

Diagnostyka procesu spalania
pyłu węglowego z wykorzystaniem
metod przetwarzania obrazu



Politechnika Lubelska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
ul. Nadbystrzycka 38A
20-618 Lublin

Andrzej Kotyra

Diagnostyka procesu spalania pyłu węglowego z wykorzystaniem metod przetwarzania obrazu



Politechnika Lubelska
Lublin 2010

Recenzenci:

Prof. dr hab. inż. Wojciech Mitkowski

Prof. dr hab. inż. Waldemar Wójcik

Redakcja i skład: Andrzej Kotyra

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2010

ISBN: 978-83-62596-01-0

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: Wydawnictwo-Drukarnia „Liber Duo”

ul. Długa 5, 20-346 Lublin

SPIS TREŚCI

1	WSTĘP.....	7
1.1	ISTOTA I ZNACZENIE DIAGNOSTYKI TECHNICZNEJ	12
1.2	METODY DIAGNOSTYKI PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH	15
1.3	CELE DIAGNOSTYKI PROCESU SPALANIA PYŁU WĘGLOWEGO	17
2	PROCES SPALANIA PYŁU WĘGLOWEGO	19
2.1	POCHODZENIE I CHARAKTERYSTYKA WĘGLA.....	20
2.2	SPALANIE POJEDYNCZEGO ZIARNA WĘGLA.....	24
2.3	SPALANIE WĘGLA W ŻAGWI	29
2.4	NISKOEMISYJNE TECHNIKI SPALANIA PYŁU WĘGLOWEGO	32
2.4.1	EFEKTY UBOCZNE NISKOEMISYJNYCH TECHNIK SPALANIA PYŁU WĘGLOWEGO	37
2.5	STABILNOŚĆ PROCESU SPALANIA	39
3	PŁOMIEŃ JAKO ŹRÓDŁO INFORMACJI O PROCESIE SPALANIA.....	42
3.1	STRUKTURA PŁOMIENIA PRZY SPALANIU NISKOEMISYJNYM	44
3.2	CHARAKTERYSTYKA PŁOMIENIA JAKO ŹRÓDŁA PROMIENIOWANIA.....	46
3.2.1	MECHANIZMY GENERACJI PROMIENIOWANIA W PŁOMIENIU PYŁOWYM.....	48
3.2.2	WIDMA EMISYJNE PŁOMIENIA PYŁOWEGO BADANE W WARUNKACH PRZEMYSŁOWYCH	52
3.2.3	WŁAŚCIWOŚCI OPTYCZNE PŁOMIENIA PYŁOWEGO.....	57
4	OBRAZY PŁOMIENIA I METODY ICH ANALIZY	60
4.1	OBRAZ PŁOMIENIA.....	61
4.2	WYZNACZANIE KRAWĘDZI PŁOMIENIA.....	63
4.3	PARAMETRY GEOMETRYCZNE PŁOMIENIA	67
4.4	DESKRYPTORY FOURIERA.....	71
4.5	ANALIZA SKŁADOWYCH GŁÓWNYCH.....	76
4.6	CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWE METODY ANALIZY SYGNAŁÓW	80
4.7	TRANSFORMATA CURVELET.....	82
5	OKREŚLENIE ISTOTNYCH DLA DIAGNOSTYKI STREF PŁOMIENIA – BADANIA WSTĘPNE	85
5.1	WYNIKI BADAŃ DLA PŁOMIENIA PYŁOWEGO W WARUNKACH PRZEMYSŁOWYCH.....	88

6	BADANIE DIAGNOSTYCZNE PROCESU SPALANIA PYŁU WĘGLOWEGO NA STANOWISKU LABORATORYJNYM Z WYKORZYSTANIEM METOD OPTYCZNYCH ...	90
6.1	STANOWISKO LABORATORYJNE	91
6.2	CECHY GEOMETRYCZNE OBSZARU PŁOMIENIA PRZY PROSTOPADŁYM USYTUOWANIU KAMERY (POŁOŻENIE 1)	94
6.3	PARAMETRY GEOMETRYCZNE OBSZARU PŁOMIENIA	97
6.4	REDUKCJA PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH OBRAZU PŁOMIENIA (POŁOŻENIE 1) ZA POMOCĄ ANALIZY SKŁADOWYCH GŁÓWNYCH.....	104
6.5	DESKRYPTORY FOURIERA OBSZARU PŁOMIENIA PRZY PROSTOPADŁYM USYTUOWANIU KAMERY (POŁOŻENIE 1)	106
6.6	ZASTOSOWANIE TRANSFORMATY CURVELET W ANALIZIE OBRAZU PŁOMIENIA PRZY PROSTOPADŁYM USYTUOWANIU KAMERY (POŁOŻENIE 1)	108
6.7	CECHY OBSZARU PŁOMIENIA PRZY USYTUOWANIU KAMERY POD KĄTEM 45 STOPNI (POŁOŻENIE 2)	110
6.8	REDUKCJA PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH OBRAZU PŁOMIENIA (POŁOŻENIE 2) ZA POMOCĄ ANALIZY SKŁADOWYCH GŁÓWNYCH.....	120
6.9	ANALIZA KSZTAŁTU PŁOMIENIA WYKORZYSTUJĄCA DESKRYPTORY FOURIERA (POŁOŻENIE 2)	122
6.10	BADANIE CZĘSTOTLIWOŚCI MIGOTANIA PŁOMIENIA PRZY POMOCY KAMERY CYFROWEJ.....	125
7	WYBÓR SYGNAŁÓW DIAGNOSTYCZNYCH	134
8	PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	136
	LITERATURA	139

1 Wstęp

Spalanie paliw kopalnych nadal jest najważniejszym źródłem wytwarzanej energii. Węgiel w świecie należy wciąż do kluczowych surowców energetycznych. W Polsce zaś jest źródłem prawie całej zużywanej energii elektrycznej. Ocenia się, że w horyzoncie czasowym około 50 lat będzie miał nadal dominującą pozycję. Niestety, taki sposób wytwarzania energii wiąże się z postępującym zanieczyszczeniem środowiska w postaci uwalnianych do atmosfery wielkich ilości gazów spalinyowych i pyłów [1]. Ograniczenie ilości generowanych zanieczyszczeń towarzyszących procesowi spalania przy zapewnieniu efektywności jego prowadzenia, jest jednym z najważniejszych zadań stojących przed zespołami badawczymi zajmującymi się tą problematyką na całym świecie.

Aktualne trendy w gospodarce Unii Europejskiej wymuszają ograniczenie lub eliminowanie oddziaływania na środowisko, narzucając wysokie wymagania m.in. na energetykę. Spełnienie tych wymagań jest trudne i bardzo kosztowne. Dodatkowo, praca bloku energetycznego przy czynnej pierwotnej i wtórnej regulacji częstotliwości oraz mocy (ARCM), dla spełnienia wymagań Krajowej Dyspozycji Mocy i Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity (UCPTE), wymusza ciągłe zmiany w założonym paśmie regulacyjnym. Taka sytuacja narzuca szczególnie ostre wymagania dla urządzeń, instalacji i układów automatycznej regulacji bloków, które muszą zapewnić, zarówno odpowiednią dynamikę w założonym paśmie zmian mocy, jak również odpowiednie warunki spalania. Z tego powodu, prowadzenie procesu spalania, który spełnia wymagania KDM, UCPTE i ochrony środowiska jest zadaniem niezmiernie trudnym.

Badania i analizy procesu spalania w kotle energetycznym oraz nowe konstrukcje urządzeń technologicznych umożliwiły podjęcie prób

rozwiązania problemu ograniczenia emisji tlenków azotu (NO_x), przy nie zwiększaniu emisji tlenku węgla (CO), metodą odpowiedniej organizacji procesu. Nie daje ona wprawdzie tak radykalnego zmniejszenia emisji NO_x jak metody katalityczne, ale wymaga nieporównywalnie niższych nakładów finansowych. Warunkiem osiągnięcia trwałych efektów jest, oprócz zmian w urządzeniach technologicznych, odpowiednie sterowanie procesem spalania.

Dotychczasowe rozwiązania preferowały nadążną regulację ilości powietrza za ilością pyłu węglowego, z nadrzędną korekcją zawartości wolnego tlenu (O_2) w spalinach.

Regulacja ta niestety nie zapewnia uzyskania odpowiednich chwilowych wartości parametrów, chociaż często w wartościach średnich daje pozornie zadowalające rezultaty. Nie zwraca się przy tym odpowiedniej uwagi na obniżanie sprawności, a to pociąga za sobą konieczność spalania dodatkowej ilości paliwa (pyłu węglowego) powodując w efekcie wzrost globalnych ilości emisji substancji szkodliwych dla środowiska.

W warunkach przemysłowych, proces spalania pyłu węglowego zachodzi najczęściej w kotłach energetycznych, wyposażonych zazwyczaj w kilkanaście palników naściennych, bądź pracujących w układzie tangencjalnym. Proces spalania optymalizowany jest dla całego kotła, pod kątem uzyskania pożądanego rozkładu temperatur oraz właściwego stosunku powietrze-paliwo, a nie dla każdego palnika z osobna. Rozdział mieszanki pyłowo-powietrznej pomiędzy poszczególne palniki jest nie równomierny i często zmieniający się w czasie, co jest przyczyną zmniejszenia efektywności procesu spalania oraz wzrostu emisji szkodliwych produktów spalania. Doświadczenia praktyczne wskazują, że pojedynczy, niewłaściwie pracujący palnik może powodować zwiększoną emisję NO_x i CO w układach wielopalnikowych [2].

W konwencjonalnych układach automatyki i sterownia procesu spalania w kotłach wielopalnikowych, sygnałami wejściowymi są zazwyczaj wydatki paliwa i powietrza (lub tlenu) oraz uśredniona zawartość

tłenu i CO w gazach spalinowych. Nie pozwala to na precyzyjną kontrolę stechiometrii spalania w obrębie pojedynczego palnika. Mierzone stężenia O₂ i CO w gazach spalinowych są uśrednione dla wszystkich pracujących palników i opóźnione [2], [3].

Właściwe sterowanie procesem spalania staje się zagadnieniem jeszcze ważniejszym, gdy uwzględnimy współspalanie węgla i biomasy (np. drewno odpadowe, uprawy energetyczne, osady ściekowe, itp.). W warunkach polskich, jest to jedna z częściej stosowanych metod wykorzystania paliw odnawialnych.

Zobowiązania przyjęte przez Polskę w negocjacjach z Unią Europejską przewidują wyprodukowanie w 2010 roku 7,5% krajowego zużycia energii elektrycznej z wykorzystaniem źródeł odnawialnych, zakładając, że 4% będzie pochodziło z biomasy. Najprostszym sposobem osiągnięcia tego celu jest współspalanie biomasy w istniejących kotłach energetycznych energetyki zawodowej [4], [5].

Najważniejszą zaletą stosowania biopaliwa jest zerowy bilans emisji głównego gazu cieplarnianego jakim jest dwutlenek węgla. Przyjmuje się, że ilość CO₂ zużywana w procesie fotosyntezy jest taka sama jak wydzielana podczas spalania biomasy. Dodatkowym atutem stosowania tego paliwa jest około 10-krotne zmniejszenie emisji tlenków siarki oraz 2-3 razy mniejsza emisja tlenków azotu. Obniżenie zawartości SO₂ w spalinach pozwala na rezygnację z kosztownej instalacji odsiarczania spalin.

Wykorzystanie biomasy w kotłach energetyczne oprócz niewątpliwych korzyści, ma także negatywne skutki [4], [6], [7]. Współspalanie biomasy z węglem wymaga najmniejszych nakładów inwestycyjnych, ale jest to okupione stosunkowo niską efektywnością spalania [8]. Wymaga ono dostarczenia do kotła energetycznego odpowiednio rozdrobnionej mieszaniny paliwa i powietrza. Potrzebne są więc dodatkowe urządzenia do transportu i wstępnego rozdrobnienia biomasy, która podawana jest razem z pyłem węglowym do zespołów młynowych, gdzie oprócz

dotatkowego rozdrobnienia, następuje również mieszanie paliwa. Często jednak bywa tak, że gromadząca się w młynie biomasa blokuje przepływ rozdrobnionego paliwa, powodując nadmierne nagrzewanie się elementów młyna, a stosunkowo niska temperatura zapłonu wraz z dużą zawartością części lotnych sprzyja samozapłonowi.

Wprowadzanie biomasy czyni proces spalania trudniejszym w prowadzeniu, gdyż często posiada ona strukturę włóknistą, jak np. zrębki drzewne. Prowadzi to do sytuacji, w której biomasa jest w młynie miażdżona a nie kruszona, jak ma to miejsce w przypadku węgla. Posiada ona niższą gęstość niż węgiel i zdecydowanie większą wilgotność, co powoduje, że podczas transportu paliwa te mają tendencje do rozwarstwiania się. Problem ten uwidacznia się już w ciągu nawęglania. Mieszanka pyłu węglowego i biomasy, trafiając do zasobnika, z którego następnie podawana jest do palników, pod wpływem drgań ulega swoistemu przesianiu. Chwilowy stosunek mas spalanych paliw może się przez to znacząco zmieniać. Fluktuacje składu paliwa dostarczanego do palnika odbijają się niekorzystnie na jego pracy, a także na pracy całego kotła. W takiej sytuacji stosowanie odpowiednich układów kontrolno-pomiarowych i monitorujących staje się niezbędne [9], [10].

Mimo wprowadzenia sterowania cyfrowego, wykorzystując do jego wypracowywania zmienne procesowe i opóźnione oraz uśrednione stężenia wybranych gazów w spalinach, z trudnością są spełniane obowiązujące obecnie normy (Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 lipca 2001 r.). Dyrektywy unijne, zaostżające normy emisyjne, są wprowadzane od 2008 roku, a staną się obowiązujące od 2013 roku. Spowodują one konieczność zmian aktualnie stosowanych układów sterowania, które powinny zostać uzupełnione o efektywne układy diagnostyczne. Spełnienie tych ostrych wymagań spowodowało utworzenie szeregu programów badawczych, realizowanych tak w Unii Europejskiej, jak i w USA, Chinach i Japonii.

Efektywny sposób prowadzenia procesu spalania, biorąc pod uwagę koszty i włączając w to emitowane zanieczyszczenia, wymaga stosowania rozwiązań, które pozwoliłyby na utrzymywanie procesu spalania w optymalnych warunkach. Preferowane są metody nieinwazyjne, zapewniające poprawne działanie w warunkach wysokiej temperatury, zapylenia i wibracji. Wiele spośród nich wykorzystuje płomień jako źródło informacji o procesie spalania, wykorzystując w tym celu promieniowanie w zakresie od ultrafioletu do bliskiej podczerwieni [11], [12]. Emitowane promieniowanie składa się z linii emisyjnych substancji chemicznych biorących udział w procesie spalania oraz widma ciągłego, którego źródłem są cząstki stałe, takie jak sadza, pył węglowy, popiół, itp.

Optyczne metody diagnostyczne są stosowane w praktyce, których przykładem mogą być czujniki zaniku płomienia. Zdecydowana większość spotykanych rozwiązań, wykorzystuje informację zawartą w intensywności świecenia płomienia [13], [14], [15]. Jako przykład mogą posłużyć rozwiązania firm, np. BFI Automation, Durag, Fireye, Land. Zasadniczym problemem, który pojawia się podczas ich eksploatacji jest możliwość zabrudzenia układu optycznego. Dlatego konieczne staje się właściwe zaprojektowanie urządzenia, odbierającego sygnał optyczny pochodzący z płomienia (głowica pomiarowa). Problem ten szczegółowo został przedstawiony w [16], [17].

Podczas instalacji skanera płomienia w warunkach przemysłowych, niezbędną czynnością jest eksperymentalne ustawienie przestrzenne głowicy pomiarowej w pobliżu pracującego palnika, tak aby zapewnić możliwie największą wrażliwość sygnałów wyjściowych na dokonywane czynności regulacyjne (np. zmiany wydatków powietrza pierwotnego, powietrz wtórnych, wydatku paliwa).

Do głównych problemów związanych z eksploatacją skanerów płomienia, oprócz możliwości brudzenia się układu optycznego i związanego z tym spadkiem mocy docierającej do fotodetektora, są zakłócenia pochodzące od sąsiednich palników oraz rozgrzanych ścian komory

spalania. Większość stosowanych rozwiązań wykorzystuje informację związaną z migotaniem (pulsowaniem) płomienia, co wiąże się z analizą składowej zmiennej sygnału uzyskanego z fotodetektora. W tym celu wykorzystuje się częstotliwościowe i czasowo-częstotliwościowe metody analizy sygnałów – transformatę Fouriera, krótkoczasową transformatę Fouriera, transformatę falkową [18], [11], metody prognozowania szeregów czasowych z wykorzystaniem modeli ARMA i ARIMA [19] oraz analizy wykorzystujące algorytmy sztucznej inteligencji [20], [21], [22], [23].

Zaawansowana analiza sygnału fotodetektora pozwala na zastosowanie skanerów płomienia do diagnostyki procesu spalania nie ograniczającej się tylko do detekcji zaniku płomienia [24], ale także pozwalającej na detekcję zmian przebiegu procesu spalania w obrębie pojedynczego palnika [25], [26], zwłaszcza ze względu na emisję NO_x . Oprócz skanerów jednostrefowych, istnieją również skanery wielostrefowe pozwalające na pomiar intensywności i pulsacji płomienia w kilku strefach płomienia jednocześnie, dzięki odpowiednio zaprojektowanemu układowi optycznemu [12], [27]. Rozszerza to możliwości diagnostyczne urządzenia, np. o możliwość śledzenia odsuwania się płomienia od palnika [28]. Zwiększanie ilości obserwowanych stref płomienia prowadzi do jakościowo innego podejścia do problemu diagnostyki procesu spalania, jakim jest wykorzystanie przetwarzania obrazu płomienia [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35].

1.1 Istota i znaczenie diagnostyki technicznej

Coraz większa złożoność stosowanych środków technicznych, i z drugiej strony, konieczność ich niezawodnego działania doprowadziły do poszerzenia terminu diagnostyka na urządzenia techniczne i procesy przemysłowe. W ten sposób powstała nowa dziedzina wiedzy, jaką jest diagnostyka techniczna. Termin diagnostyka – z gr. *diagnostikós*

umiejący rozpoznawać, *diágnōsis*, wyróżnianie, diagnoza, decyzja, do niedawana używany był wyłącznie w kontekście medycznym, oznaczającym rozpoznanie choroby.

Obszar zainteresowania diagnostyki technicznej początkowo ograniczony do urządzeń mechanicznych, stopniowo był poszerzany o urządzenia elektryczne, układy elektroniczne, a ostatnio także o procesy technologiczne i układy sterowania [36]. Diagnostyka, procesów przemysłowych jest intensywnie rozwijaną dziedziną wiedzy. Szczególne znaczenia nabiera ona w cechujących się dużym stopniem złożoności instalacjach technologicznych, spotykanych np. energetyce, przemyśle chemicznym, petrochemicznym itp, dla których aspekt niezawodności ma fundamentalne znaczenie.

Diagnostyka procesów przemysłowych, jak zostało to zdefiniowane w monografii [36], zajmuje się rozpoznawaniem zmian stanów tych procesów, które dają się zdefiniować jako ciąg celowych działań realizowanych w ustalonym czasie przez określony zbiór maszyn i urządzeń przy określonych dostępnych zasobach. Tak rozumiane diagnozowanie traktowane jest jako wykrywanie i rozróżnianie uszkodzeń obiektu na podstawie analizy zebranych i odpowiednio przetworzonych sygnałów diagnostycznych, przy czym sygnały diagnostyczne są dowolnymi wielkościami będącymi nośnikiem informacji o stanie obiektu diagnozowania.

W wielu procesach przemysłowych występują newralgiczne ogniwa, które narażone są szczególnie na oddziaływanie wszelkiego rodzaju zagrożeń technologicznych. W procesach energetycznych takim ogniwem jest kocioł i zachodzący w nim proces spalania, który z jednej strony determinuje parametry procesowe wytwarzania energii oraz jego ekonomikę, z drugiej zaś decyduje o zanieczyszczeniu środowiska naturalnego. Często wymagania i ograniczenia występujące przy spełnianiu różnych kryteriów (np. ekonomicznych, środowiskowych, technologicznych) są ze sobą sprzeczne. Należy więc znajdując kompromisy realizować proces

w taki sposób, aby nie przysporzył on zagrożeń w sensie destrukcji jakiejś części instalacji technologicznej.

Jednym z celów tak rozumianej diagnostyki jest wczesne wykrywanie oraz dokładne rozpoznanie stanów awaryjnych. Problem nabiera istotnego znaczenia w przypadku wzrostu ilości i złożoności układów sterujących procesem, pomimo stosowania komponentów o wysokiej niezawodności. Układy realizujące zadania diagnostyki technicznej pozwalają na znaczne skrócenie czasu wykrycia i lokalizacji awarii w porównaniu z diagnostyką realizowaną przez operatora.

Nie bez znaczenia są także możliwe błędy popełniane przez personel nadzorujący dany proces. Sytuacje awaryjne, powstające w trakcie trwania procesu technologicznego, powodują jego zakłócenie, a w skrajnych przypadkach – prowadzą do jego całkowitego zatrzymania. Straty ekonomiczne w takich przypadkach mogą być bardzo duże, nie wspominając o możliwości powstawania zagrożeń dla życia ludzkiego bądź środowiska naturalnego.

Innym celem prowadzonej diagnostyki jest zmniejszenie kosztów remontów. W praktyce przemysłowej, remonty rozmaitych urządzeń wykonawczych i pomiarowych wykonywane są zazwyczaj okresowo, według założonego harmonogramu. Proces technologiczny jest wówczas zatrzymywany, a urządzenia kontrolowane niezależnie od ich stanu technicznego.

