną ważną informacją, którą można odczytać z wykresów przedstawionych na rys. 3. to fakt, iż dla parametru kontur, wartość D_{sr} jest dla wszystkich wariantów zdecydowanie większa (wyjątkiem jest wariant nr 3), niż dla drugiego parametru. Czyli, dla obu parametrów występują charakterystyczne zakresy zmian D_{sr} .



Rys. 3. Wykresy pudełkowe przedstawiające rozrzut wartości średniej wymiaru fraktalnego (D_{sr}) dla poszczególnych wariantów: a) wyniki dla parametru kontur; b) wyniki dla parametru obszar

Na rysunku 4. przedstawiono wykresy dwuwymiarowe, gdzie oś odciętych odpowiada D_{sr} dla parametru kontur, zaś oś rzędnych – dla parametru obszar. Taka postać wykresu pozwala zaobserwować tendencję do grupowania się wyników należących do poszczególnych wariantów. Wartości D_{sr} dla wszystkich wariantów zaprezentowano na rys 4a. Wykres ten nie daje jednak możliwości sformułowania wniosków na temat grupowania się wyników. Powodem jest dość duży rozrzut wartości D_{sr} parametru obszar dla wariantów nr 5 i 9, co widać doskonale na rys. 3b. Po usunięciu wyników należących do wariantów nr 5 i 9, otrzymujemy wykres przedstawiony na rys. 4b. Widać na nim 3 wyraźne obszary grupowania się wartości D_{sr} należących do poszczególnych wariantów. Fakt występowania separowalnych obszarów D_{sr} na rys. 4b stwarza możliwości wykorzystania uzyskanych wyników do automatycznej klasyfikacji poszczególnych wariantów procesu spalania. Obszar 1 odpowiada wariantowi nr 1, obszar 2 – wariantowi nr 3 i obszar 3 – wariantom nr 2, 4, 6, 7 i 8. Grupowanie się wyników należących do wariantów 2, 4, 6, 7 i 8 może oznaczać, iż charakteryzują się one podobnymi własnościami procesu spalania. Jednak do takiej konkluzji potrzebne są dalsze badania, szczególnie, uwzględnienie w analizie innych parametrów obszaru płomienia, np. współrzędnych środków ciężkości, momentów geometrycznych, itp.



Rys. 4. Grupowanie wartości średniej wymiaru fraktalnego: a) wszystkie warianty; b) pominięte warianty nr 5 i 9

Zastosowanie dodatkowych parametrów, może także pozwolić na separację wyników tych wariantów, które grupują się w obszarze nr 3. Efektem może być także poprawa tendencji do grupowania się wyników dla wariantów nr 5 i 9, dla których parametry kontur i obszar nie okazały się dość skuteczne.

Podsumowanie

Wyniki badań pokazały, że przy doborze odpowiednich parametrów geometrycznych płomienia, wymiar fraktalny może być zastosowany do rozróżniania poszczególnych wariantów procesu współspalania. Wykorzystanie dwóch parametrów, tj. konturu i obszaru, przy zredukowanej liczbie analizowanych wariantów do siedmiu, pozwoliło jednoznacznie zidentyfikować warianty nr 1 i 3. Uzyskanie podobnych efektów dla pozostałych wariantów wymaga dalszych badań i uwzględnienia dodatkowych parametrów geometrycznych płomienia. W świetle uzyskanych wyników, zastosowanie wymiaru fraktalnego do analizy obrazów płomienia wydaje się uzasadnione. Dalsze prace skoncentrowane będą na detekcji stanu procesu współspalania węgla i biomasy z wykorzystaniem innych cech geometrycznych oraz możliwości ich wykorzystania do sterowania procesem spalania w czasie rzeczywistym.

Autorzy: dr inż. Daniel Sawicki, Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Techniki Informatycznej, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: d.sawicki@pollub.pl, dr inż. Zbigniew Omiotek, Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Techniki Informatycznej, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: z.omiotek@pollub.pl, dr hab. inż. Andrzej Kotyra prof. PL, Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Techniki Informatycznej, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: a.kotyra@pollub.pl.

LITERATURA

- [1] Williams A., Jones J. M., Ma L., Pourkashanian M., Pollutants from the combustion of solid biomass fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2 (2012), 113 – 137
- [2] Wójcik W., Kotyra A., Smolarz A., Gromaszek K., Nowoczesne metody monitoringu i sterowania procesem spalania paliw stałych w celu zmniejszenia jego oddziaływania na środowisko naturalne, *Rocznik Ochrona Środowiska*, 13 (2011), 1559 – 1576
- [3] Lu G., Yan Y., Colechin M., Hill R., Monitoring of oscillatory characteristics of pulverized coal flames through image processing and spectral analysis, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 55 (2006), 226–231.
- [4] Cięszczyk, S., Ławicki T., Miaskowski, A., The Curvelet Transform Application to the Analysis of Data Received from GPR Technique, *Elektronika Ii Elektrotechnika*, 19 (2013), n.6, 99-102
- [5] Lu G., Yan Y., Temperature profiling of pulverized coal flames using multicolour pyrometric and digital imaging techniques. *IEEE*, 55 (2006), 1303–1308
- [6] González-Cencerrado A., Peña B., Gil A., Coal flame characterization by means of digital image processing in a semi-industrial scale PF swirl burner, *Applied Energy*, 94 (2012), 375–384
- [7] Wójcik W., Bieganski T., Kotyra A., Smolarz A., Forecasting of changes of flame flickering in coal flame burner, *Proceeding of SPIE*, 3189 (1997), 100-109
- [8] Mandelbrot B., *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman and Company, New York, (1982)
- [9] Normat F., Tricot C., Method for evaluation the fractal dimension of curves using convex hulls, *Physical Review A*, 43 (1991), n.12, 6518-6525
- [10] Peters E. E., *Teoria chaosu a rynki kapitałowe*, WIG-Press, Warszawa (1997)
- [11] Theiler J., Estimating Fractal Dimension, *Journal of the Optical Society of America*, 7 (1990), n.6, 1055-1073
- [12] Gneiting T., Sevcikova H., Percival D. B., Estimators of Fractal Dimension: Assessing the Roughness of Time Series and Spatial Data, *Statistical Science*, 27 (2012), n.2, 247-277
- [13] Pakiet fractaldim, <https://cran.r-project.org/web/packages/fractaldim/fractaldim.pdf>