Diagnostyka procesu spalania powinna obejmować zbieranie i następnie przetwarzanie wybranych informacji procesowych w czasie rzeczywistym w celu rozpoznania jego nieprawidłowych stanów. Złożoność procesów pociąga za sobą zwiększenie częstotliwości uszkodzeń elementów składowych ciągów technologicznych. Powoduje to, że mogą nastąpić sytuacje, w których pojawia się wiele informacji świadczących o wystąpieniu nieprawidłowości (alarmów). Mogą być one poważnym problemem dla operatora. Dlatego istotnego znaczenia nabierają zagadnienia monitoringu i diagnostyki procesów. Niezbędne

staje się tu wsparcie odpowiednimi algorytmami diagnostycznymi, które będą w stanie ocenić poziom zagrożenia.

Jak wcześniej wspomniano, newralgicznym ogniwem w procesach energetycznych jest kocioł. Dla prawidłowej oceny przebiegu procesu spalania niezbędnym jest wyposażenie każdego palnika w układ monitorowania i diagnostyki. Następnym etapem winno być wprowadzenie możliwości indywidualnego sterowania palnikami. Takie podejście pozwoli na wykorzystanie w pełni możliwości prowadzenia procesu spalania bliskie optymalnemu [37], [38].

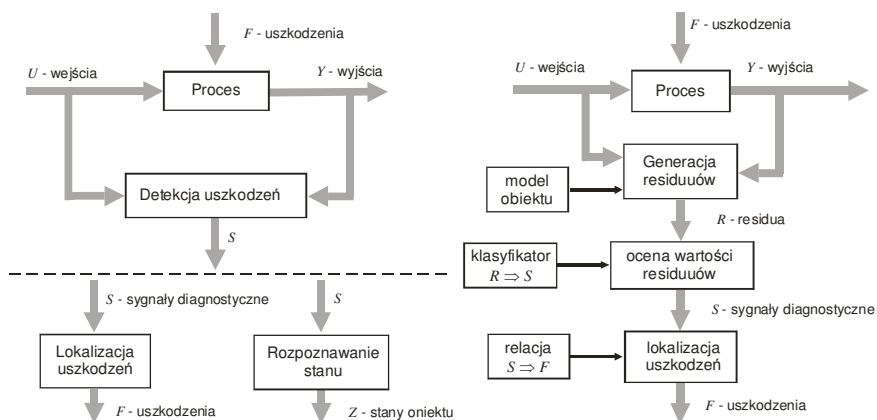
1.2 Metody diagnostyki procesów przemysłowych

Diagnostyka procesu przemysłowego dokonywana na podstawie analizy stanu, w jakim on się znajduje. Stan procesu technologicznego definiowany jest jako zbiór ocen odchyień rozpatrywanego stanu od stanu uznawanego za referencyjny [36]. W procesie diagnostycznym można wyróżnić trzy fazy [39]:

- detekcji,
- lokalizacji,
- identyfikacji uszkodzeń.

Najczęściej, proces diagnostyczny bywa ograniczony do dwóch pierwszych faz. W fazie detekcji, w wyniku przetwarzania zmiennych procesowych, wykrywane są symptomy uszkodzeń. Na ich podstawie, w fazie lokalizacji wskazywane są zaistniałe uszkodzenia.

Istnieje wiele sposobów realizowania procesu diagnostycznego. Może on odbyć się z wykorzystaniem modelu matematycznego, który może mieć postać analityczną, neuronową, rozmytą procesu bądź bez modelu. Schemat diagnostyki procesu obejmujący fazę detekcji i lokalizacji przy braku modelu procesu został przedstawiony na rys. 1.1 a), a w przypadku jego obecności – na rys. 1.1 b).



Rys. 1.1. Schemat diagnostyki procesu: a) bez stosowania modelu procesu, b) z użyciem modelu procesu [36]

Faza detekcji w diagnostyce z modelem procesu, obejmuje generację residuów z wykorzystaniem modeli analitycznych, neuronowych, rozmytych lub innych. Ocena wartości residuów odbywa się w sposób pośredni – na podstawie sygnałów diagnostycznych, które są dowolnymi wielkościami, będącymi nośnikami informacji o stanie diagnozowanego procesu i pozwalającymi na wykrycie jego nieprawidłowego stanu.

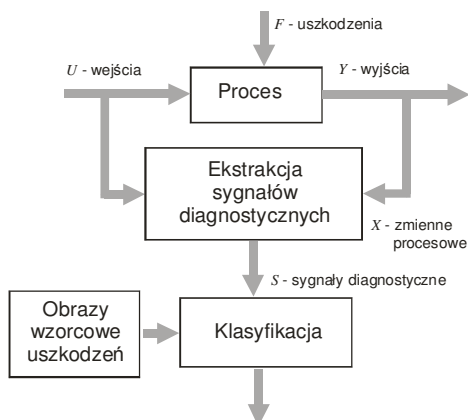
Często dany model procesu jest nie dość dokładny lub zbyt złożony. W takim przypadku stosowane są metody kontroli ograniczeń lub kontroli związków występujących między zmiennymi procesowymi [36].

Inny sposób diagnostyki procesów wykorzystuje ciągle zmienne procesowe, na które składają się sygnały wejściowe i wyjściowe. Fazy detekcji i lokalizacji uszkodzeń są w takim przypadku połączone, a klasyfikacja stanu obiektu dokonywana jest często z wykorzystaniem sieci neuronowych [36].

Diagnozowanie procesu może być również traktowane jako rozpoznawanie wzorców. W takim przypadku wyróżniane są fazy:

- ekstrakcji symptomów, odpowiadającej fazie detekcji uszkodzeń,
- klasyfikacji uszkodzeń lub stanu obiektu, równoważnej lokalizacji uszkodzeń.

Schemat diagnostyki procesu w takim ujęciu zaprezentowany został na rys. 1.2.



Rys. 1.2. Schemat diagnostyki procesu rozumianej jako rozpoznawanie wzorców [36]

1.3 Cele diagnostyki procesu spalania pyłu węglowego

Metody diagnostyki procesów przemysłowych, których zadaniem jest wczesne wykrycie symptomów powstawania sytuacji awaryjnej, nabierają szczególnego znaczenia w przypadku procesów złożonych, do których zalicza się proces spalania. Jak już wcześniej wspomniano, w wielu procesach przemysłowych występują newralgiczne węzły, którymi w przypadku procesów energetycznych są kotły. Zachodzące w nich procesy spalania determinują z jednej strony parametry procesowe wytwarzania energii oraz ich ekonomikę, a z drugiej decydują o zanieczyszczeniu środowiska naturalnego. Często wymagania i ograniczenia występujące przy spełnianiu różnych kryteriów (np. ekonomicznych, środowiskowych, technologicznych) są ze sobą w sprzeczności, należy więc wtedy uzyskać kompromis pozwalający na realizację procesu bez możliwości wystąpienia zagrożeń w sensie destrukcji jakiejś części instalacji technologicznej.

W warunkach przemysłowych, jakość realizacji procesu spalania pyłu węglowego jest subiektywnie oceniana przez operatorów na podstawie

obrazu płomienia widocznego w dostępnym otworze inspekcyjnym. Stosowane układy monitorujące przeznaczone są w zasadzie do wykrywania stanu zaniku płomienia, w wyniku którego może nastąpić niekontrolowany wybuch pyłu węglowego. Należy podkreślić, że prędkości mieszanki paliwowej na wylocie palnika są na tyle duże, że jej spalanie zachodzi w płomieniu turbulentnym. W obecnej chwili brak jest miar pozwalających na ocenę turbulentnego płomienia występującego podczas spalania pyłu węglowego, na podstawie których możliwa byłaby jednoznaczna i obiektywna ocena jakości procesu spalania. Dlatego wydaje się konieczne określenie sygnałów diagnostycznych, które pozwoliłyby na obiektywną kontrolę tego procesu.

Zasadniczym celem badań, przedstawionych w dalszej części niniejszej pracy, jest wyznaczenie sygnałów diagnostycznych oraz określenie kryterium diagnostycznego pozwalającego na efektywną detekcję nieprawidłowego przebiegu procesu spalania. Istotne jest, aby diagnostyka odbywała się w sposób bezinwazyjny, pozwalający ocenić proces spalania paliw pyłowych w czasie rzeczywistym. Dlatego rozpatrywane będą sygnały diagnostyczne, związane z promieniowaniem, którego źródłem jest proces spalania, a ściślej – z obrazem płomienia.

W dalszej części pracy przedstawione zostaną miary, które pozwolą na wybór najbardziej wrażliwej na zmiany parametrów procesu spalania. Ocena wspomnianych miar zostanie dokonana na podstawie przeprowadzonych prób stabilności procesu spalania, wykonywanych w warunkach laboratoryjnych, przy dwóch różnych ustawieniach kamery rejestrującej obraz płomienia.

Aby sposób analizy danych pomiarowych był bardziej zrozumiały, w kolejnych rozdziałach przedstawione zostaną niezbędne informacje dotyczące samego procesu spalania pyłu węglowego i problemów, które diagnostyka takiego procesu powinna obejmować. Szczególna uwaga będzie poświęcona tzw. spalaniu niskoemisyjnemu w palnikach wirowych. W kolejnym rozdziale omówione zostaną właściwości płomienia

pyłowego jako źródła promieniowania ze zwróceniem uwagi na mechanizmy generacji promieniowania, wpływające na kształt widm emisyjnych.

W dalszej kolejności, zaprezentowane będzie wykorzystanie parametrów geometrycznych płomienia oraz opisujących go deskryptorów Fouriera jako sygnałów diagnostycznych wskazujących na nieprawidłowy przebieg procesu spalania. Dodatkowo, przedstawiona zostanie możliwość wykorzystania to tego celu transformaty curvelet. W celu zmniejszenia ilości parametrów geometrycznych opisujących kształt płomienia, zastosowana będzie analiza składowych głównych, która dodatkowo pozwala na wskazanie tych cech kształtu płomienia, które są najbardziej wrażliwe na zmiany stanu procesu spalania. Zbadana zostanie także możliwość wykorzystania stanowiska diagnostycznego zawierającego tor wizyjny do diagnostyki procesu spalania w oparciu o analizę częstotliwości migotania płomienia.

2 Proces spalania pyłu węglowego

Procesy spalania pełnią fundamentalną rolę w rozwoju przemysłu, który datuje się od ponad 200 lat. Ponad 90% obecnie zużywanej energii pochodzi ze spalania paliw, w zdecydowanej większości – paliw kopalnych. Węgiel kamienny jest podstawowym surowcem energetycznym dla kilkudziesięciu krajów świata, w tym Polski. Istotna pozycja węgla wśród surowców energetyczny wynika z następujących przesłanek [40]:

- węgiel wydobywany jest w ponad 50 krajów świata, a jego zasoby oceniane są na kilka stuleci,
- węgiel jest paliwem bezpiecznym, łatwym w przewożeniu i składowaniu,
- znaczne rezerwy węgla i duża ich powszechność pozwala zabezpieczyć strategiczne bezpieczeństwo energetyczne wielu krajów,

- współczesne technologie spalania pozwalają użytkować węgiel w sposób niezagrażający środowisku,
- niższa cena jednostki energii w porównaniu z ropą naftową, czy też gazie ziemnym, przy zastosowaniu współczesnych technologii, pozwala na produkcję energii przy najmniejszych kosztach.

Przewiduje się, że w najbliższej przyszłości nadal będzie to główne źródło energii, pomimo stopniowego upowszechniania się możliwości uzysku energii z innych źródeł niż spalanie, jak np.: reakcje jądrowe, Słońce, wiatr, pływy morskie itp. Źródła te przez długi jeszcze czas będą traktowane jako alternatywne.

Proces spalania jest reakcją chemiczną paliwa i utleniacza, której towarzyszy wydzielanie ciepła [41]. Spalanie często jest kojarzone z występowaniem płomienia, który można zdefiniować jako egzotermiczną reakcję o charakterze łańcuchowym, przemieszczającą się w przestrzeni z prędkością poddźwiękową [42]. Zdolność samoistnego przemieszczania się odróżnia płomień od innych reakcji występujących w procesie spalania. Propagacja płomienia wynika z silnego powiązania reakcji chemicznych ze zjawiskami transportu, dyfuzji molekularnej, przewodzenia ciepła i przepływu.

Płomieniowi często towarzyszy emisja promieniowania w zakresie widzialnym, ale nie jest to jego zasadnicza cecha.

Aby proces diagnostyki spalania pyłu węglowego uczynić bardziej zrozumiałym, w dalszej kolejności przedstawione zostaną najważniejsze informacje dotyczące właściwości paliwa jakim jest węgiel.

2.1 Pochodzenie i charakterystyka węgla

Węgiel jest powszechnie używanym surowcem energetycznym, o szczególnym znaczeniu w Polsce, gdzie około 97% energii elektrycznej uzyskuje się w wyniku spalania węgla [43], [44]. Jest to krucha skała osadowa, różnorodna pod względem właściwości fizycznych i chemicznych.

Węgiel powstał w wyniku rozkładu materiału roślinnego a następnie ulegał przeobrażeniom pod wpływem wysokiej temperatury i ciśnienia [45], [46]. W skład węgla naturalnego wchodzi związek organiczny, zawierający węgiel pierwiastkowy, wodór i tlen przy niewielkiej zawartości azotu, siarki oraz substancje nieorganiczne. Zawartość tych ostatnich może wahać się od ułamków ppm do kilku procent [45]. Substancje nieorganiczne, na które składają się przede wszystkim związki glinu (Al_2O_3) i krzemu (SiO_2) nie są związane chemicznie z substancją organiczną [41].

Większość złóż węgla na świecie powstało w erze paleozoicznej w młodszym okresie karbońskim, ok. 350-270 mln lat temu. Proces geochemiczny, w trakcie którego materiał roślinny ulega przeobrażeniu w węgiel, (tzw. uwęglanie), polega na kolejnym tworzeniu się następujących substancji [45]:

torf → lignit (węgiel brunatny) → węgiel subbitumiczny → węgiel bitumiczny → antracyt

W procesie uwęglania można wyróżnić następujące fazy [47]:

- mikrobiologiczny rozkład celulozy zawartej w pierwotnym materiale roślinnym,
- konwersji ligniny zawartej w roślinach w substancje humusowe,
- kondensacji substancji humusowych w drobiny węgla.

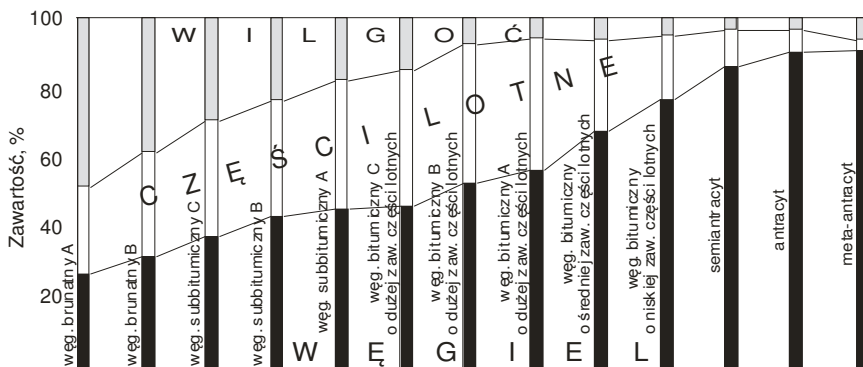
Różnorodność składu chemicznego i właściwości fizycznych wydobywanego węgla jest następstwem wielu czynników. Pierwszym z nich jest odmienne pochodzenie pierwotnego materiału roślinnego. Nie bez znaczenia były również warunki środowiskowe, w których następował jego rozkład, a w szczególności temperatura, odczyn środowiska, obecność wody, itp. Jednak kluczową rolę w procesie uwęglania pozostałości roślinnych odegrało oddziaływanie, przez okres od kilkuset do kilku milionów lat, odpowiedniej temperatury i ciśnienia wywieranego przez

warstwy geologiczne. Na ich skutek, stopniowo zmniejszała się porowatość przeobrażających się pozostałości roślinnych przy postępującej żelifikacji i wityfikacji [48]. Procesy te powodowały zmiany składu chemicznego polegające na stopniowym zmniejszaniu wilgotności i gazów (głównie metanu i dwutlenku węgla), przy jednoczesnym wzroście zawartości węgla pierwiastkowego i zmniejszania zawartości tlenu. Zawartość pierwiastkowego węgla w suchej substancji roślinnej (trawy, drzewa) wynosi ok. 50%. Przeobrażeniu tej substancji w torf towarzyszy zwiększenie jej do ok. 60%, a po przemianie kolejno: w węgiel brunatny, węgiel subbitumiczny, węgiel bitumiczny i antracyt, odpowiednio do ok. 70%, 75%, 80-90% i powyżej 90% [49]. Fazy przemiany w antracyt, towarzyszy także zmniejszanie się zawartości wodoru. Przypuszczalny przebieg tego procesu został dokładniej omówiony w pracy [50].

Ocena przydatności węgla jako paliwa odbywa się na podstawie analiz chemicznych: technicznej przybliżonej i elementarnej oraz oznaczania kaloryczności [45]. Analiza techniczna polega na wyznaczeniu względnej zawartości wilgoci, części lotnych, popiołu oraz pośrednio, zawartości węgla (C) związanego. Wyniki takiej analizy przedstawione zostały na rys. 2.1.

Analiza elementarna pozwala na określenie zawartości pierwiastków, głównie węgla, wodoru, azotu, siarki i tlenu. Oznaczenie kaloryczności, polega na pomiarze energii uzyskanej ze spalania znanej masy węgla.

Ponieważ nawet przy krótkim kontakcie z tlenem większość gatunków węgla zmienia swoje własności, dlatego traktując węgiel jako paliwo, określa się jego stan w następujący sposób:



Rys. 2.1 Wyniki analiza technicznej przeprowadzonej dla najważniejszych gatunków węgla [45]

- analityczny (wilgotność węgla jest w równowadze z wilgotnością otaczającego go powietrza),
- suchy (po podgrzaniu węgla przez do temperatury $105 \div 110^{\circ}\text{C}$ i przetrzymywaniu w niej przez co najmniej 2 godziny),
- suchy i bezpopiołowy.

O efektywności wykorzystania węgla jako paliwa świadczy jego skład, określany za pomocą analizy technicznej oraz analizy elementarnej, która polega na określeniu zawartości pierwiastków oraz masowych udziałów pierwiastków w badanym węglu.

Przebieg procesu spalania w znaczący sposób zależy od właściwości węgla, a w szczególności od zawartości części lotnych. Przy małej zawartości części lotnych utrudniony jest zapłon, co wymusza stosowanie specjalnych konstrukcji paleniska. Stopień uwęglenia wraz zawartością azotu w paliwie wpływa ponadto na emisję tlenków azotu.

Węgiel jako paliwo stosowane w warunkach przemysłowych, wykorzystywany jest w procesie spalania w warstwie na ruszcie, w żagwi (pył węglowy o średnicy ziaren $<100\mu\text{m}$), czy w palenisku fluidalnym (warstwa ziaren o rozmiarach $1 \div 10\text{mm}$).

Spalanie węgla w kotłach rusztowych, które należy do najstarszych sposobów spalania paliw stałych, odbywa się zwykle w przypadku jednostek o najmniejszych mocach, nie przekraczających zwykle 50MW.

2.2 Spalanie pojedynczego ziarna węgla

Przed przystąpieniem do analizy spalania pyłu węglowego w żagwi przedstawiony zostanie mechanizm spalania pojedynczego ziarna. Istnieje szereg opracowań, jak np. [41], [42], [51], [52], [53], [54], [55] w których proces ten został szczegółowo przedstawiony. W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione jedynie najważniejsze fazy tego procesu.

Spalanie pojedynczej cząstki węgla jest złożonym procesem fizykochemicznym. Początkowo, pod wpływem gorących spalin oraz promieniowania, którego źródłem jest płomień, cząstki węgla ulegają szybkiemu nagrzewaniu. Jest ona zależna od rozmiarów cząstki, temperatury oraz jej prędkości i zazwyczaj wynosi ok. $10^4 - 10^6$ K/s [41], [53]. Cząstka o średnicy $60\mu\text{m}$ nagrzewa się do temperatury panującej w komorze spalania w czasie $0,05 \div 0,1$ s [56]. W paleniskach kotłowych nagrzewanie następuje głównie na skutek konwekcji. Gdy uwzględnione zostanie przemieszczanie się cząstki, wówczas współczynnik przejmowania ciepła może w takich warunkach wzrosnąć nawet kilkadziesiąt razy [51], [53]. W czasie nagrzewania, zawarta w cząstkach węgla woda ulega odparowaniu.

W następnej kolejności, przy wzroście temperatury do ok. $300 \div 400$ °C, następuje rozkład termiczny (piroliza) węgla [41]. Początkowo uwalniane są produkty gazowe (części lotne), a w dalszej kolejności następuje mięknięcie substancji i wydzielanie ciężkich węglowodorów. Przy temperaturze powyżej 800 °C następuje wydzielanie CO i H₂ [41]. Ilość i skład części lotnych zależy m.in. od rodzaju węgla oraz warunków w jakich ten proces następuje (temperatura, ciśnienie).

W skład części lotnych wchodzi: para wodna, CO₂, H₂, węglowodory (głównie CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₃H₈, C₃H₆), H₂S oraz N₂ [51], [53].

Przebieg pirolizy ziaren węgla w znacznym stopniu zależy od ich stopnia uwęglenia. W przypadku ziaren niskouwęglonych, przeważają gazowe produkty pirolizy. Dla ziaren wysokouwęglonych obserwuje się większe wydzielanie smoły. Jeżeli intensywność wydzielania części lotnych jest niewielka, ich spalanie przebiega przy powierzchni cząstki węgla. Gdy części lotnych jest więcej, wówczas proces spalania zachodzi w płomieniu dyfuzyjnym, tworzącym się w przestrzeni otaczającej cząstkę węgla.

Spalanie części lotnych zależy także od sposobu w jaki następuje ich wydzielanie się. Stwierdzono, że spalanie części lotnych może przebiegać na dwa różne sposoby [53]. W pierwszym przypadku, części lotne wydzielane są przez pory w powierzchni cząstki w przybliżeniu równomiernie; wokół cząstki węgla formuje się płomień dyfuzyjny. W drugim, części lotne wyrzucane są pod dużym ciśnieniem, która wprawia cząstkę w ruch obrotowy. Podczas wydzielania i spalania części lotnych formuje się pozostałość koksowa, która w tym czasie praktycznie nie uczestniczy w spalaniu.

Kolejnym istotnym etapem jest spalanie pozostałości koksowej. Oprócz reakcji chemicznych, istotną rolę odgrywają tu procesy fizyczne, a w szczególności [53]:

- dyfuzja gazowych reagentów do powierzchni cząstki,
- adsorpcja gazów na powierzchni cząstki,
- reakcje chemiczne zachodzące na powierzchni cząstki,
- desorpcja produktów reakcji powierzchniowych,
- dyfuzja produktów reakcji do ośrodka gazowego.

Przebieg tych procesów zależy od stopnia porowatości cząstki węgla, z którym związane jest zwiększenie efektywnej powierzchni reakcji z tlenem, oraz szybkości dyfuzji i temperatury. Wzrost temperatury utrudnia dyfuzję tlenu do wnętrza porów, przez co mechanizm przebiegu

spalania jest tak, jak dla gładkiej powierzchni. Szybkość spalania pozostałości koksowej zależy, co warto podkreślić, od reaktywności węgla (szybkości spalania wyrażonej w $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$). Parametr ten zależy od gatunku węgla, przy jego wartości maleje wraz ze wzrostem stopnia uwęglenia [57]. Jako przykład może posłużyć szybkość spalania antracytu, która jest trzy razy mniejsza niż w przypadku węgla brunatnego [53].

Zawarta w węglu substancja mineralna podczas spalania podlega przemianom, zarówno fizycznym, jak i chemicznym, których przebieg szczegółowo został opisany w [52]. Produktami spalania są: popiół lotny, żużel oraz substancje gazowe. Popiół lotny ma w ok. $70 \div 90\%$ swojej objętości strukturę szklaną. Skład popiołu zależy przede wszystkim od substancji mineralnej, którą tworzą najczęściej: kwarc, mulit, magnetyt, hematyt, anhydryt i portlandyt [53].

Na podstawie nawet tak skróconego opisu jak powyżej można stwierdzić, że jednoczesna analiza wszystkich zjawisk zachodzących w procesie spalania pojedynczego ziarna jest praktycznie niemożliwa ze względu na złożoność zachodzących procesów oraz zmienność, tak rozmiarów, jak i składu chemicznego ziaren węgla. Dlatego stosuje się tutaj pewne uproszczenia. Przyjmując, że spalana cząstka ma kształt kuli, można wyznaczyć jej temperaturę, na podstawie energii wydzielonej podczas spalania oraz energii związanej z promieniowaniem zaabsorbowanym i pochłoniętym na podstawie zależności [41]:

$$WK_s^c = \alpha_p (T_s - T_o) + q_r, \quad (2.1)$$

przy czym:

W – wartość opałowa paliwa,

K_s^c – jednostkowa szybkość spalania węgla,

α_p – współczynnik pochłaniania ciepła,

T_s – temperatura powierzchni ziarna palącego się węgla,

T_o – temperatura ośrodka,

q_r – ciepło odprowadzane przez promieniowanie.

Przyjmuje się, że ciepło odprowadzane przez promieniowanie można opisać zależnością:

$$q_r = \sigma_r (T_s^4 - T_o^4), \quad (2.2)$$

gdzie: σ_r – stała promieniowania.

Zakładając kulisty kształt palącego się ziarna, równanie (2.1) może zostać wykorzystane do określenia zależności temperatury palącego się ziarna węgla T_s od jego średnicy. Należy tu również uwzględnić szybkość spalania węgla, który może być wyznaczony na podstawie zależności [41], [51]:

$$K_s^c = \Omega \frac{\alpha_d C_o}{\left(\frac{\alpha_d}{\alpha} + 1 \right)}, \quad (2.3)$$

gdzie:

Ω – współczynnik stechiometrii (stosunek masy zużytego tlenu podczas spalania do masy wypalonego węgla),

α_d – współczynnik wymiany masy,

α – współczynnik szybkości reakcji.

W powyższej zależności, współczynnik α_d można obliczyć korzystając z liczby Sherwooda Sh_d :

$$\alpha_d = \frac{2D}{r} Sh_d, \quad (2.4)$$

gdzie:

D – współczynnik dyfuzji,

r – promień ziarna.

Dla ziaren sferycznych liczba Sherwooda jest określona zależnością [42]:

$$Sh_d = 2 + 0,6Re^{0,5} + Sc^{0,3}, \quad (2.5)$$

gdzie:

Re – liczba Reynoldsa,

Sc – liczba Schmidta.

Masowa szybkość spalania ziarna może być również wyznaczona na podstawie zależności [58]:

$$K_s^c = - \left(\frac{\rho}{2} \frac{dr}{d\tau} + \frac{r}{3} \frac{d\rho}{d\tau} \right), \quad (2.6)$$

przy czym:

ρ – gęstość ośrodka,

τ – czas.

Ponieważ $\alpha \sim \exp(-E/RT)$, $\alpha_d \sim D/r$, zaś $D \sim T^4/p$, stąd:

$$\frac{\alpha_d}{\alpha} \sim \frac{T^{7/4} \exp(-E/RT)}{pr} \quad (2.7)$$

Wspomniana wcześniej temperatura ziarna może być wyznaczona z zależności [41]:

$$K_s^c = \frac{\Omega \rho Y_0}{\frac{[\exp(E/RT)]}{k_0} + \frac{1}{(2DSh_d/r)}}, \quad (2.8)$$

przy czym:

Y_0 – udział masowy tlenu ($C_0 = \rho Y_0$),

k_0 – stała szybkości reakcji chemicznych,

R – szybkość reakcji powierzchniowej,

E – energia aktywacji,

T – temperatura.

Formułowanie modeli matematycznych spalania pojedynczej cząstki zakłada w większości obecność niekatalitycznych reakcji na powierzchni węgla [59]. Opracowane modele zakładają w większości stacjonarne

warunki, w których zachodzi proces spalania, wśród których można wymienić m.in.: przepływ gazu [60], zmiany koncentracji tlenu [61], parametrów procesu i właściwości węgla [62], szybkości reakcji heterogenicznych [63] oraz wpływ zjawisk transportu [64]. Opracowane modele pozwalają na uwzględnienie obecności porów w cząstce węgla [59], a także stałych substancji, które w wyniku procesu spalania wchodzą w skład popiołu.

2.3 Spalanie węgla w żagwi

W kotłach energetycznych spalany jest pył węglowy powstały ze zmielenia węgla na drobne cząstki. Około 80% masy węgla stanowią ziarna o średnicach mniejszych od $75\mu\text{m}$ [41], [43]. Tak powstały pył, w palnikach przemysłowych spala się w odpowiednio ukształtowanym strumieniu (żagwi).

Modelowanie procesu spalania wielu cząstek węgla wymaga uwzględnienia wzajemnych interakcji oraz przyjęcia założeń dotyczących kształtu płomienia (strumień, chmura kulista, cylindryczna) jak również ich rozmieszczenia w płomieniu [65], [66]. Analiza zapłonu i spalania cząstek węgla znajdujących się w chmurze o cylindrycznym kształcie została zaprezentowana w pracy [67], gdzie przyjęto m.in. następujące założenia:

- równomierny rozkład idealnie kulistych cząstek węgla w całej rozpatrywanej objętości,
- wszystkie cząstki mają punktową masę i są nieruchome,
- proces pirolizy przebiega jako dwie współbieżne reakcje, w objętości o stałej wielkości i kształcie,
- reakcje heterogeniczne przebiegają w zmieniającej się objętości cząstki, przyjmując jej stałą gęstość.

Opracowany model pozwala na wyznaczenie w rozpatrywanej chmurze cząstek węgla:

- rozkładu temperatury w funkcji czasu,
- czasu zapłonu w zależności od gęstości cząstek,
- rozkładu koncentracji gazów.

Warunki jakie panują w przypadku spalania pyłu węglowego w kotłach przemysłowych znacząco odbiegają od przedstawionych powyżej przykładowych założeń [67], przede wszystkim ze względu na obecność przepływu turbulentnego.

Spalanie pyłu węglowego następuje w strumieniu, w którym jest przepływ turbulentny. W porównaniu z ruchem laminarnym, najważniejszą cechą ruchu turbulentnego jest zwiększenie intensywności procesów mieszania. W płomieniu turbulentnym następuje wzrost gradientów wszystkich wielkości, a co za tym idzie – wzrost intensywności całkowitego transportu molekularnego.

W przemysłowych palnikach wirowych prędkości mieszanki paliwowo-powietrznej są na tyle duże, że już na wylocie palników pojawia się przepływ turbulentny. Chwilowe wartości parametrów takiego przepływu nie są stałe w czasie lecz zmieniają się wokół wartości średnich. Wielkością charakteryzującą ruch turbulentny jest średniokwadratowa prędkość pulsacji v :

$$v = \sqrt{\overline{v^2}}, \quad (2.9)$$

gdzie \overline{v} – prędkość pulsacji będąca różnicą prędkości chwilowej i średniej.

Struktura pola prędkości turbulentnego strumienia może być w pełni opisana za pomocą średniokwadratowej prędkości pulsacji i skali turbulencji. Stosowane są trzy liniowe skale turbulencji [41], a mianowicie:

- całkowita – L , (charakteryzuje duże struktury wirowe),
- Taylora – λ (dla średniej szybkości deformacji),
- Kołmogorowa – η (dla najmniejszych wirów na granicy zanikania).

Można przy ich pomocy określić odpowiednie liczby Reynoldsa:

$$Re_L = \frac{vL}{\nu},$$

$$Re_\lambda = \frac{v\lambda}{\nu},$$

$$Re_\eta = \frac{v\eta}{\nu},$$

$$Re_\eta^4 = Re_\lambda^2 = Re_L,$$

gdzie ν – lepkość kinetyczna mieszanki.

Turbulentne przepływy zawirowane, stosowane w pyłowych palnikach, zachowują zarówno strumień pędu obwodowego:

$$G_\phi = \int_0^{R_{palm}} (wr)\rho u 2\pi r dr = \text{const}, \quad (2.10)$$

jak i strumień pędu osiowego:

$$G_x = \int_0^{R_{palm}} u\rho u 2\pi r dr + \int_0^{R_{palm}} p 2\pi r dr = \text{const}, \quad (2.11)$$

gdzie:

- r – współrzędna promieniowa,
- R_{palm} – promień wylotu palnika,
- w, u – składowe wektora prędkości,
- ρ – gęstość.

Analiza turbulentnego płomienia wirowego jest szczególnie utrudniona, ze względu na brak prostego modelu tego zjawiska. Ponadto, do poprawnego opisu formalnego takiego płomienia używa się zmiennych, które są trudno- lub wręcz niemożliwe do zmierzenia w warunkach przemysłowych.

Należy podkreślić, że od kilkadziesiąt lat, nad teorią spalania pyłu węglowego przydatną do zastosowania w kotłach energetycznych, prowadzone są na świecie intensywne prace badawcze. Jednak uzyskane

do tej pory wyniki nie dały możliwości stworzenia jednolitego i obowiązującego w szerokim zakresie modelu matematycznego. Otrzymane zaś wyniki nie mogą być ekstrapolowane dla dowolnego węgla spalanego w dowolnych warunkach. Główna przyczyna tkwi tutaj przede wszystkim w samej materii, tj. w węglu.

Węgiel kopalny charakteryzuje się złożoną i niejednorodną strukturą molekularną, która praktycznie do dnia dzisiejszego stanowi nierozwiązany problem analityczny. Wydaje się, że obecnie nie jest możliwe zbudowanie modelu strukturalnego, który odpowiadałby za cały typoszereg węgli.

Pilne staje się więc zagadnienie określenia parametrów doświadczalnych charakteryzujących węgiel i proces jego spalania. Bez nich żadna teoria nie może znaleźć praktycznego zastosowania, gdyż ekonomicznym i ekologicznym warunkiem stosowania węgla w kotłach energetycznych jest prawidłowo przebiegający proces spalania realizowany przez zespół palnik-komora spalania.

Z ekologicznego punktu widzenia istotnym postępem w prowadzeniu spalania stały się, tzw. techniki niskoemisyjne.

2.4 Niskoemisyjne techniki spalania pyłu węglowego

Ocenia się, że spalanie paliw kopalnych, w tym węgla, jest najpoważniejszym źródłem zanieczyszczeń atmosfery [43], [68].

Do podstawowych zanieczyszczeń powstających w procesie spalania zalicza się:

- dwutlenek węgla (CO_2),
- dwutlenek siarki (SO_2),
- tlenki azotu (NO_x).

Ograniczenie emisji dwutlenku węgla powstającego w procesie spalania jest zadaniem bardzo trudnym ze względu na fakt, że wszystkie paliwa kopalne zawierają węgiel. Najskuteczniejszą metodą zmniejszenia

jego emisji jest racjonalizacja zużycia energii, np. poprzez stosowanie technologii energooszczędnych oraz poprawa sprawności wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej przy pomocy procesu spalania.

Tlenki siarki (SO_x) wnoszą znaczny udział do zanieczyszczania powietrza atmosferycznego powodując kwaśne deszcze, zakwaszając glebę i zbiorniki wodne, co prowadzi do negatywnych skutków środowiskowych (obniżenie żyzności gleb oraz zubażanie czy nawet eliminację życia roślinnego i zwierzęcego). Ponadto ich korozyjne właściwości powodują powstawanie poważnych trudności eksploatacyjnych urządzeń kotłowych i turbin. Ze względu na czas przebywania w atmosferze, który waha się od ok. 24 godzin do 4 dni [43], mogą się one przemieszczać na znaczne odległości. Dlatego w bilansie zanieczyszczeń dla danego kraju istotne jest uwzględnienie eksportu i importu dwutlenku siarki.

Obniżenie emisji SO_2 realizowane jest w specjalnych instalacjach odsiarczających.

Azot tworzy tlenki azotu od NO do N_2O_5 , ale tylko trzy z nich mogą powstać w wyniku spalania, a są to N_2O , NO i NO_2 . Właściwości tych tlenków są różne, przy czym N_2O nie jest gazem trującym i stosowany jest w medycynie jako środek znieczulający. W procesie spalania powstaje najwięcej tlenków azotu NO oraz niewielka ilość dwutlenku NO_2 . W technice spalania stosuje się pojęcie NO_x , jako mieszaniny tlenków NO i NO_2 (jako suma $\text{NO} + \text{NO}_2$ w przeliczeniu na NO_2) [51].

Tlenki azotu NO_x odgrywają najważniejszą rolę w procesie zanieczyszczania powietrza w skali lokalnej, prowadząc do kwaśnych deszczy, smogu fotochemicznego i dziury ozonowej.

Ograniczenie emisji NO_x w procesie spalania można podzielić na przedsięwzięcia realizowane:

- 1) w kotle,
- 2) za kotłem.

W grupie pierwszej wyróżnia się:

- niskoemisyjne techniki spalania, tzw. metody pierwotne [69],
- metody, w których wprowadza się do kotła dodatkowe czynniki redukujące, np. amoniak lub mocznik.

W drugiej grupie usuwanie NO_x ze spalin realizowane jest poprzez redukcje katalityczne:

- selektywną (SCR),
- nieselektywną (NSCR),

oraz metodami absorpcyjnymi [43].

Metody drugiej grupy przyjęło się nazywać metodami wtórnymi.

Efektywność redukcji NO_x przy stosowaniu metod pierwotnych jest generalnie niewielka. Ze względów ekonomicznych, są one jednak powszechnie używane, gdyż lepiej zapobiec ich powstawaniu niż później je redukować.

Niskoemisyjna technika spalania polega na takiej organizacji procesu, która zapewni zmniejszoną emisję NO_x w porównaniu z konwencjonalnym systemem spalania. Może być ona realizowana przy użyciu następujących środków:

- obniżanie temperatury spalania,
- zmiana rozdziału powietrza,
- zmiana aerodynamiki spalania,
- wykorzystanie redukujących właściwości tzw. płomienia bogatego.

Obniżanie temperatury spalania pyłu węglowego jest ograniczone możliwością utraty stabilności procesu. Najskuteczniejszym środkiem zmniejszenia emisji NO_x jest takie operowanie ilością podawanego paliwa i powietrza, aby zostały wytworzone bogate i ubogie strefy płomienia, posiadające własności obniżonej generacji i redukcji tlenków azotu. Określenie danej strefy jako bogatej lub ubogiej, odnosi się do wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ . Definiowany jest on jako stosunek masy suchego powietrza, w którym następuje spalanie paliwa do

teoretycznego zapotrzebowania na powietrze. Jeżeli $\lambda < 1$, wówczas spalanie przebiega z nadmiarem paliwa, względem warunków stechiometrycznych, a strefa (płomień), w której ten proces zachodzi nosi nazwę strefy bogatej. W przeciwnym przypadku ($\lambda > 1$), strefa określana jest jako uboga.

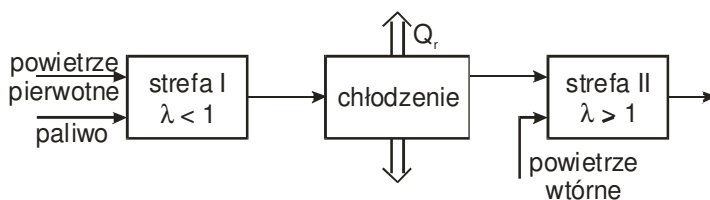
Mimo pewnego zagrożenia utratą stabilności procesu przy spalaniu węgla, to jednak wykorzystywane jest obniżanie temperatury spalania dla zmniejszenia emisji NO_x . Jest ono bardziej widoczne przy spalaniu węgla kamiennego, niż brunatnego [70].

Zależność wielkości emisji NO_x od nadmiaru powietrza w procesie spalania jest stosunkowo złożona i zależy od kilku czynników, a przede wszystkim od rodzaju płomienia oraz zawartości w paliwie, tzw. azotu paliwowego N_F . W płomieniach z dużym nadmiarem powietrza (płomień ubogi) azot paliwowy szybko utlenia się do NO_x , zaś w płomieniu z niedomiarem powietrza (płomień bogaty) N_F w dużym stopniu ulega przekształceniu w N_2 . Sposób ten jest efektywny w przypadku kotłów pyłowych, w których ograniczenie O_2 w spalinach za kotłem, objawia się zmniejszeniem koncentracji NO_x w spalinach [71]. Występuje tu jednak możliwość powstania niedopału, szlakowania i korozji, więc redukcja emisji NO_x tą metodą ograniczona jest do około 15% [43].

Niskoemisyjne spalanie ze stopniowaniem powietrza polega na podziale obszaru spalania na dwie strefy:

- bogatą,
- ubogą.

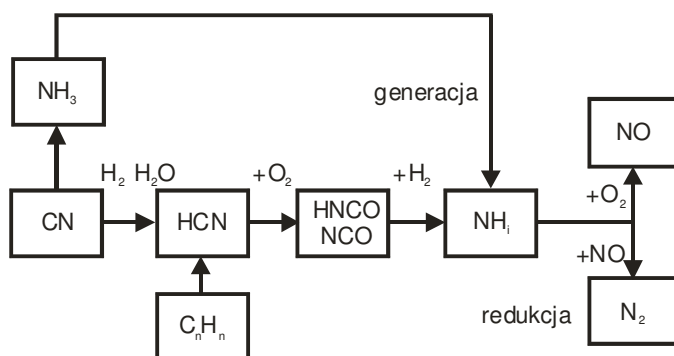
W pierwszej strefie odbywa się spalanie z niedoborem tlenu, czyli tworzy się strefa redukująca z obniżoną dodatkowo temperaturą. W drugiej strefie następuje dopalanie z kontrolowanym nadmiarem powietrza. Czas przebywania palących się cząstek pyłu węglowego w pierwszej strefie jest znacznie dłuższy niż w drugiej i następuje w niej jednocześnie częściowe schłodzenie produktów i półproduktów spalania. Schematycznie jest to przedstawione na rys. 2.2. [43].



Rys. 2.2. Zasada niskoemisyjnego spalania ze stopniowaniem powietrza [43]

Metoda ta ma największy wpływ na wielkość redukcji emisji NO_x w przypadku spalania paliw zawierających azot związany i stała się podstawową techniką niskoemisyjnego spalania w kotłach pyłowych [43].

Uproszczony mechanizm tworzenia się i redukcji paliwowych NO_x w bogatej strefie spalania przedstawiony został na rys. 2.2 [72].



Rys. 2.3. Dominujący mechanizm powstawania i redukcji paliwowych NO_x w bogatym płomieniu pyłowym [43]

W trakcie termicznego rozkładu paliwa, również paliwowy azot CN ulega przekształceniu w lotne produkty jego rozkładu, tj. prostsze związki azotowe (rys. 2.3). Wśród nich dominują cyjanowodór (HCN) i amoniak (NH_3), które są palne, dlatego w obecności tlenu mogą utlenić się do NO_x . W bogatej strefie, ze względu na niedobór tlenu znaczna część HCN i NH_3 ulega konwersji do N_2 oraz do rodników azotowych i aminowych (N, NH, NH_2), które mają zdolność do redukcji NO_x .

Należy podkreślić aktywną rolę rodników węglowodorowych CH, występujących w znacznym stężeniu w strefie spalania. Mają one dużą zdolność redukcji NO_x, ale niestety produktem tej reakcji jest także HCN.

W drugiej strefie (dopalania) występuje niewielki nadmiar tlenu i wtedy HCN oraz NH₃ pochodzące z pierwszej strefy utleniają się do NO_x.

Na efektywność ograniczenia emisji realizowanej metodą stopniowania powietrza wpływają warunki panujące w pierwszej bogatej strefie. Są to przede wszystkim [43]:

- czas przebywania, który nie powinien być krótszy niż 1s (znacznie zależy od mocy kotła)
- współczynnik nadmiaru powietrza λ_t , który powinien być w zakresie 0,7÷0,8 (większy nadmiar powietrza powoduje wzrost powstawania NO_x w strefie I, a zmniejszenie poniżej 0,7 objawia się wzrostem udziału HCN i NH₃ w I strefie, które w II strefie utleniają się do NO_x).

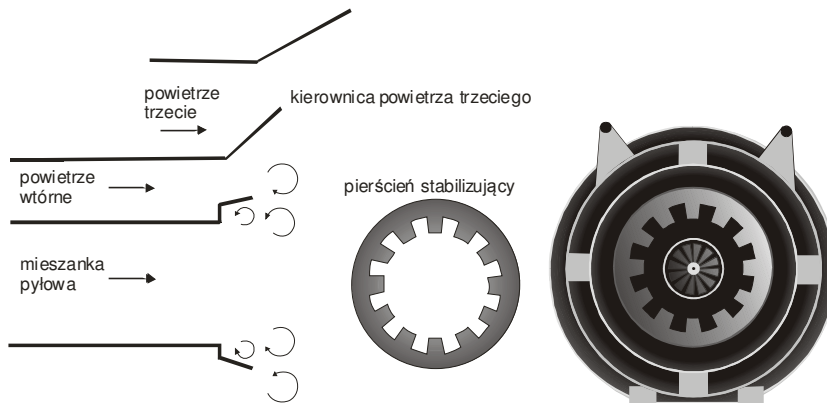
2.4.1 Efekty uboczne niskoemisyjnych technik spalania pyłu węglowego

Stosowanie niskoemisyjnych technik spalania powoduje również pojawienie się negatywnych efektów ubocznych, do których należy zaliczyć [43], [73]:

- korozję niskotlenową,
- zwiększenie udziału części palnych w popiele i żużlu,
- zwiększenie udziału CO w spalinach,
- niekorzystne zmiany w przekierowaniu ciepła w kotle (niedogrzenie pary wtórnej),
- zwiększenie szlakowania,

- szybsze zużywanie się elementów palników (dysze, łopatki) spowodowane koniecznością zwiększenia koncentracji pyłu węglowego w strefie wylotu palnika,
- gorsza stabilność płomienia.

Zmiany konstrukcyjne palnika, mające na celu zmniejszenie emisji NO_x , mogą doprowadzić do trudności w zapewnieniu stabilnej pracy kotła nawet w zakresie obciążenia 50-100%. W przypadku palników wirowych występuje odsunięcie bogatego płomienia od ich wylotów, a w przypadku palników strumieniowych – zmniejszenia prędkości wypływu powietrza. Aby zapobiec tym niekorzystnym zjawiskom, stosowane są stabilizatory płomienia, w postaci wypustek rozmieszczonych koncentrycznie wokół wylotu palnika wirowego, widocznych na rys. 2.4. Obecność stabilizatora płomienia zmniejsza prędkość cząstek u wylotu palnika, zwiększa turbulencje przepływu, dodatkowo powodując wytwarzanie lokalnych stref recyrkulacji. Odpowiednie rozwiązania stosowane są także w przypadku palników strumieniowych.



Rys. 2.4. Budowa wirowego, niskoemisyjnego palnika pyłowego z zaznaczeniem elementów stabilizujących płomień

Mimo tych wad, techniki niskoemisyjnego spalania są powszechnie stosowane, a badania idą w kierunku minimalizacji kosztów powstałych na skutek stosowania tych technik.

2.5 Stabilność procesu spalania

Celem prowadzenia procesu spalania w kontekście energetyki zawodowej jest produkcja energii cieplnej lub elektrycznej przy możliwie najmniejszych kosztach, minimalizując przy tym negatywny wpływ na środowisko naturalne. Nie mniej istotny jest aspekt bezpieczeństwa. Wprowadzenie niskoemisyjnych technik spalania powoduje konieczność stosowania diagnostyki procesu spalania, w celu minimalizacji niekorzystnych skutków ubocznych.

Jednym z istotnych aspektów stosowania technik niskoemisyjnych jest wspomniane wcześniej, pogorszenie stabilności spalania. Detekcja takiego stanu na podstawie parametrów charakteryzujących kształt płomienia, zostanie przedstawiona w dalszej części pracy.

Stabilność płomieni jest rozumiana jako [53], [74]:

- odporność płomienia na małe zaburzenia, po ustąpieniu których powraca samoistnie do wcześniejszej postaci (kształtu),
- zespół warunków, dla których występowanie płomienia jest jeszcze możliwe, a ich przekroczenie prowadzi do zaniku płomienia.

Stabilność płomienia rozumiana w pierwszym z wymienionych kontekstów ma znaczenie przede wszystkim teoretyczne, podczas gdy drugie znaczenie stabilności płomienia ma bardzo duże znaczenie praktyczne. Dla urządzeń, za pomocą których realizowany jest proces spalania (urządzenia dostarczające mieszkę paliwowo-powietrzną, palniki, komora spalania) oznacza to określenie warunków, w których, zakładając rodzaj paliwa, uzyskuje się płomień określonego rodzaju (laminarny, dyfuzyjny, turbulentny) o określonym kształcie. W warunkach przemysłowych stabilność płomienia ma szersze znaczenie. Instalacja przemysłowa, w której realizowany jest proces spalania musi zapewnić stabilny płomień w pewnych granicach zmian parametrów zasilania.

Utrata stabilności procesu spalania pyłu dla pojedynczego palnika wirowego może nastąpić pod wpływem szeregu przyczyn, np. [74], [75]:

- nieprawidłowych parametrów mieszanki paliwowej docierającej do palnika (zła jakość przemiału węgla, nieprawidłowy rozdział pyłu, wydatki powietrza pierwotnego, powietrz wtórnych, zmienny skład chemiczny węgla),
- uszkodzeniem elementów palnika (np. stabilizatora płomienia, zawirowywacza, itp.).

Nieprawidłowy przebieg procesu spalania, w skrajnym przypadku prowadzi do całkowitego zaniku (zerwania) płomienia. W takiej sytuacji, pył węglowy w dalszym ciągu dostaje się do wnętrza komory spalania. Pod wpływem panującej tam w dalszym ciągu wysokiej temperatury, następuje proces pirolizy węgla. Może to doprowadzić do niekontrolowanego zapłonu części lotnych, a w skrajnym przypadku do eksplozji wewnątrz komory spalania. Stwarza to możliwość wystąpienia poważnego uszkodzenia kotła, połączonego z zagrożeniem dla zdrowia i życia ludzkiego.

Sekwencje zdjęć zarejestrowane podczas niestabilnego spalania pyłu węglowego w warunkach laboratoryjnych została przedstawiona rys. 2.5. Charakterystyczne dla tego stanu jest występowanie względnie dużych wahań położenia punktu, w którym następuje zapłon mieszanki paliwowo-powietrznej, obserwowane jako gwałtowne pulsacje płomienia [76], [77]. W skrajnym przypadku, może dojść do zaniku płomienia.



Rys. 2.5. Sekwencja obrazów zarejestrowana podczas spalania niestabilnego pyłu węglowego w odstępach czasu wynoszących 1/25s

Stan spalania stabilnego wiąże się ze względną stałością punktu zapłonu oraz kształtu płomienia w czasie [78]. Jednak, gdy płomień jest nieruchomy a punkt zapłonu położony jest bardzo blisko palnika, może to prowadzić do jego termicznego uszkodzenia [43].

Jeśli analizie poddany zostanie kształt płomienia, to na podstawie jej wyników, możliwe będzie wyznaczenie zakresu dopuszczalnych zmian jego kształtu [79], [78]. Kształt płomienia przy spalaniu stabilnym, w określonych warunkach kształtu i rozmiarów komory spalania oraz rodzaju palnika, nie jest jednakowy i zależy m.in. od parametrów wejściowych palnika, przez co rozumie się skład (rodzaj) paliwa, jego rozdrobnienie oraz wydatek powietrza [80]. Przykładowa sekwencja obrazów zarejestrowana podczas stabilnego spalania pyłu węglowego na stanowisku laboratoryjnym przedstawiona została na rysunku 2.6, a dla zmniejszonego wydatku paliwa – na rysunku 2.7.



Rys. 2.6. Przykładowa sekwencja obrazów zarejestrowana przy stabilnym spalaniu pyłu węglowego w odstępach czasu wynoszących 1/25s



Rys. 2.7. Przykładowa sekwencja obrazów przy stabilnym spalaniu pyłu węglowego przy zmniejszonym jego wydatku, zarejestrowana w odstępach czasu wynoszących 1/25s

Stan spalania stabilnego, jak pokazane to zostało na rys. 2.6 i 2.7, może występować dla różnych wartości parametrów wejściowych i niekoniecznie musi mu odpowiadać jeden kształt płomienia.

3 Płomień jako źródło informacji o procesie spalania

Ocena przebiegającego procesu spalania na podstawie płomienia, od dawna dokonywana była przez człowieka na podstawie informacji dostarczanych przez zmysł wzroku. W praktyce przemysłowej, bardzo często diagnozowanie procesu odbywało się na podstawie wizualnej oceny płomienia. W tym celu w kotle energetycznym istnieje szereg otworów wziernikowych, które umożliwiają wizualny nadzór przebiegającego procesu spalania. Kotły energetyczne bywają wyposażone w specjalnie przystosowane do tego kamery, pozwalające na przeniesienie obrazu wnętrza komory spalania do pomieszczenia operatorskiego.

Potrzeba nadzorowania procesu spalania, szczególnie w warunkach przemysłowych, jest koniecznością i to nie tylko z uwagi na bezpieczeństwo osób, ale również ze względów ekonomicznych, ponieważ pozwala prowadzić proces przy minimalizacji kosztów jego prowadzenia (strat, emisji szkodliwych substancji, itp.).

Monitoring, nie wspominając o sterowaniu, wymaga informacji o przebiegu procesu spalania, uzyskanej na podstawie analizy *on-line* sygnałów z szeregu czujników wykorzystujących różne zasady działania i umieszczonych w różnych miejscach urządzenia (instalacji), w którym proces spalania jest realizowany. Praca [81] zawiera przegląd metod stosowanych do pomiaru najważniejszych parametrów procesu spalania, które zestawione zostały w tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Metody pomiaru istotnych parametrów procesu spalania

Parametr	Sposób pomiaru	Miejsce pomiaru
Stosunek powietrze-paliwo	<i>natężenie prądu jonowego</i>	Płomień
	emisja w zakresie UV-Vis	Płomień
Ilość wydzielanego ciepła	emisja w zakresie UV-Vis	Płomień
Przepływ masy	absorpcja w zakresie Vis-IR	mieszanka paliwowa
	elektromechaniczny	mieszanka paliwowa
Jednorodność mieszanki paliwowej	Fluorescencja wzbudzona laserem (LIF)	mieszanka paliwowa
	absorpcja w zakresie IR	mieszanka paliwowa
Prędkości cząstek stałych	Laserowy, wykorzystujący efekt Dopplera (LDV)	Płomień
Ciśnienie	elektromechaniczny (MEMS)	mieszanka paliwowa, płomień
	akustyczny (mikrofon)	Płomień
Temperatura	absorpcja w zakresie IR	płomień, spaliny
	emisja w zakresie Vis-IR	płomień, spaliny
	czujnik (ciało stałe)	płomień, spaliny
Zawartość CO	absorpcja w zakresie IR	płomień, spaliny
	czujnik (ciało stałe)	Spaliny
Zawartość CO ₂	absorpcja w zakresie IR	płomień, spaliny
	emisja w zakresie IR	płomień, spaliny
	czujnik (ciało stałe)	Spaliny
Zawartość H ₂ O	absorpcja w zakresie IR	płomień, spaliny
Zawartość HC	czujnik (ciało stałe)	mieszanka paliwowa, spaliny
Zawartość NO _x	absorpcja w zakresie IR	Spaliny
	czujnik (ciało stałe)	Spaliny
Zawartość O ₂	absorpcja w zakresie bliskiej IR	mieszanka paliwowa, płomień
	czujnik (ciało stałe)	Spaliny

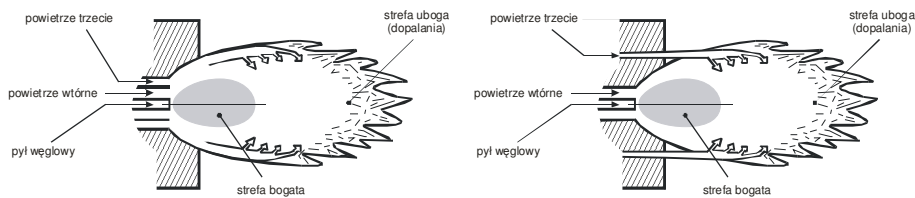
Na podstawie przytoczonego przeglądu można stwierdzić, że płomień jest istotnym źródłem informacji o parametrach zachodzącego procesu spalania. Na podstawie widma emisyjnego płomieni, w zakresie

promieniowania widzialnego, możliwe jest określenie zawartości, stosunku powietrze-paliwo, ilości wydzielanego ciepła i temperatury [2], [82], [83], [84], [85]. Większe możliwości, biorąc pod uwagę ilość parametrów dają metody absorpcyjne. Jednak stosowanie ich w przypadku płomieni pyłowych jest problematyczne, a szczególnie – w warunkach przemysłowych.

3.1 Struktura płomienia przy spalaniu niskoemisyjnym

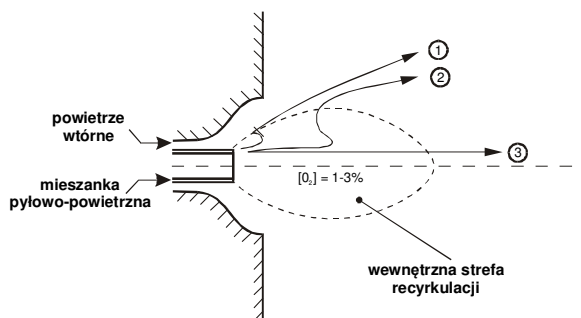
Niskoemisyjne techniki spalania pyłu węglowego, jak zostało to wspomniane w rozdziale 2.4, polegają na wytworzeniu w płomieniu stref (bogatej i ubogiej), które różnią się zawartością tlenu. Wspomniane strefy płomienia mogą zostać wytworzone poprzez:

- stopniowanie powietrza (wewnętrzne lub zewnętrzne),
- stopniowanie paliwa.



Rys. 3.1 Palnik wirowy ze stopniowaniem powietrza a) wewnętrznym, b) zewnętrznym [43]

W przypadku palników wirowych opalanych węglem kamiennym strefy te, pokazane na rys. 3.1, formowane są zazwyczaj poprzez tzw. wewnętrzne stopniowanie powietrza dzięki podawaniu przez współosiowy kanał dodatkowego powietrza. Stanowi ono część powietrza wtórnego i określane jest jako tzw. powietrze trzecie. Dzięki istnieniu silnie zawirowanego przepływu, w centrum powstaje wewnętrzna strefa recykulacji, przedstawiona na rys. 3.2, charakteryzująca się niedomiarem tlenu.



Rys. 3.2 Trajektorie cząstek węgla za palnikiem wirowym [43]

Cząstki węgla o trajektorii oznaczonej 2, dostatecznie długo przebywając w tej strefie, ulegają odgazowaniu i w konsekwencji zachodzi skuteczna konwersja azotu zawartego w paliwie w azot molekularny N_2 . Inaczej jest w przypadku cząstek, o trajektoriach oznaczonych jako 1 i 3, które nie przebywają w strefie recyrkulacji lub przebywają w niej na tyle krótko, że wspomniany proces konwersji nie zachodzi [43], [86].

Palniki ze stopniowaniem paliwa są spotykane rzadziej. Redukcja tlenków azotu polega tutaj na wprowadzaniu dodatkowego paliwa węglowodorowego w strefę popromienną, w której rodniki CH reagują z tlenkami azotu i redukują je do azotu molekularnego. Taki sposób redukcji NO_x nosi nazwę reburningu. W przypadku kotłów pyłowych, ze względów ekonomicznych najkorzystniej jest stosować bardzo drobny pył węglowy [43].

Oprócz palników wirowych, do spalania pyłu węglowego w przemysłowych kotłach energetycznych stosowane są również palniki strumieniowe, stosowane głównie w paleniskach tangencjalnych. W tym przypadku, płomień charakteryzuje się wtedy znacznie większą długością. Ze względu na sposób rozmieszczenia palników w komorze spalania, występuje zjawisko wzajemnego oddziaływania na siebie płomieni pochodzących z poszczególnych palników w znacznie większym stopniu niż w przypadku palników wirowych [43].

Palnik strumieniowy, składa się z szeregu dysz, z których wydostaje się pył węglowy, rozmieszczonych jedna nad drugą. Pomędzy nimi znajdują się dysze powietrzne. Całość tworzy funkcjonalny zespół noszący nazwę skrzyni palnikowej. Skrzynie palnikowe mogą być pochylane pod różnym kątem, dzięki czemu możliwe jest kształtowanie przepływów strumieni spalanej mieszanki paliwowo-powietrznej oraz powietrza w komorze spalania.

Ważną cechą zawirowanych strumieni wykorzystywaną w konstrukcjach palników jest laminaryzacja płomieni turbulentnych. Zjawisko to zachodzi w przypadku silnie zawirowanych przepływów z dużym gradientem gęstości. W takim przypadku, mieszanie zewnętrznego zawirowanego strumienia powietrza z warstwą gorących gazów strefy recyrkulacji jest znacznie osłabione, umożliwiając pełniejsze odgazowanie cząstek węgla.

Spalanie niskoemisyjne wymaga zatem, oprócz stosowania rozmaitych technik stabilizacji płomienia, także odpowiedniego systemu monitorowania w celu optymalnego prowadzenia procesu. Jest to tym bardziej istotne, gdyż spalanie niskoemisyjne bywa okupione negatywnymi skutkami dla eksploatacji kotła, jak np. zwiększona emisja CO, większe straty niedopału, korozja parownika i zwiększenie szlakowania [43].

3.2 Charakterystyka płomienia jako źródła promieniowania

Emitowane przez płomień promieniowanie jest odbiciem zachodzących tam reakcji chemicznych i procesów fizycznych. Można uznać, że promieniowanie to stanowi pierwotne źródło informacji o zachodzącym procesie spalania. Informacja zawarta jest m.in. w rozkładzie widmowym promieniowania, który odzwierciedla skład i temperaturę ośrodka emisyjnego.

Rozprzestrzenianie się (propagacja) płomienia wynika z silnego powiązania zachodzących reakcji chemicznych ze zjawiskami transportu, przepływu i przewodzenia ciepła [42]. Im większa, tym gradienty temperatury i koncentracji reagujących składników stają się większe, a to z kolei, powoduje dalsze zwiększenie szybkości reakcji. Mechanizm dodatniego sprzężenia zwrotnego, który występuje tutaj, ograniczany jest przez szybkość propagacji płomienia. Jeśli sprzężenie zwrotne przekracza pewien punkt krytyczny, wówczas układ staje się samopodtrzymujący. Jeżeli natomiast sprzężenie zwrotne jest zbyt słabe, aby dla danej objętości reagentów nie pojawiły się zjawiska transportu, wówczas płomień przestaje się rozprzestrzeniać i ustala się stan stabilny. Kiedy osiągnięcie takiego stanu nie jest możliwe dla żadnej prędkości, płomień zanika [42]. Zachodzące w płomieniu zjawiska ograniczone są zasadami zachowania energii i masy reagujących składników, jak również równaniami różniczkowymi transportu molekularnego oraz równaniami reakcji chemicznych. Daje to w efekcie układ nadokreślony, w którym płomień posiada charakterystyczną prędkość propagacji, zależną od początkowego składu reagentów, ich temperatury i ciśnienia [42].

W przypadku spalania mieszanki paliwowej, płomień jest nieruchomy względem ścianek komory lub palnika. Pozorne nieruchome położenie płomienia jest wynikiem równowagi dynamicznej pomiędzy lokalną prędkością propagacji płomienia a prędkością napływającej mieszanki paliwowej [41]. Zmiana położenia frontu płomienia w przestrzeni, postrzegana jako zmiana kształtu płomienia, jest wynikiem zakłócenia tej równowagi. Pozwala to przyjąć, że kształt płomienia może być wskaźnikiem stanu procesu spalania, zachodzącego w określonych warunkach.

Optyczne metody diagnostyczne, oprócz akustycznych [87], [88], [89], [90], [91], [92] należą do najważniejszych metod, które w bezinwazyjny sposób pozwalają na otrzymanie praktycznie nieopóźnionej i do-

datkowo selektywnej przestrzennie informacji o zachodzącym procesie spalania. Opracowano szereg metod diagnostycznych, których działanie oparte jest na analizie promieniowania emitowanego przez płomień i to zarówno laboratoryjnych, jak i możliwych do zastosowania w warunkach przemysłowych [25], [93], [94], [95], [96], [11], [97].

3.2.1 Mechanizmy generacji promieniowania w płomieniu pyłowym

Rozpatrując płomień pyłowy jako ośrodek emitujący promieniowanie w komorze spalania należy wziąć pod uwagę objętościowy charakter źródła promieniowania oraz szereg mechanizmów jego generacji. Uwzględnić należy tutaj następujące czynniki [98], [99], [100]:

- promieniowanie, którego źródłem są rozgrzane cząstki stałe, znajdujące się w płomieniu: węgiel, koks, popiół i sadza, a ich koncentracja w przestrzeni płomienia nie jest jednakowa,
- promieniowanie emitowane przez gorące gazy znajdujące się w płomieniu pyłowym na skutek wzbudzenia termicznego, które tworzą przede wszystkim widma emisyjne rotacyjne głównych gazów występujących w płomieniu – H₂O, CO₂, CO,
- promieniowanie emitowane na skutek chemiluminescencji, związane z występowaniem wolnych rodników (m.in. OH*, CH*, C₂*, HCN*, NH*, NH₂*), których nie można traktować tak samo jak gazów gorących o podobnej zawartości składników głównych.

Cząstki stałe, znajdujące się w płomieniu można potraktować jako ciało szare, którego rozkład promieniowania można wyznaczyć na podstawie rozkładu Plancka:

$$u(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1}, \quad (3.1)$$

przy czym:

$u(\lambda, T)$ – strumień promieniowania na jednostkę powierzchni (irradiancja) na jednostkę kąta bryłowego ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) dla danej długości fali λ , w temperaturze T ,

$\epsilon(\lambda)$ – emisyjność ciała szarego dla danej długości fali,

h – stała Plancka,

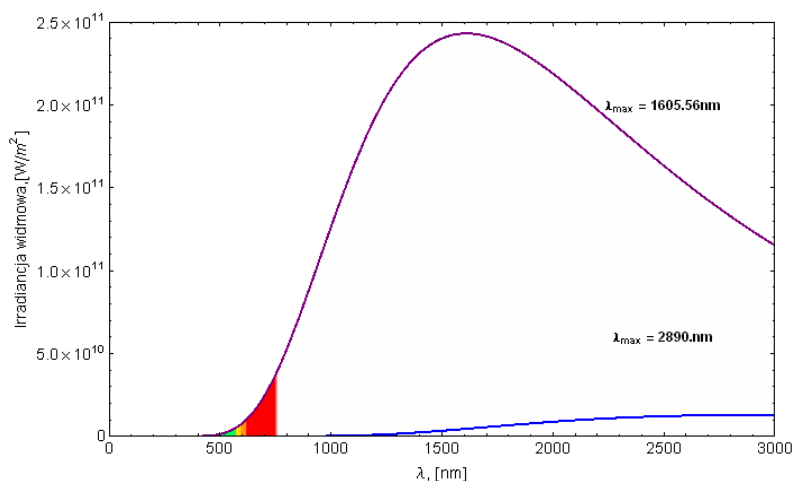
c – prędkość światła,

k – stała Boltzmanna,

T – temperatura bezwzględna.

Emisyjność ciała zależy od wielu czynników, wśród których najważniejszymi są: temperatura, długość fali, rodzaj ciała i stan jego powierzchni. W przypadku cząstek węgla spalanych w żagwi, ich emisyjności można określić eksperymentalnie [101], a uzyskane widma mają charakter ciągły. Jeżeli $\epsilon(\lambda) = 1$, wtedy zależność (3.1) określa promieniowanie emitowane przez ciała doskonale czarne.

Temperatura płomieni pyłowych zależy od rodzaju spalanego paliwa oraz warunków jakich prowadzony jest proces spalania. Zależność irradiancji widmowej od długości fali, dla ciała doskonale czarnego, przy temperaturach występujących w płomieniach pyłowych przedstawiona została na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Irradiancja widmowa dla ciała doskonale czarnego dla zakresu temperatur $T = 1000 \div 1800 \text{K}$.

Widmo emitowane przez cząstki stałe ma charakter ciągły, przy czym znaczna część energii promieniowania przypada na zakres podczerwieni.

Można zauważyć, że wyrażenie $\exp(hc/\lambda kT)$, występujące w zależności (3.1), w zakresie temperatur występujących w płomieniach pyłowych i długościach fal 200÷800nm jest znacznie większe od 1, dlatego można zastosować przybliżenie:

$$\exp(hc/\lambda kT) - 1 \cong \exp(hc/\lambda kT). \quad (3.2)$$

Wyrażenie (3.1), przyjmie wówczas postać prawa Wiena:

$$u(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \right)^{-1}, \quad (3.3)$$

przy czym $C_1 = 2\pi h c^2$, $C_2 = hc/k$.

Powyższa zależność pozwala na wyznaczenie temperatury obiektu T na podstawie zmierzonych irradiancji przy dwóch różnych długościach fali λ_1 i λ_2 , co jednocześnie stanowi zasadę działania pirometru dwubarwowego. Wtedy:

$$\frac{A_{1,2} u(\lambda_1, T)}{u(\lambda_2, T)} = \frac{\varepsilon(\lambda_1) \lambda_2^2 \exp(C_2/\lambda_2 T)}{\varepsilon(\lambda_2) \lambda_1^2 \exp(C_2/\lambda_1 T)}, \quad (3.4)$$

przy czym $A_{1,2}$ oznacza współczynnik korekcyjny wynikający z różnego tłumienia wnoszonego przez układ pomiarowy dla rozpatrywanych długości fali λ_1 i λ_2 . Jeśli przyjąć, że $\varepsilon(\lambda_1)/\varepsilon(\lambda_2) \cong 1$, wówczas na podstawie zależności (3.4) można wyznaczyć temperaturę $T_{1,2}$, wykorzystując w tym celu pomiar irradiancji dla dwóch różnych długości fali oraz zależność:

$$T_{1,2} = \frac{C_2 (1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}{\ln [A_{1,2} u(\lambda_1, T)/u(\lambda_2, T)] + 5 \ln (\lambda_1/\lambda_2)}, \quad (3.5)$$

Temperatura płomienia może być wyznaczona na podstawie powyższego wyrażenia, teoretycznie dla każdej pary λ_1 , λ_2 . Jednak

wskazany jest taki ich wybór, przy którym nie występują w płomieniu silne linie emisyjne gazów. Innym ograniczeniem jest założenie, że płomień jest ciałem doskonale szarym. Aby zminimalizować błędy związane z przyjętą metodą pomiaru, można wyznaczyć temperaturę płomienia w oparciu o zależność (3.5) dla wielu par λ_1 i λ_2 i wyznaczyć średnią arytmetyczną z uzyskanych pomiarów [2].

Zjawisko chemiluminescencji związane jest z generacją kwantów promieniowania ośrodka wzbudzonego (nie będącego w stanie równowagi termodynamicznej), zachodzące podczas reakcji chemicznej, np.:



Cząsteczka D^* , znajdująca się w stanie wzbudzonym, któremu odpowiada energia E_2 , może osiągnąć stan równowagi o energii E_1 , emitując przy tym kwant promieniowania o częstotliwości ν :



Nie jest to jedyny sposób osiągnięcia stanu równowagi, gdyż również możliwe jest oddawanie energii przy zderzeniu z innymi cząstkami. Zjawisko chemiluminescencji szerzej omówione jest np. w [100].

Długość fali emitowanego promieniowania zależy od rodzaju cząsteczki i odpowiadającej jej zmianie energii. Widmo promieniowania emitowanego na skutek chemiluminescencji składa się z kilku linii emisyjnych, grupujących się w charakterystyczne pasma, właściwe dla występujących rodników. W przypadku płomieni pyłowych są to głównie rodniki OH^* , CH^* , C_2^* , CO_2^* [81]. Reakcje, którym towarzyszy zjawisko chemiluminescencji wraz z charakterystyczną długością emitowanego promieniowania, dla wspomnianych rodników zestawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2 Najważniejsze rodniki występujące w płomieniu pyłowym i długości fal emitowanego przez nie promieniowania [42], [81].

Rodnik	Reakcja	λ (nm)
OH*	$\text{CH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{OH}^*$ $\text{H} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{OH}^* + \text{M}$ $\text{OH} + \text{OH} + \text{H} \rightarrow \text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	282,9; 308,9
CH*	$\text{C}_2\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}^*$ $\text{C}_2\text{H} + \text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{CH}^*$	387,1; 431,4
C ₂ *	$\text{CH}_2 + \text{C} \rightarrow \text{C}_2^* + \text{H}_2$	513; 516,5
CO ₂ *	$\text{CO} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{CO}_2^* + \text{M}$	350-600 (widmo ciągłe)
HNO*	$\text{H} + \text{NO} \rightarrow \text{HNO}^*$	450-520 (widmo ciągłe)

Dla wymienionych rodników, widma chemoluminescencji przypadają głównie na zakres UV i światło widzialne. Obok nich, występują także rodniki azotowe: NO*, HNO* i CN* .

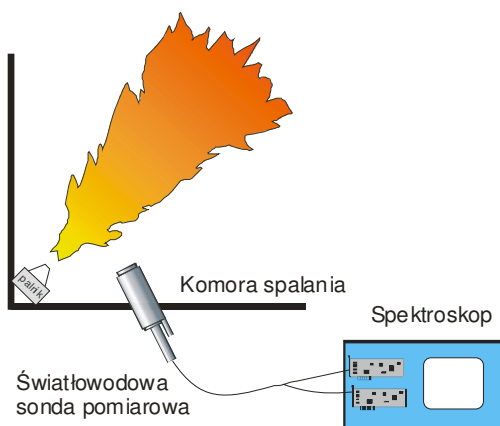
Występowanie rodników ograniczone jest w zasadzie do strefy reakcji ze względu na stosunkowo szybki czas powrotu cząsteczki do stanu równowagi. Wolne rodniki i niektóre pośrednie produkty powstające podczas reakcji spalania paliwa, OH*, CH*, CN*, powstają we froncie płomienia [102]. Widma emisyjne OH*, są dobrze skorelowane ze stosunkiem paliwo-powietrze i potencjalnie mogą zostać wykorzystane jako wskaźniki obecności NO_x [96], [103].

Z tego względu promieniowanie generowane na skutek chemoluminescencji wykorzystywane jest określania fluktuacji wydzielania się ciepła oraz przemieszczania się frontu płomienia [81], [104].

3.2.2 *Widma emisyjne płomienia pyłowego badane w warunkach przemysłowych*

Badanie widm emisyjnych płomieni pyłowych w warunkach przemysłowych nastęrcza szereg trudności, których źródłem są warunki wysokiego zapylenia, temperatury oraz wibracji. Użycie laboratoryjnego

spektrofotometru w takich warunkach jest z reguły niemożliwe. Dlatego, w celu zarejestrowania widma emisyjnego, wykorzystano spektrofotometr współpracujący z komputerem i światłowodowym układem monitorowania płomienia, który dokładniej został przedstawiony w [27], [93]. Schemat stanowiska pomiarowego przestawiono na rys. 3.2.



Rys. 3.2 Schemat układu przeznaczony do rejestracji widm emisyjnych płomienia w kotle energetycznym

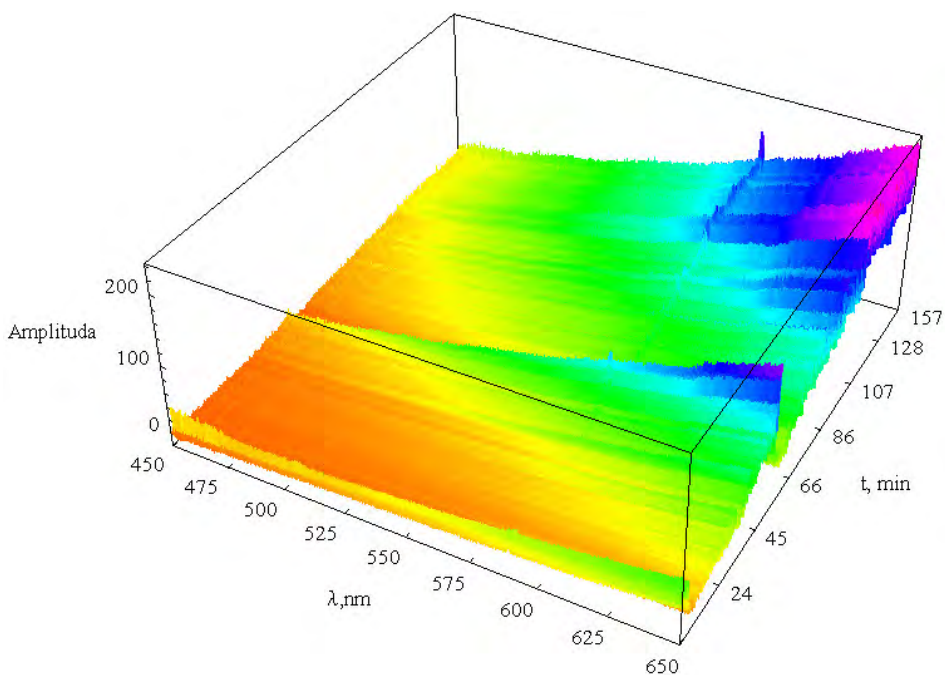
Sondę optyczną umieszczono wewnątrz komory spalania, w bezpośrednim sąsiedztwie zespołu palnikowego, składającego się z palnika pyłowego (głównego) oraz palnika mazutowego (pomocniczego) i gazowej zapalarki (rys. 3.2). Sygnał optyczny doprowadzony został do spektrofotometru AVS-PC2000, wyposażonego w siatki dyfrakcyjne i 2048-elementowy detektor w postaci linii CCD. Umożliwia to pomiar widma optycznego w zakresach odpowiednio $177 \div 877 \text{ nm}$ oraz $520 \div 1186 \text{ nm}$. Dedykowane oprogramowanie umożliwia sterowanie, wizualizację i zapis rejestrowanych widm w pamięci masowej [105].

Na rejestrowane za pomocą przedstawionego wcześniej układu pomiarowego widma płomienia, nakładają się charakterystyki tłumienia elementów toru optycznego oraz charakterystyka spektralna detektora krzemowego. W tym celu, układ do pomiaru widma został wstępnie skali-

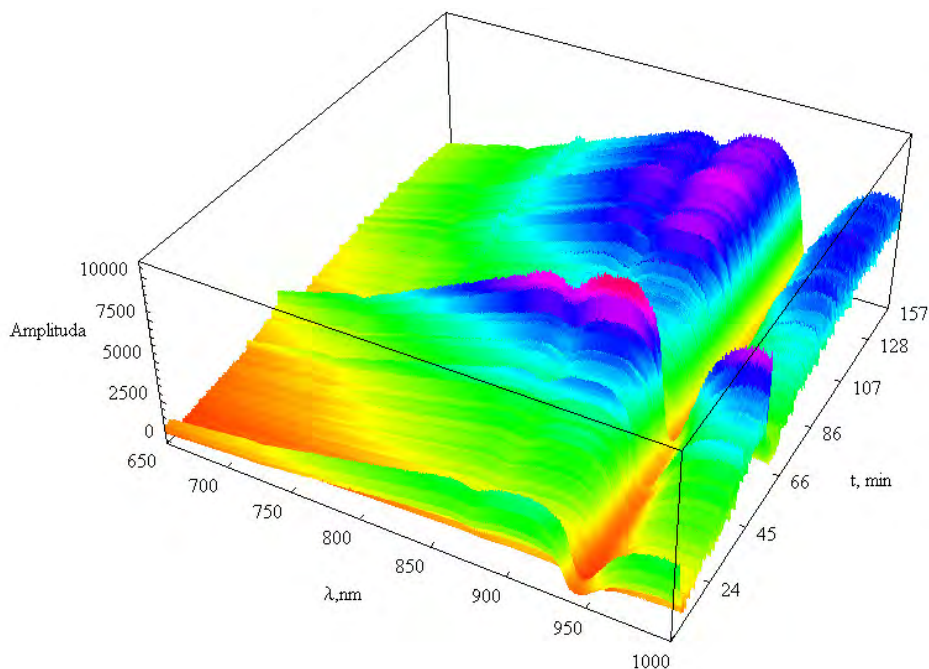
browany przy użyciu źródła szerokopasmowego oraz laboratoryjnych analizatorów widma Ando AQ-6317 oraz Anritsu MS 9030A.

Po skorygowaniu charakterystyki widmowej toru pomiarowego, zarejestrowano widmo płomienia w czasie rozruchu kotła energetycznego AP-1650, który wyposażony jest w narożne palniki strumieniowe. Rozruch kotła od stanu zimnego polega na włączeniu w początkowej fazie jedynie pomocniczych palników mazutowych, ponieważ temperatura jest zbyt niska do zainicjowania procesu wydzielania części lotnych z węgla. Z chwilą osiągnięcia odpowiedniej temperatury wewnątrz komory spalania (ok. 250°C) włączane są palniki pyłowe. Po osiągnięciu kolejnego progu temperatury, wyłączane są palniki mazutowe. Zarejestrowane zmiany widma płomienia w czasie rozruchu kotła zostały przedstawione na rys. 3.3.

a)

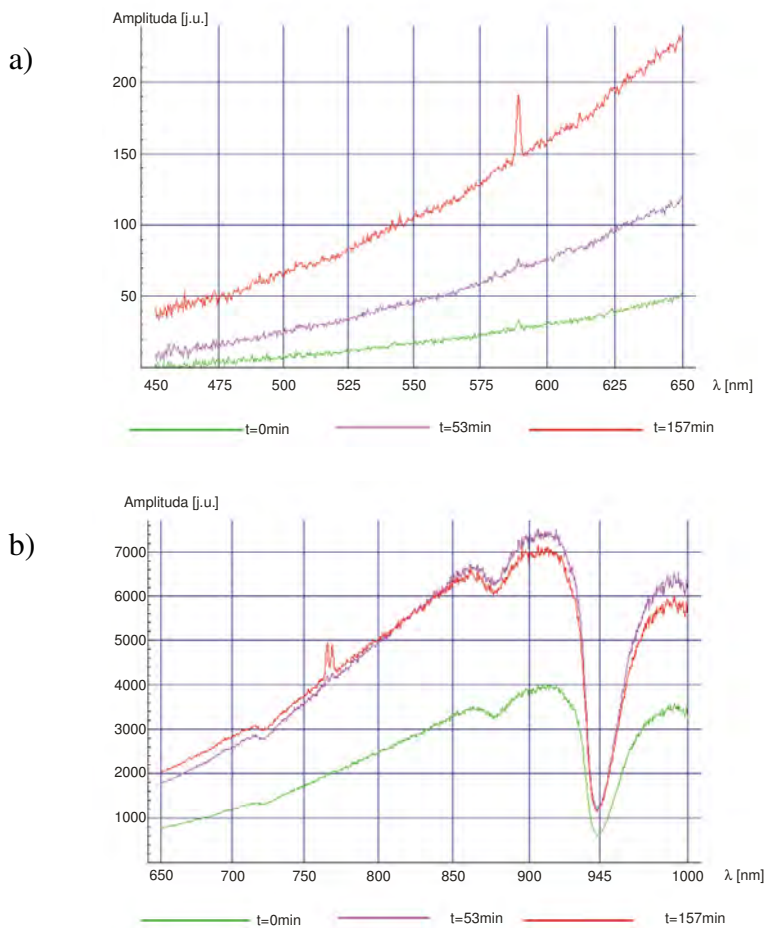


b)



Rys. 3.3. Zmiany widma emisyjnego płomienia podczas rozruchu kotła w zakresie: a) 450÷650nm, b) 650÷1000nm

Zakres rejestrowanego widma obejmuje w sumie przedział 450÷1000nm. Podczas rozpalania kotła widoczny jest wzrost amplitudy w całym zakresie widmowym spowodowany stopniowym wzrostem temperatury w płomieniu. W ok. 50. minucie trwania testu włączony został palnik pyłowy. Podczas trwania całego testu, widmo ma charakter ciągły, przy czym uwagę zwraca obserwowany wyraźny spadek wokół 943nm spowodowany absorpcją pary wodnej, jak widać na rys. 3.3 b) oraz rys. 3.4 b).



Rys. 3.4. Widma emisyjnego płomienia podczas rozruchu kotła w zakresie: a) 450÷650nm, b) 650÷1000nm, zarejestrowane w wybranych chwilach czasu, odpowiadających poszczególnym fazom rozruchu kotła

Dla fali o długości 589nm można zauważyć pik emisyjny, którego intensywność zdecydowanie wzrasta przy włączonym palniku pyłowym, jak pokazano na rys. 3.3 a) oraz rys. 3.4 a). W podobny sposób pojawia się podwójny pik emisyjny 765nm i 769nm pojawia się dopiero po włączeniu palnika pyłowego, co może wskazywać na obecność części lotnych, wydzielanych z cząstek węgla pod wpływem wzrastającej temperatury, jak wskazuje rys. 3.4 b).

Przeprowadzone badania ze względu na niewielką rozdzielczość przyrządu (ok. 0,3nm) oraz zakres widmowy obejmujący głównie zakres widzialny, nie pozwalały na przeprowadzenie dokładniejszej analizy spektralnej widma promieniowania emitowanego przez płomień pyłowy. Co więcej, przeprowadzone były tylko dla jednej strefy płomienia. Na ich podstawie można jednak stwierdzić, że w zakresie czułości widmowej przetwornika obrazowego, (najczęściej krzemowego) dominujący wpływ na charakter widma promieniowania docierającego do umieszczonego w komorze spalania detektora jest widmo ciągłe, zbliżone do widma ciała doskonale czarnego, którego źródło stanowią rozgrzane cząstki stałe znajdujące się w płomieniu (pył węglowy, sadza, popiół, itp.).

3.2.3 Właściwości optyczne płomienia pyłowego

Rozpatrując właściwości ośrodka optycznego jakim jest płomień pyłowy, należy uwzględnić zachodzące tam zjawiska rozpraszania i pochłaniania promieniowania na cząstkach stałych. Nieregularność kształtu cząstek może zostać pominięta przy założeniu, że mają one kształt kuli o odpowiednim rozkładzie wartości promienia [106]. Właściwości optyczne chmury cząstek mogą być określone na podstawie zależności [107]:

$$\eta(m, N, \lambda) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{\eta}(m, r, \lambda) p(r) dr, \quad (3.8)$$

gdzie:

η – oznacza współczynnik zarówno ekstynkcji – (β), rozpraszania (σ) jak i absorpcji (κ) promieniowania, przy czym $\beta = \kappa + \sigma$,

Q_{η} – współczynnik efektywności określany dla ekstynkcji, rozpraszania i absorpcji,

m – zespolony współczynnik załamania światła rozpatrywanej chmury cząstek, przy czym $m = n - jk$,

N – koncentracja cząstek,

r – promień cząstki,

$p(r)$ – rozkład promieni cząstek.

Współczynnik efektywności ekstynkcji – Q_β i rozpraszania – Q_σ może zostać wyznaczony w oparciu o teorię Mie [108]:

$$Q_\beta = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re} \left(\frac{\psi'_n(mx)\psi_n(x) - m\psi_n(mx)\psi'_n(x)}{\psi'_n(mx)\zeta_n(x) - m\psi_n(mx)\zeta'_n(x)} + \frac{m\psi'_n(mx)\psi_n(x) - \psi_n(mx)\psi'_n(x)}{m\psi'_n(mx)\zeta_n(x) - \psi_n(mx)\zeta'_n(x)} \right), \quad (3.9)$$

$$Q_\sigma = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re} \left(\left| \frac{\psi'_n(mx)\psi_n(x) - m\psi_n(mx)\psi'_n(x)}{\psi'_n(mx)\zeta_n(x) - m\psi_n(mx)\zeta'_n(x)} \right|^2 + \left| \frac{m\psi'_n(mx)\psi_n(x) - \psi_n(mx)\psi'_n(x)}{m\psi'_n(mx)\zeta_n(x) - \psi_n(mx)\zeta'_n(x)} \right|^2 \right), \quad (3.10)$$

gdzie $x = 2\pi r/\lambda$ – parametr kształtu, $\psi_n(x)$, $\zeta_n(x)$ są funkcjami Riccatiego-Bessela, które są definiowane za pomocą funkcji Bessela (J) i Henkela (H):

$$\psi_n(x) = (\pi x/2)^{1/2} J_{n+1/2}(x), \quad (3.11)$$

$$\zeta_n(x) = (\pi x/2)^{1/2} H^{(2)}_{n+1/2}(x). \quad (3.12)$$

W przypadku pyłu węglowego i koksu, których średnica ($2r$) jest rzędu $100\mu\text{m}$, dla zakresu fal $1\div 10\mu\text{m}$, parametr kształtu x jest stosunkowo duży i wynosi ok. $10\pi\div 100\pi$. Przy takich warunkach, dopuszczalne jest przyjęcie następujących przybliżeń współczynników ekstynkcji i absorpcji (Q_k) [108]:

$$Q_\beta(x, m) = 2, \quad (3.13)$$

$$Q_k(x, m) = \frac{1}{2}(f_1 + f_2), \quad (3.14)$$

przy uwzględnieniu:

$$f_i = \frac{8}{q_i^2} \left[q_i - \ln \left(1 + q_i + \frac{1}{2} q_i^2 \right) \right], \quad i = 1, 2 \quad (3.15)$$

oraz:

$$q_1 = \frac{1}{\sqrt{nk}}, \quad q_2 = \frac{2}{q_1}. \quad (3.16)$$

Rozkład średnic cząstek popiołu, przy założeniu ich kulistego kształtu, zależy od rodzaju węgla i zawiera się w przedziale od ok. $1 \div 90 \mu\text{m}$, przy czym największą ilość stanowią cząstki o średnicach od 1 do $10 \mu\text{m}$ [109]. Zakładając że typowa wartość parametru kształtu x cząstki popiołu jest znacznie większa od 1, można przyjąć następujące, uproszczone postacie wyrażenia współczynników ekstynkcji i absorpcji [108]:

$$Q_\beta(x, m) = 2 - \frac{4 \sin[2x(n-1)]}{2x(n-1)} + \frac{4[1 - \cos(2x(n-1))]}{[2x(n-1)]^2}, \quad (3.17)$$

$$Q_\kappa(x, m) = 1 + \frac{e^{-4xk}}{2xk} + \frac{e^{-4xk} - 1}{8x^2k^2}. \quad (3.18)$$

Współczynnik kształtu dla cząstek sadzy, których rozmiary są ok. $0,02 \div 0,06 \mu\text{m}$, jest mniejszy od 0,2; stąd można zastosować w takim przypadku ogólne rozwiązanie Mie [108].

Na widmo ciągłe stałych składników płomienia nałożone są linie widmowe, pochodzące od składników gazowych, na które składają się gazowe produkty pirolizy węgla oraz produkty spalania, przede wszystkim para wodna i CO_2 , ale także: NO , SO_2 , CO oraz węglowodory. Należy podkreślić, że całkowity udział w emisji promieniowania płomienia pyłowego gazów innych niż para wodna i CO_2 jest niewielki i zazwyczaj może zostać pominięty [110].

4 Obrazy płomienia i metody ich analizy

Obraz stanowi przestrzenny rozkład informacji, niezależnie od rodzaju zastosowanego nośnika, którym może być promieniowanie elektromagnetyczne, wiązka elektronów, ale również potencjał elektrostatyczny, chemiczny, miara ukształtowania powierzchni, itp. [111]. Pojęcie informacji przestrzennej, powszechnie utożsamianej z informacją optyczną, jest więc pojęciem szerszym i niezależnym od nośnika informacji. W niniejszej pracy rolę optycznego nośnika informacji pełni promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie światła widzialnego.

Przetwarzanie informacji w takim przypadku odbywa się w układzie przetwarzania obrazu. Pierwszym etapem tego procesu jest obrazowanie, które polega na przeniesieniu i zlokalizowaniu, przy zachowaniu relacji sąsiedztwa, dowolnego przedmiotu punktowego w polu widzenia w inny, niewielki obszar, umownej przestrzeni obrazowej. Wspomniane przeniesienie i lokalizacja, zachodzą wokół wyróżnionego w przestrzeni obrazowej obszarze geometrycznego obrazu tego przedmiotu [112]. Procesy te dokonywane są najczęściej za pomocą klasycznych układów optycznych wytwarzających obraz.

Z punktu widzenia teorii informacji, obrazowanie można traktować jako przestrzenną linię łączności, w której poszczególnym kanałom, mającym charakter przestrzenny, odpowiadają rozłożone w płaszczyźnie obrazu wyjściowego obszary, stanowiące najmniejsze elementy obrazu [112]. Wspomniane elementy nazywane są pikselami. W danej chwili czasowej, kanał może zawierać informację o jednym z rozróżnialnych poziomów intensywności, przy czym ma on ograniczone pasmo przenoszenia w dziedzinie czasu, wynikające z bezwładności układu obrazowania. Powoduje to ograniczony okres trwania kadru.

Całkowita ilość informacji przenoszona przez układ obrazowania zależy od:

- ilości informacji strukturalnej, która jest związana z liczbą pikseli;

- ilości informacji metrycznej, uzależnionej od liczby rozróżnialnych poziomów intensywności;
- ilość informacji czasowej, która wynika z liczby przesyłanych kadrów w jednostce czasu.

W niniejszym rozdziale przybliżone zostaną specyficzne właściwości obrazu płomienia z uwzględnieniem problemu określenia krawędzi płomienia. W dalszej kolejności zostaną zaprezentowane definicje geometrycznych parametrów kształtu płomienia oraz wykorzystywane w pracy narzędzia – analiza składowych głównych oraz krótkoczasowa transformata Fouriera.

4.1 Obraz płomienia

W badaniach płomieni w zakresie widzialnym, obrazy wytwarzane są przez kamery wyposażone w krzemowe przetworniki obrazowe. Kamery przeznaczone do pracy w zakresie widzialnym, zazwyczaj posiadają wbudowany filtr odcinający promieniowanie podczerwone powyżej ok. 800nm. Jest to szczególnie ważne w przypadku badań płomieni, gdzie tylko niewielka część energii promieniowania przypada na zakres widzialny. Kamery kolorowe wykorzystują matrycę wyposażoną najczęściej w filtr mozaikowy (tzw. filtr Bayera) [113].

Dzięki obecności elementu obrazującego (obiektyw, boroskop), emitowane przez płomień promieniowanie dociera do przetwornika wizyjnego, wytwarzając na jego płaszczyźnie obraz, będącym ciągłym rozkładem irradacji. Następnie obraz ten podlega operacji próbkowania przestrzennego w przetworniku obrazowym, który składa się z macierzy elementów światłoczułych (pikseli), jak pokazano na rys. 4.1.

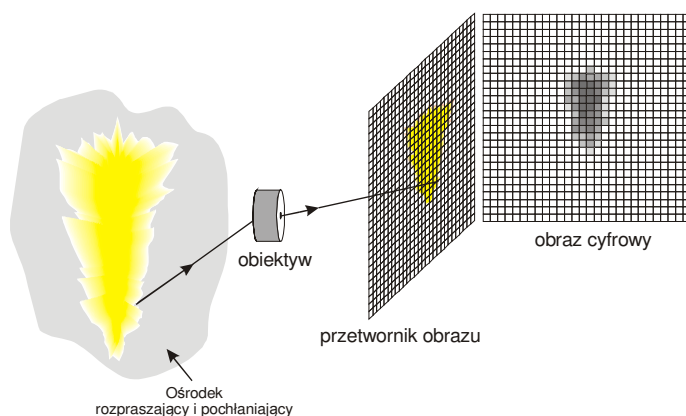
Półprzewodnikowe przetworniki obrazowe wykonywane są najczęściej jako elementy typu CCD lub CMOS. Uzyskiwana rozdzielczość przestrzenna zależy od parametrów konstrukcyjnych przetwornika, a przede wszystkim od rozmiarów pikseli, która w przypadku

współczesnych kamer wynosi od kilku- do kilkudziesięciu μm . Pojedynczy piksel można traktować jak element całkujący – poziom sygnału na jego wyjściu jest tym większy, im dłuższy jest jego czas naświetlania (ekspozycji). Współczesne kamery cyfrowe zawierają przetworniki wizyjne składające się od kilkuset tysięcy do kilku milionów pikseli [114], [115].

Poziomy sygnałów uzyskanych na wyjściu matrycy światłoczułej zależą od ilości energii docierającej do przetwornika obrazu. W przypadku toru wizyjnego przeznaczonego do analizy płomienia, poziomy te zależą w szczególności od:

- odległości między płomieniem a obiektywem kamery,
- długości ogniskowej obiektywu,
- jasności obiektywu,
- czasu ekspozycji,
- wzmocnienia wewnętrznego kamery.

Sygnał z każdego piksela jest następnie zamieniany w przetworniku A/C na postać cyfrową, najczęściej z 8 bitową rozdzielczością. Oznacza to, że zmiany poziomu irradiacji odpowiadające zakresowi dynamiki przetwornika obrazu, odwzorowywane są w przedział wartości liczbowych od 0 do 255.



Rys. 4.1. Powstawanie obrazu płomienia

W czasie badań płomienia z wykorzystaniem kamer, wymienione wcześniej parametry układu obrazowania, od których zależy jasność obrazu, nie powinny być zmieniane.

Podczas testów wykorzystywano kamerę cyfrową MC1311 firmy Mikrotron, o następujących parametrach:

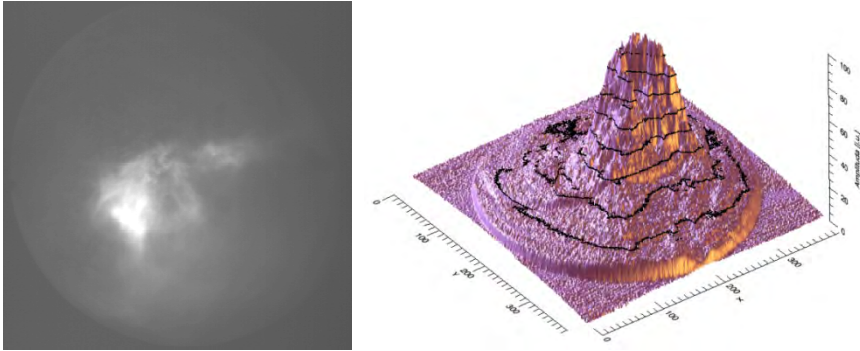
- przetwornik wizyjny CMOS o rozdzielczości 1280×1024 pikseli (12×12μm) o rozmiarach 15,36×12,59mm,
- zakres dynamiki – 59dB,
- czułość - 1600 bit/lux·s przy 550nm,
- szybkość akwizycji 500 klatek/s dla rozdzielczości 1280×1024.

Kamera pozwala na odczyt obrazu dla predefiniowanej grupy pikseli tzw. regionu zainteresowania (ang. *region of interest*) w obrębie przetwornika wizyjnego.

4.2 Wyznaczanie krawędzi płomienia

Analiza kształtu płomienia wymaga przyjęcia definicji obszaru i krawędzi płomienia. Jak wspomniane było w rozdziale 2, płomień towarzyszy egzotermicznym reakcjom utleniania. Obecność płomienia związana jest więc z miejscem w przestrzeni, gdzie taki rodzaj reakcji występuje. Trudno jest jednak w takim przypadku wskazać granicę oddzielającą przestrzeń, w której spalanie występuje, ponieważ stężenia reagentów nie zmieniają się w sposób skokowy. Głównym źródłem promieniowania w płomieniu pyłowym jest obłok rozgrzanych do wysokiej temperatury cząstek stałych (pyłu węglowego, sadzy, popiołu itp.). Ponieważ koncentracja świecących cząstek nie zmienia się skokowo, nie można wyróżnić krawędzi płomienia, jak np. w przypadku ciała stałego. Występujące w płomieniu zjawiska pochłaniania i rozpraszania promieniowania wprowadzają dodatkowe niejednoznaczności w określeniu granicy płomienia. Z powyższych przyczyn, krawędź płomienia ma charakter umowny.

Wewnątrz komory spalania nie występują, poza płomieniem, inne źródła promieniowania, mogące wprowadzać zakłócenia. Dlatego za podstawę kwalifikacji obszaru płomienia można przyjąć strumień promieniowania u padający na jednostkę powierzchni, której miarą dla obrazu cyfrowego jest amplituda piksela, jak pokazano na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Przykładowy obraz płomienia i jego rozkład jasności, na którym zaznaczono punktu o jednakowej jasności

Przyjmując, że płomień stanowi ciało doskonale czarne, na podstawie prawa Plancka, można wyznaczyć wartość strumienia promieniowania, w zakresie światła widzialnego (tj. od 380 do 780nm) zgodnie z zależnością:

$$u(T) = \int_{\lambda=380nm}^{\lambda=780nm} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} d\lambda. \quad (4.1)$$

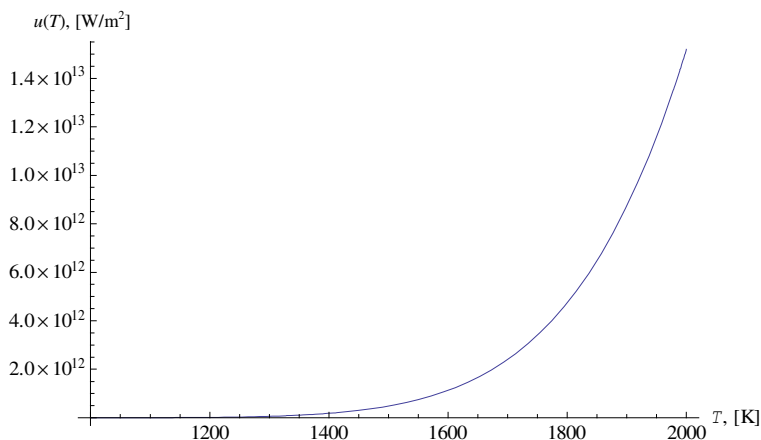
Strumień promieniowania $u(T)$, jest monotonicznie rosnącą funkcją temperatury, a jego wartości, obliczone w zakresie 1000÷2000 K przedstawia rysunek 4.3.

Wynika stąd, że w zakresie widzialnym poziom sygnału na wyjściu danego piksela jest tym wyższy, im wyższa temperatura tego obszaru płomienia, którego ten piksel jest odwzorowaniem, przy niezmiennych parametrach układu obrazowania.

Przyjęto prostą definicję obszaru płomienia [116], [117]. Piksel o współrzędnych x , y i amplitudzie wynoszącej $a_{x,y}$ należy do obszaru płomienia, jeżeli:

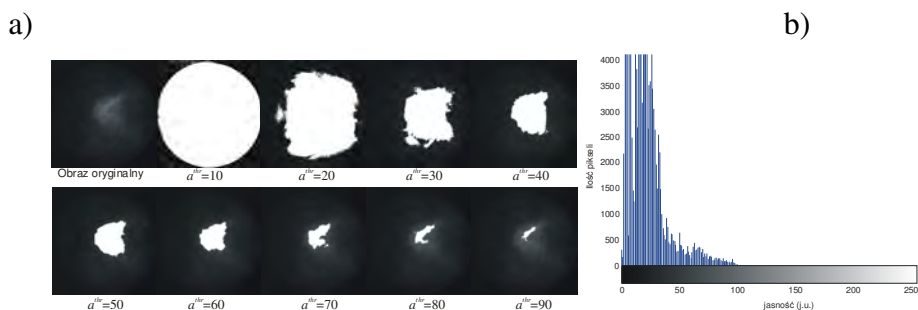
$$a_{x,y} \geq a^{thr}, \quad (4.2)$$

przy czym a^{thr} jest arbitralnie przyjętą wartością progową. Można założyć, że zbiór pikseli, dla którego w powyższej zależności występuje równość, stanowi krawędź płomienia.



Rys. 4.3. Zależność strumienia promieniowania ($\lambda = 380 \div 780\text{nm}$) od temperatury

Przyjęcie określonej wartości a^{thr} wpływa na wielkość obszaru płomienia i jego kształt. Wyznaczony w przyjęty sposób obszar płomienia zależy od przyjętej wartości progę, jak zostało to zilustrowane na rys. 4.4.



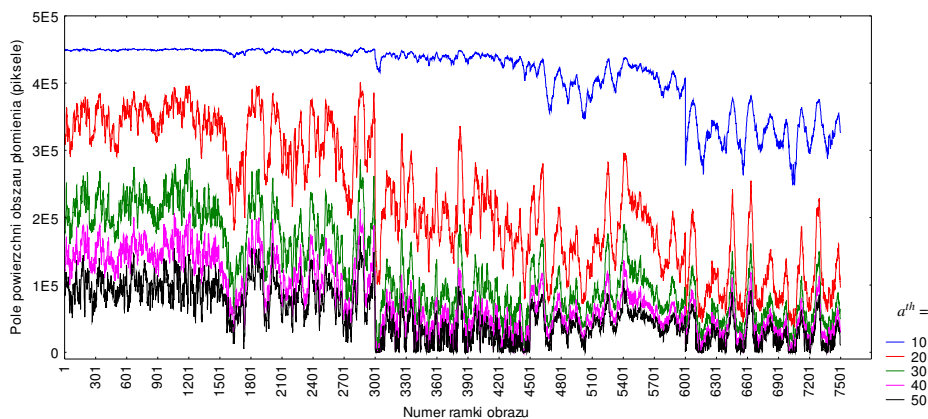
Rys. 4.4. Oryginalny obraz płomienia z zaznaczonymi obszarami płomienia wyznaczonymi na podstawie wartości progowej pikseli – a), histogram obrazu – b)

Przyjęcie zbyt niskiej wartości progu uniemożliwia jakąkolwiek analizę kształtu płomienia, ponieważ jego obszar wypełnia cały rejestrowany kadr. Przypadek taki został pokazany na rys. 4.4 a) dla wartości a^{thr} wynoszących 10 i 20. Z drugiej strony, przyjęcie wartości progowej o stosunkowo dużych wartościach, np. $a^{thr} = 80, 90$ – rys. 4.3 a), skutkuje coraz mniejszym obszarem płomienia, aż do jego całkowitego zaniku.

Odpowiednia wartość a^{thr} dla danego obrazu, może być szacowana na podstawie jego histogramu, który dla obrazu z rys. 4.4 a) został pokazany na rys. 4.4 b). Wynika z niego, że obraz cechuje się stosunkowo niewielką rozpiętością tonalną, a piksele o jasności powyżej 100 j.u. praktycznie w nim nie występują. Możliwe jest, poprzez operację wyrównania histogramu, zwiększenie rozpiętości tonalnej przetwarzanego obrazu, ale tracona jest wtedy informacja o zmianach jasności płomienia w sekwencji obrazów, gdyż wyrównanie histogramu dokonywane jest dla każdego obrazu oddzielnie.

Określenie wartości progowej amplitudy przy wyodrębnianiu obszaru płomienia jest trudne, gdy zmieniające się w czasie parametry wejściowe palnika (właściwości fizykochemiczne paliwa, wydatki powietrza, paliwa, itp.) powodują zmiany natężenia promieniowania płomienia przekraczające zakres dynamiki przetwornika obrazu. Wpływ przyjęcia różnej wartości amplitudy na wielkość obszaru płomienia, zdefiniowanego jako ilość pikseli o amplitudzie nie mniejszej od przyjętej wartości progowej a^{thr} , został przedstawiony na rys. 4.5.

W czasie przykładowego testu, zmniejszono wydatek paliwa dostarczanego do komory spalania. Przyjęcie niskiej wartości progowej, powodowało zakwalifikowanie praktycznie całego kadru jako obszar płomienia (por. rys. 4.3). Przyjęcie z kolei zbyt dużej wartości progowej uniemożliwiało zakwalifikowanie któregośkolwiek piksela jako obszaru płomienia, tak jak w przypadku braku obecności płomienia.



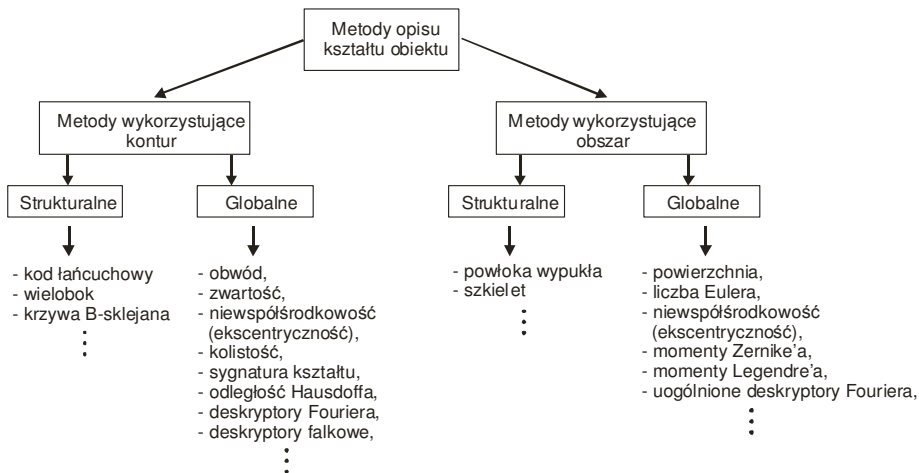
Rys. 4.5. Zmiany pola powierzchni płomienia dla różnych wartości progowych a^{thr} przy zmiennym wydatku paliwa

4.3 Parametry geometryczne płomienia

Wykorzystanie kształtu płomienia do diagnozowania procesu spalania związane jest z użyciem metod opisu kształtu obiektu. Generalnie, rozróżnia się dwie klasy metod opisu kształtu, wśród których wyróżnia się [118], [116]:

- metody wykorzystujące kontur,
- metody wykorzystujące obszar.

Dla obydwu wymienionych rodzajów metod, możliwe jest wyróżnienie podejścia globalnego i strukturalnego. W przypadku podejścia globalnego, kontur bądź obszar analizowany jest w całości, bez jego podziału na oddzielne części. Krawędź lub obszar obiektu reprezentowana jest poprzez opisujące ją wielkości, które tworzą wektor cech. Przeciwnieństwem jest podejście strukturalne, w którym kontur lub obszar dzielony jest na segmenty według zadanego kryterium. Krawędź obiektu jest w takim przypadku reprezentowana przez strukturę łańcucha lub grafu [118]. Sposób klasyfikacji wybranych metod opisu kształtu przedstawia rys. 4.1.



Rys. 4.6. Podział metod opisu kształtu obiektu [118]

Metody wykorzystujące kontur obiektu uwzględniają jedynie kształtu granicy obiektu. Metody globalne reprezentacji konturu polegają zazwyczaj na wyznaczeniu wektora cech, będącego jego reprezentacją. Możliwe jest także wykorzystanie do tego tylko jednej cechy kształtu. W dalszej części przedstawiono zastosowanie wybranych parametrów geometrycznych opisujących kształt płomienia.

Długość konturu L , jest jednym z globalnych parametrów opisujących kształt obiektu. Obliczany jest jako suma odległości pomiędzy pikselami rozpatrywanego konturu, przy czym jeśli dwa piksele położone są równoległe 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.

Kolistość (sferyczność) C_{kl} , obszaru jest miarą jego podobieństwa do okręgu i definiowana jako:

$$C_{kl} = \frac{A}{r_{\max}^2 \cdot \pi}, \quad (4.3)$$

przy czym: A oznacza pole obszaru płomienia, r_{\max} jest maksymalną odległością pomiędzy pikselami wchodzącymi w skład konturu a środkiem obszaru płomienia. Wartość C_{kl} , gdy rozpatrywany obszar jest okręgiem wynosi 1, jeśli natomiast jest wydłużony lub jest obszarem wklęsłym, wówczas C_{kl} jest mniejsze od 1.

Pole powierzchni obszaru A , definiowane jest jako suma pikseli, które składają się na jego obszar. Parametr ten jest miarą wielkości obszaru. Taki sposób definicji nie uwzględnia amplitud poszczególnych pikseli, tworzących rozpatrywany obszar.

Współrzędne środka ciężkości obszaru, definiowane są jako znormalizowane momenty $M_{0,1}$ i $M_{1,0}$, przy czym moment $M_{p,q}$ wyznaczany jest na podstawie zależności:

$$M_{p,q} = \frac{1}{A} \sum_{x,y} x^p y^q a_{x,y}. \quad (4.4)$$

W powyższej zależności x, y , oznaczają współrzędne rozpatrywanego piksela należącego do rozpatrywanego obszaru, natomiast $a_{x,y}$ jest jego jasnością.

Moment centralne obszaru rzędu od 1 do 4 – I_1, I_2, I_3, I_4 , wyznaczone w oparciu o zależności:

$$I_1 = M_{2,0}M_{0,2} - M_{1,1}^2, \quad (4.5)$$

$$I_2 = (M_{3,0}M_{0,3} - M_{2,1}M_{1,2})^2 - 4(M_{3,0}M_{1,2} - M_{2,1}^2)(M_{2,1}M_{0,3} - M_{1,2}^2), \quad (4.6)$$

$$I_3 = M_{2,0}(M_{2,1}M_{0,3} - M_{1,2}^2) - M_{1,1}(M_{3,0}M_{0,3} - M_{2,1}M_{1,2}) + M_{0,2}(M_{3,0}M_{1,2} - M_{2,1}^2), \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}
I_4 = & M_{3,0}^2 M_{0,2}^3 - 6M_{3,0} M_{2,1} M_{1,1} M_{0,2}^2 + 6M_{3,0} M_{1,2} M_{0,2} (2M_{1,1}^2 - M_{2,0} M_{0,2}) + \\
& M_{3,0} M_{0,3} (6M_{2,1} M_{1,1} M_{0,2} - 8M_{1,1}^3) + 9M_{2,1}^2 M_{2,0} M_{0,2}^2 - 18M_{2,1} M_{1,2} M_{2,0} M_{1,1} M_{0,2} \\
& + 6M_{2,1} M_{0,3} M_{2,0} (2M_{1,1}^2 - M_{2,0} M_{0,2}) + 9M_{1,2}^2 M_{2,0}^2 M_{0,2} \\
& - 6M_{1,2} M_{0,3} M_{1,1} M_{2,0}^2 + M_{0,3}^2 M_{2,0}^3.
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Zwartość C_{zw} , będąca wielkością zależną od długości konturu płomienia L i pola powierzchni obszaru płomienia A , określona następująco:

$$C_{zw} = L^2 / 4\pi A, \tag{4.9}$$

Wypukłość (C_{wyp}) obszaru definiowana jako iloraz jego powierzchni do powierzchni jego otoczki wypukłej (powłoki wypukłej, uwypuklenia). Jeżeli obszar zawiera dziury lub wgłębienia, wówczas wypukłość < 1 ,

Prostokątność (C_{prost}), zdefiniowana jako różnica pomiędzy powierzchnią prostokąta o identycznych jak rozpatrywany obszar momentach centralnych I_1, I_2 , a tym obszarem [119],

Promienie (R_A, R_B) oraz kąt nachylenia (φ) elipsy, wyznaczonej na podstawie momentów $M_{p,q}$ wyznaczonych dla obszaru płomienia, gdzie:

$$R_A = \frac{1}{2} \sqrt{8 \left(M_{20} + M_{02} + \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2} \right)}, \tag{4.10}$$

$$R_B = \frac{1}{2} \sqrt{8 \left(M_{20} + M_{02} - \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2} \right)}, \tag{4.11}$$

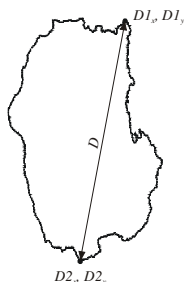
$$\varphi = -\frac{1}{2} \arctg 2(2M_{11}, M_{02} - M_{20}), \tag{4.12}$$

$$M_{p,q} = \sum_{(Z,S) \in R} (Z_0 - Z)^p (Z_0 - Z)^q, \tag{4.13}$$

przy czym Z_0, S_0 są współrzędnymi środka obszaru płomienia, a Z i S są współrzędnymi wszystkich punktów obszaru płomienia,

Najbardziej wysunięte punkty obszaru

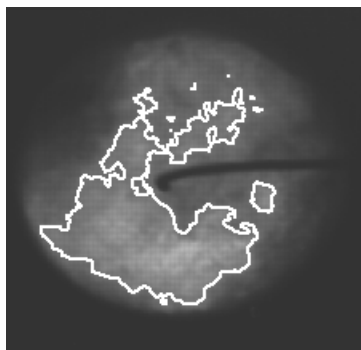
Współrzędne dwóch najbardziej odległych od siebie punktów obszaru płomienia ($D1_x, D1_y, D2_x, D2_y$) i odległość między nimi (D) – rys 4.7.



Rys. 4.7. Najbardziej odległe punkty obszaru

Jednorodność obszaru

Parametrami wskazującym na regularność obszaru, może być ilość jego rozłącznych części, jak pokazano na rys. 4.8 oraz sumaryczna ilość dziur w tym obszarze.



Rys. 4.8. Przykład obszaru płomienia, na który składa się kilka oddzielnych części

4.4 Deskryptory Fouriera

Kształt obiektu jest jego jedną z bardziej istotnych obserwowalnych cech, na podstawie których można dokonać klasyfikacji. Kształt obiektu reprezentowany jest przez jego kontur, który tworzą piksele obrazu,

umownie traktowane jako jego krawędź. Istnieje wiele sposobów matematycznej reprezentacji krawędzi, z których najczęściej stosowane są m.in.:

- kody łańcuchowe [120],
- modele autoregresyjne [121],
- deskrytory falkowe [122],
- deskrytory Fouriera [123], [124].

Opis krawędzi za pomocą deskryptorów Fouriera (FD – ang. *Fourier Descriptors*) wykorzystuje dobrze znaną z teorii sygnałów, analizę fourierowską. W odróżnieniu od innych metod reprezentacji krawędzi, FD są łatwe w implementacji i posiadają ugruntowaną interpretację fizyczną. Typowe zastosowania FD to rozpoznawanie tekstu i klasyfikacja obiektów [118], [125].

Aby opis krawędzi płomienia za pomocą deskryptorów Fouriera był możliwy, zdefiniowany w taki sposób obszar płomienia powinien być jednorodny [126]. Jeżeli obszar płomienia składa się z oddzielnych konturów zamkniętych, analiza za pomocą FD przeprowadzane jest dla każdego z nich osobno.

Opis krawędzi za pomocą deskryptorów Fouriera wymaga przyjęcia punktu startowego oraz kierunku obiegu. Zazwyczaj przyjmuje się, że jest to lewy górny piksel oraz obieg zgodny z ruchem wskazówek zegara, jak pokazano na rys. 4.9.



Rys. 4.9. Przykładowy kontur płomienia z zaznaczonym punktem startowym oraz kierunkiem obiegu

Niech krawędź obszaru składającą się z N pikseli, reprezentuje zespolony wektor \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} x_1 + jy_1 \\ x_2 + jy_2 \\ \vdots \\ x_N + jy_N \end{pmatrix}, \quad (4.14)$$

gdzie x_i , y_i oznaczają i -te współrzędne piksela krawędzi płomienia. Wówczas m -ty deskryptor Fouriera dany jest w postaci:

$$F_m = \sum_{k=0}^{N-1} B_k e^{-\frac{j2\pi km}{N}}, \quad (4.15)$$

przy czym $B_k = x_k + jy_k$.

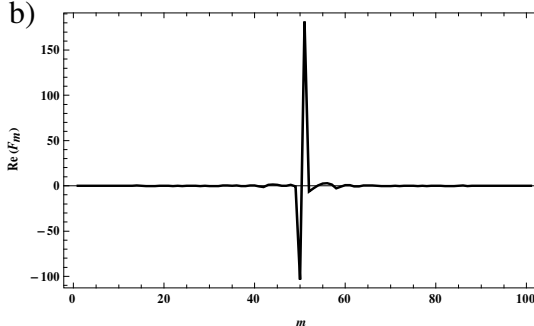
Deskryptor odpowiadający zerowej częstotliwości, odpowiada środkowi ciężkości konturu i wskazuje na jego przesunięcie w płaszczyźnie obrazu. Pozostałe deskryptory opisują kształt konturu w sposób niezależny zarówno od jego położenia na płaszczyźnie, jak i rozmiaru. Deskryptory odpowiadające składowym niskoczęstotliwościowym reprezentują globalne cechy konturu, podczas, gdy deskryptory wysokoczęstotliwościowe zawierają jego cechy lokalne.

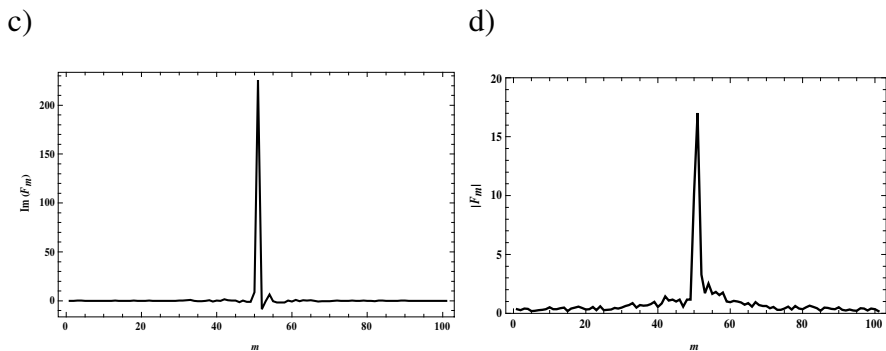
Przykładowa krawędź obszaru płomienia przedstawiona jest na rys. 4.10 a). Została ona spróbkowana w 100 punktach, tworząc w ten sposób wektor \mathbf{B} , o długości $N=100$. Rysunek 4.10 b) i c) pokazuje odpowiednio: część rzeczywistą i urojoną deskryptorów wyznaczonych dla konturu z rys. 4.10 a).

a)



b)





Rys. 4.10. a) Przykładowy kontur płomienia i jego reprezentacja w postaci deskryptorów Fouriera: b) część rzeczywista FD, c) część urojona FD, d) moduł FD

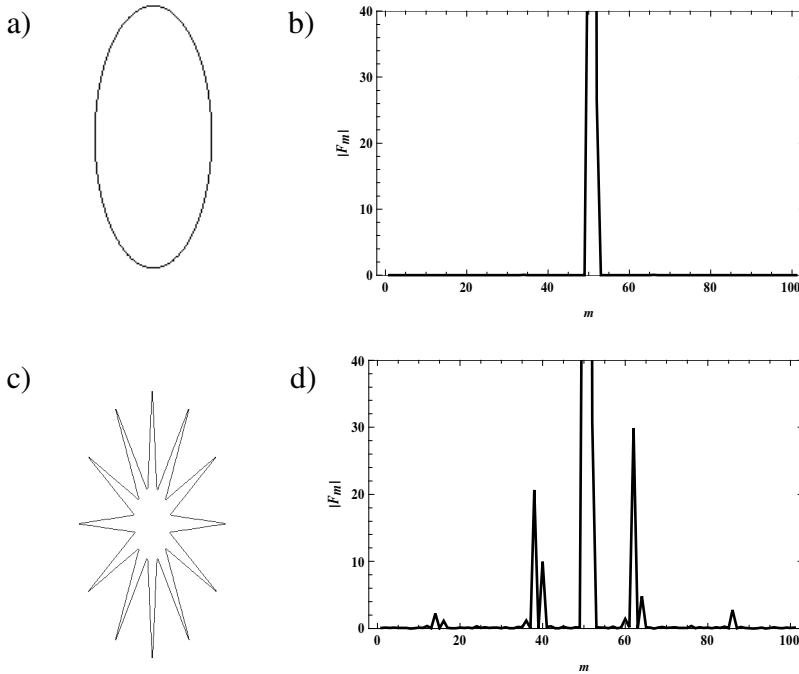
Deskryptory Fouriera krawędzi rozmieszczone są na wykresie zazwyczaj w innej kolejności niż współczynniki rozwinięcia Fouriera. Szereg aplikacji, jak np. Matlab (funkcja `fftshift`), deskryptor odpowiadający częstotliwości zerowej, umieszcza w środku osi, a nie na jej początku – jak w przypadku klasycznej analizy fourierowskiej. Przykładowo, gdy ilość deskryptorów opisujących kontur wynosi $N=100$, indeks $m=50$ wskazuje na deskryptor częstotliwości zerowej, którego część rzeczywista i urojona są współrzędnymi środka ciężkości konturu. Deskryptory odpowiadające niskim częstotliwościom mają indeksy o wartościach, w prezentowanym przykładzie, bliskich 51, i to zarówno większych od niej ($m = 51, 52, 53, \dots$), jak i mniejszych ($m = 49, 48, 47, \dots$). Deskryptory wysokoczęstotliwościowe mają indeksy na początku osi ($m = 0, 1, 2, \dots$), jak i przy jej końcu ($m = 100, 99, 98, \dots$).

Deskryptory Fouriera stanowiąc reprezentację konturu w dziedzinie częstotliwości (rozumianej przestrzenie), zawierają informację o kształcie obiektu. Analiza ich wartości pozwala stwierdzić, jaki przebieg ma rozpatrywany kontur. Dla przykładu, małe wartości amplitud deskryptorów wysokoczęstotliwościowych świadczą o łagodnym kształcie krawędzi.

Deskryptory Fouriera, można przedstawić w postaci wykładniczej:

$$F_m = |F_m| e^{j \arg(F_m)}. \quad (4.16)$$

Wynika stąd, że z obrotem konturu dookoła jego środka ciężkości, zmianom będzie ulegała tylko wartość argumentu deskryptorów – $\arg(F_m)$, natomiast jego moduł będzie pozostawał niezmienny. Wartości $|F_m|$, używane są jako wskaźnik, pozwalający ocenić regularność analizowanego konturu, co zostało zilustrowane na rys. 4.11.



Rys. 4.11. Przykład dwóch różnych klas konturów – a), c) i odpowiadające im moduły deskryptorów Fouriera – b), d)

Kontur o kształcie regularnym, np. jak na rys. 4.11 a), charakteryzuje się małą zawartością deskryptorów wysokoczęstotliwościowych, co ilustruje rys. 4.11 b). Z kolei kontur posiadający ostre krawędzie jak na rys. 4.11 c) reprezentowany jest w większym stopniu przez deskryptory wysokoczęstotliwościowe, widoczne na rys. 4.11 d).

Kontur może zostać zrekonstruowany na podstawie jego deskryptorów na podstawie wyrażenia, które w istocie jest odwrotnym dyskretnym przekształceniem Fouriera.

$$B_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} F_m e^{\frac{j2\pi mk}{N}}. \quad (4.17)$$

Jeżeli w rekonstrukcji konturu uwzględni się tylko kilka deskryptorów, o największych modułach, a z reguły są to deskryptory niskoczęstotliwościowe, wówczas odtworzony kontur będzie wygładzony w stosunku do oryginału.

4.5 Analiza składowych głównych

Analiza składowych głównych (ang. PCA – *principal component analysis*) jest wielowymiarową techniką statystyczną, która pozwala na odwzorowanie danych o dużej liczbie zmiennych w nowe dane, określane jako składowe główne, o mniejszej liczbie zmiennych [127], [128], [129]. Celem analizy składowych głównych jest zmniejszenie liczby wymiarów badanego zbioru danych przy zachowaniu maksymalnej zmienności w sensie wariancji/kowariancji [128], [129]. Jest to powszechnie stosowana technika nienadzorowanej ekstrakcji cech w przypadku posiadania próbek o nieznanym przynależności do klas [130], [131], [132]. Dodatkowo, analiza PCA pozwala na wskazanie, która z pierwotnych zmiennych jest najbardziej reprezentowana w tworzonym modelu.

Jeżeli zbiór oryginalnych danych \mathbf{X} składa się n obserwacji \mathbf{x} (przypadków), mających p zmiennych (wymiarów), wówczas pierwsza składowa główna \mathbf{z}_1 wyznaczana jest w taki sposób, że [128]:

$$\text{var}(\mathbf{z}_1^T \mathbf{x}) = \max \{ \text{var}(\mathbf{a}^T \mathbf{x}) \}, \quad (4.18)$$

przy czym \mathbf{a} – dowolny wektor jednostkowy ($\|\mathbf{a}\|^2 = 1$). Oznacza to, że poszukiwana jest standaryzowana kombinacja liniowa danych oryginalnych

nalnych, która miałaby możliwie największą wariancję. Druga składowa główna \mathbf{z}_2 wyznaczana jest z zależności [128], [129]:

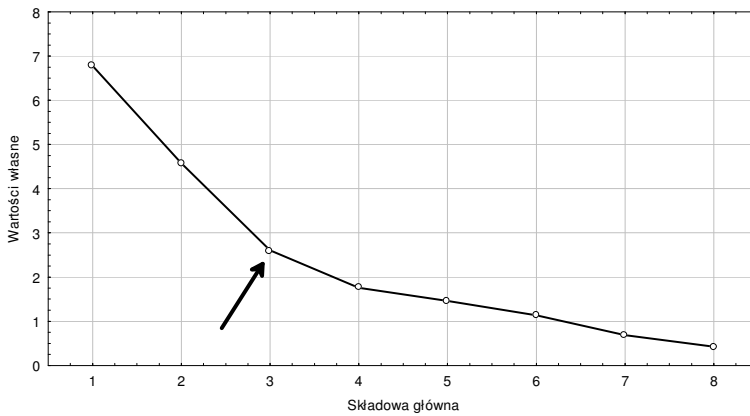
$$\text{var}(\mathbf{z}_2^T \mathbf{x}) = \max \{ \text{var}(\mathbf{a}^T \mathbf{x}) \}, \quad (4.19)$$

przy warunku:

$$\text{cov}(\mathbf{z}_1^T \mathbf{z}_2^T) = 0. \quad (4.20)$$

Druga składowa główna ma możliwie największą wariancję, jeżeli nie jest skorelowana z pierwszą składową główną. W podobny sposób wyznaczone są kolejne składowe główne tworzące układ ortogonalny, przy czym ich ilość jest nie większa od p . Wyznaczenie składowych głównych opiera się na wartościach i wektorach własnych macierzy kowariancji zbioru \mathbf{X} .

Zazwyczaj tylko kilka składowych głównych zawiera większą część zmienności (wariancji) pierwotnego zbioru danych \mathbf{X} . Można więc zastąpić dużą ilość pierwotnych zmiennych dla \mathbf{X} , mniejszą ilością składowych głównych. Określenie ilości wyznaczanych składowych głównych zależy od konkretnego przypadku i może być dokonane na podstawie kryterium Keisera bądź tzw. wykresu osypiska Cattella (ang. *scree plot*) [127]. Zgodnie z kryterium Keisera, pod uwagę bierze się tylko te składowe zmienne, którym odpowiadają wartości własne większe lub równe 1. Wykres osypiska przedstawia kolejne wartości własne w porządku malejącym, jak przykładowo zostało to pokazane na rys. 4.12. Test osypiska polega na znalezieniu miejsca, od którego regularny spadek wartości własnych staje się wolniejszy i uwzględnieniu w modelu tych składowych głównych, dla których wartości własne położone są z lewej strony tego punktu [127]. Na przykładzie, z rysunku 4.12, miejsce to zostało wskazane strzałką, a z testu osypiska wynika, że należy przyjąć trzy pierwsze składowe główne.



Rys. 4.12. Wykres osypiska z zaznaczonym punktem jego załamania

W oparciu o model PCA, na podstawie m największych w sensie wariancji składowych głównych przyjętych na podstawie wcześniej wspomnianych kryteriów, można wyznaczyć zbiór danych $\hat{\mathbf{X}}$ będący aproksymacją oryginalnego zbioru danych \mathbf{X} na podstawie zależności:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{Z}^{(m)} \mathbf{A}^{(m)T}, \quad (4.21)$$

gdzie \mathbf{A} jest macierzą o rozmiarze $p \times p$, w której k -ta kolumna jest k -tym wektorem własnym macierzy kowariancji dla \mathbf{x} .

Miarą jakości uzyskanego modelu jest wariancja wyjaśniona:

$$R^2 X = 1 - \frac{\sum_{i,j} (x_{i,j} - \hat{x}_{i,j})^2}{\sum_{i,j} x_{i,j}^2}. \quad (4.22)$$

Miarą wagi j -tej zmiennej początkowej w tworzonym modelu składowych głównych może być wskaźnik P , wyrażony w postaci zależności:

$$P = 1 - \frac{SV_j}{SV_j^0}, \quad (4.23)$$

przy czym SV_j oznacza resztkowe odchylenie standardowe j -tej zmiennej, SV_j^0 odchylenie standardowe j -tej zmiennej. W przypadku, gdy wartość P jest bliska 1 oznacza to, że dana zmienna jest istotna w utworzonym modelu PCA, natomiast w przypadku, gdy wartość P zbliża się do 0, to dana zmienna jest mało istotna i w praktyce może zostać pominięta.

Właściwa analiza składowych głównych poprzedzana jest wstępnym przetworzeniem (preprocesingiem) danych pierwotnych, zgodnie z zależnością:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}, \quad (4.24)$$

przy czym :

\bar{x}_i – przetworzony element zbioru danych,

μ_i – wartość średnia danych i -tej zmiennej,

σ_i – odchylenie standardowe danych i -tej zmiennej,

$i = 0 \dots n$.

Wstępne przygotowanie danych ma na celu usunięcie składowej stałej i uniezależnienie reprezentacji danej zmiennej w tworzonym modelu PCA od wartości liczbowych, które może ona przyjmować [129]. Na przykład, jeśli jedna ze zmiennych przyjmowała wartości liczbowe znacznie większe od pozostałych, byłby nadreprezentowana w modelu PCA, nawet gdyby jej wariancja była niewielka. Z drugiej strony wstępnie przetworzone dane są wielkościami bezwymiarowymi. W przypadku zastąpienia zbioru danych oryginalnych X zbiorem danych wstępnie przetworzonych \bar{X} , zgodnie z zależnością (4.18), znalezienie składowych głównych następuje na podstawie wartości i wektorów własnych macierzy korelacji \bar{X} .

4.6 Czasowo-częstotliwościowe metody analizy sygnałów

Analiza częstotliwościowa sygnałów niestacjonarnych wymaga użycia metod, pozwalających na lokalną (w dziedzinie czasu) reprezentację ich zmienności. Należą do nich m.in. krótkoczasowa transformata Fouriera, transformata falkowa, transformata Vignera-Ville'a [133], [134], [135], [136].

Krótkoczasowa transformata Fouriera (*STFT* – *Short Time Fourier Transform*), zwana także okienkową transformatą Fouriera, definiowana jest jako iloczyn skalarny analizowanego sygnału $f(t)$ i jądra przekształcenia $W_{\tau,\omega}$:

$$STFT(j\omega) = \langle f(t), W_{\tau,\omega} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{W_{\tau,\omega}(t)} dt, \quad (4.25)$$

przy czym:

$$W_{\tau,\omega} = e^{j\omega\tau} w(t - \tau), \quad (4.26)$$

gdzie $w(t - \tau)$ jest funkcją okna. Zakłada się przy tym, że analizowany sygnał ma skończoną energię, tzn. $\int_{t \in \mathbf{R}} |f(t)|^2 < \infty$.

Krótkoczasowa transformata Fouriera daje lokalnie określoną informację w oknie czasowym, którego środek x^* i szerokość $2\Delta_t$ można wyznaczyć na podstawie odpowiednich zależności [133]:

$$x^* = \frac{1}{\|w\|^2} \int_{-\infty}^{\infty} t |w(t)|^2 dt, \quad (4.27)$$

$$\Delta_t = \frac{1}{\|w\|} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (t - x^*)^2 |w(t)|^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (4.28)$$

Podobnie jak w dziedzinie czasu, możliwe jest także wyznaczenie odpowiedniego okna w dziedzinie częstotliwości. Jego środek ξ^* i szerokość $2\Delta_\omega$ określają odpowiednio, poniższe równania [133]:

$$\xi^* = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega |\hat{w}(\omega)|^2 d\omega, \quad (4.29)$$

$$\Delta_{\omega} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\|\hat{w}\|}} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (\omega - \xi^*)^2 |\hat{w}(\omega)|^2 d\omega \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (4.30)$$

przy czym \hat{w} oznacza transformatę Fouriera funkcji okna $w(t)$.

Można udowodnić, że iloczyn szerokości w dziedzinie czasu i częstotliwości dla danego $w(t)$ jest stały, przy czym:

$$\Delta_t \Delta_{\omega} \geq \frac{1}{2}. \quad (4.31)$$

Powyższa zależność nosi nazwę zasady nieoznaczoności Heisenberga. Oznacza ona, że uzyskanie dużej rozdzielczości jednocześnie w dziedzinie czasu i częstotliwości jest niemożliwe. Duża rozdzielczość w dziedzinie czasu jest okupiona słabą rozdzielczością w dziedzinie częstotliwości i na odwrót.

W praktyce, analizowanie sygnału za pomocą krótkoczasowej transformaty Fouriera polega na wyznaczeniu jego spektrogramu, czyli rozkładu energii na płaszczyźnie czas-częstotliwość:

$$S(t, \omega) = |STFT(t, \omega)|^2. \quad (4.32)$$

Jako funkcje okna stosuje się najczęściej okna nieparametryczne: prostokątne, trójkątne (Bartletta), Hanninga i inne. Wprowadzenie funkcji okna w dziedzinie czasu wiąże się jednak z wystąpieniem większych lub mniejszych oscylacji w dziedzinie częstotliwości ze względu na występowanie operacji mnożenia sygnału w dziedzinie czasu z funkcją okna. W dziedzinie częstotliwości jest to równoważne splotowi transformat Fouriera sygnału i okna. W celu minimalizacji tego niekorzystnego efektu, można stosować okna parametryczne, np. Kaisera lub Czebyszewa.

Wybór rodzaju okna czasowego i przyjęcie jego długości, determinuje uzyskaną rozdzielczość w dziedzinie czasu i częstotliwości, co wynika

z zależności 4.28 i 4.30. W wielu jednak przypadkach, analiza sygnałów wymaga zastosowanie szerokich okien czasowych, aby wyznaczyć jego niskoczęstotliwościowe składowe. Jednak jest to okupione słabą rozdzielczością w dziedzinie czasu, co w przypadku występowania w sygnale gwałtownych zmian amplitudy, jest często nie do zaakceptowania. Rozwiązaniem jest wtedy stosowanie okien czasowych o różnej długości.

Innym sposobem wyeliminowania tej niedogodności jest zastosowanie przekształcenia, które zawiera operację zmiany długości okna w dziedzinie czasu (i jednocześnie w dziedzinie częstotliwości). Wspomnianym przekształceniem jest np. transformata falkowa.

Właściwy dobór rozmiarów okna czasowego i konsekwencji jakie wnosi zasada nieoznaczoności Heisenberga są głównymi problemami analizy czasowo-częstotliwościowej. Pewną próbą ich rozwiązania jest zastosowanie w jądrze przekształcenia samego, przekształcanego sygnału. W ten sposób, szerokość okna czasowego dostosowuje się adaptacyjnie do sygnału, jak ma to miejsce w przypadku transformaty Wignera-Ville'a.

Wspomniana transformata zapewne teoretycznie najlepszą rozdzielczość na płaszczyźnie czas-częstotliwość, ograniczoną jedynie zasadą nieoznaczoności Heisenberga. Jednak wykorzystanie praktyczne tej transformaty jest utrudnione, ze względu na występowanie interferencji pomiędzy jej poszczególnymi współczynnikami.

4.7 Transformata curvelet

Transformata curvelet (ang. *curvelet transform*) należy do czasowo-częstotliwościowych metod analizy obrazów, która w odróżnieniu do transformaty falkowej, posiada dodatkowy parametr orientacji. Istnieją dwa rodzaje tego typu przekształcenia, nazwane przez ich twórców curvelet 99 oraz curvelet drugiej generacji [137], [138].

Podstawowym elementem transformaty curvelet, jest filtracja pasmowa sygnału za pomocą filtrów dolno- i górnoprzepustowych. Aby krawędzie obrazu mogły być lepiej reprezentowane, wprowadzone zostało nierównomierne skalowanie [137]. Filtr dolnoprzepustowy P_0 zaprojektowany jest do oddzielenia niskich częstotliwości przestrzennych $|\zeta| \leq 1$, natomiast dla każdej skali $s \geq 1$ projektowany jest filtr górnoprzepustowy Δ_s dla oddzielenia częstotliwości $|\zeta| \in [2^{2s}, 2^{2s+2}]$, nazwanych wysokimi. Niemożliwe jest określenie jednoznacznego kryterium podziału na częstotliwości niskie i wysokie, gdyż zależy on od właściwości przetwarzanego obrazu.

Dla niskich częstotliwości przestrzennych, współczynniki transformaty curvelet opisane są w przestrzeni M' i uzyskać je można z na podstawie zależności [139]:

$$\alpha_\mu = \langle \phi_{k_1, k_2}, P_0 f \rangle, \quad \mu = (k_1, k_2) \in M' \quad (4.33)$$

gdzie: ϕ_{k_1, k_2} – funkcja skalująca, k_1, k_2 – współrzędne pojedynczego współczynnika. Z kolei dla zakresu wysokich częstotliwości otrzymuje się z zależności [139]:

$$\alpha_\mu = \langle \Delta_s f, \psi_\mu \rangle, \quad \mu \in M_s, s = 1, 2, \dots, \quad (4.34)$$

gdzie: ψ_μ – funkcja, posiadająca parametr orientacji θ , skali s oraz położenia (k_1, k_2) (ang. *ridgelet*).

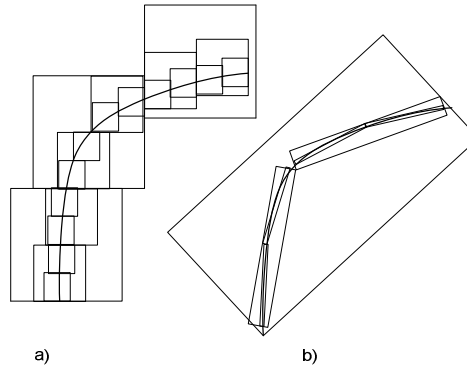
Transformata curvelet definiowana jest jako iloczyn skalarny w postaci następującej zależności [139]:

$$\alpha_\mu \equiv \langle f, \gamma_\mu \rangle, \quad \mu \in M', \quad (4.35)$$

przy czym $\gamma_\mu = \gamma_\mu(x_1, x_2)$ jest elementem utworzonym z $\gamma_\mu = \Delta_s \psi_\mu$.

Transformata curvelet, podobnie jak transformata Fouriera i falkowa spełnia własność Parserval'a [139]. Transformata curvelet zapewnia

znacznie lepszą aproksymację krawędzi obrazu w porównaniu do transformaty falkowej, co zostało zilustrowane na rys. 4.13.



Rys. 4.13. Krawędź obrazu aproksymowana transformatą falkową (a) i curvelet (b) [139]

Dyskretna transformata curvelet jest przekształceniem, które realizowane jest najczęściej w postaci algorytmów umożliwiających wyznaczenie współczynników transformaty przy użyciu jak najmniejszej ilości elementarnych operacji matematycznych, podobnie jak dla algorytmu FFT w przypadku transformaty Fouriera. Najbardziej znane algorytmy szybkiego wyznaczania transformaty curvelet to FDCT via USFFT (ang. *Fast Digital Curvelet Transform via Unequispaced FFT*) oraz FDCT via Wrapping [137], [140]. Algorytmy te są dostępne w bibliotece (ang. *toolbox*) o nazwie CurveLab, uruchamianej w środowisku Matlab [141].

5 Określenie istotnych dla diagnostyki stref płomienia – badania wstępne

Wykorzystanie informacji zawartej w promieniowaniu emitowanym przez płomień jest jednym ze sposobów oceny stanu procesu spalania. W praktyce istotne jest, aby taką ocenę można było przeprowadzić w jak najprostszy sposób, a więc za pomocą jak najmniejszej ilości sygnałów diagnostycznych. Ponieważ struktura płomienia, a w szczególności turbulentnego płomienia pyłowego, nie jest jednorodna, powstaje pytanie, który obszar płomienia jest najbardziej wrażliwy na zmiany punktu pracy palnika?

W tym celu, analizowano sygnały optyczne pochodzące z wydzielonych stref płomienia. Wskazanie najbardziej wrażliwej strefy płomienia na zmiany parametrów wejściowych palnika, dokonane zostało na podstawie analizy składowych głównych (ang. *Principal Component Analysis* – PCA), przeprowadzonej dla wspomnianych sygnałów. Zostały one zarejestrowane w warunkach przemysłowych (kocioł AP-1650), dla dwóch różnych ustawień głowicy względem płomienia, podczas pracy z wymuszonymi zmianami podstawowych parametrów pracy palnika, takich jak:

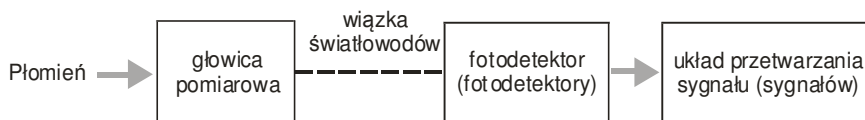
- zmiany wydatku powietrza wtórnego,
- zmiany pochylenia zespołu palnikowego [142].

W trakcie wspomnianych badań, wykorzystano opracowany w Katedrze Elektroniki Politechniki Lubelskiej, wielokanałowy, światłowodowy układ monitorowania płomienia. Układ ten pozwala na obserwację płomienia w jego wybranych strefach [93].

W skład układu monitorowania płomienia, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 5.1, wchodzi następujące elementy:

- głowica pomiarowa, umieszczona wewnątrz komory spalania,
- wiązka światłowodów,
- fotodetektory,

- układ przetwarzania sygnałów.



Rys. 5.1. Schemat blokowy układu monitorowania płomienia

Najważniejszym elementem układu, od którego w zasadniczym stopniu zależy jego poprawna praca, jest głowica pomiarowa transmitująca promieniowanie emitowane przez płomień do detektorów, usytuowanych na zewnątrz komory spalania. Czoło głowicy umieszczone jest wewnątrz komory paleniskowej, w pobliżu pracującego palnika pyłowego i pracuje w temperaturze powyżej 400 °C, w warunkach wysokiego zapylenia i wibracji. Doprowadzenie do głowicy sprężonego powietrza pozwala, przy odpowiednio dobranym kształcie jej czoła, na długotrwałą pracę (rzędu 4÷7 tygodni) bez konieczności jej mechanicznego czyszczenia. Dzięki odpowiedniemu rozłożeniu światłowodów, możliwa jest selektywna transmisja promieniowania z określonych obszarów płomienia, przy czym sprzężenie optyczne pomiędzy głowicą pomiarową oraz płomieniem, uwzględnia objętościowy charakter źródła promieniowania jakim jest płomień [93].

Wiązka światłowodów umożliwia umieszczenie fotodetektorów w stosunkowo niskiej, jak na warunki panującej w pobliżu pracującego palnika, temperaturze. Dodatkowo użycie światłowodów ułatwia montaż układu monitorowania na kotle energetycznym, jeśli dostępność do miejsca umieszczenia sondy jest utrudniona. Ponieważ długość stosowanych światłowodów jest rzędu kilku metrów, w zakresie widma optycznego płomieni pyłowych, tłumienie wnoszone przez światłowód jest do pominięcia. Ze względu na małą sprawność sprzężenia ze światłowodem, w układach monitorowania stosowane są grubordzeniowe

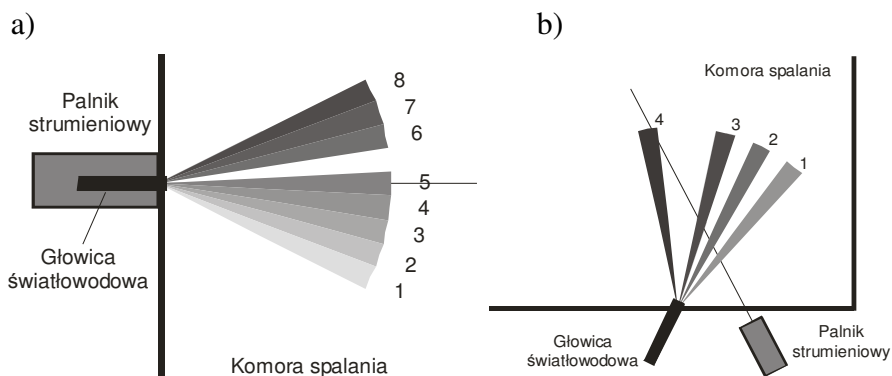
światłowody PCS lub ze względu na możliwość pracy w jeszcze wyższych temperaturach, światłowody HCS [27], [93].

Rodzaj użytego fotodetektora podyktowany jest rodzajem spalanego paliwa. W przypadku detekcji płomieni węglowych, najbardziej przydatne są detektory pracujące w zakresie światła widzialnego lub bliskiej podczerwieni. Materiały półprzewodnikowe stosowane we wspomnianych fotodetektorach to na ogół Si, Ge, InGaAs, oraz tzw. krzem modyfikowany, charakteryzujący się lepszą sprawnością kwantową dla zakresu UV [93].

W układzie przetwarzania sygnałów sygnał z fotodetektora zostaje poddany wzmocnieniu. Sygnały wyjściowe, odpowiadające poszczególnym kanałom optycznym wyprowadzane są w standardzie $4 \div 20\text{mA}$ [93].

Dane poddawane analizie, zostały zarejestrowane w czasie prób w warunkach przemysłowych, przeprowadzonych na kotle AP1650. Podczas testów dokonywano czynności regulacyjnych, takich jak załączanie palników mazutowych, zmiana pochylenia skrzyń palnikowych, oraz przełączenia młynów węglowych. Światłowodowy układ monitorujący zainstalowany został w pobliżu dwóch pracujących palników. W czasie testów sprawdzano możliwość wykorzystania sygnałów ze światłowodowego układu monitorowania jako narzędzia diagnozującego poprawną pracę palników ze wskazaniem najbardziej wrażliwej strefy płomienia na zmiany punktu pracy palnika.

Dwie identyczne głowice pomiarowe zostały zainstalowane w pobliżu pracujących palników strumieniowych kotła AP-1650. Pierwsza z głowic została umieszczona w taki sposób, że obserwowane obszary płomienia, zawarte w kątach akceptacji poszczególnych światłowodów rozmieszczone były pionowo, jak pokazano schematycznie na rys. 5.2 a). W przypadku drugiej głowicy, badano poziome rozmieszczenie włókien światłowodowych umieszczonych w głowicy względem komory spalania (rys. 5.2 b)).



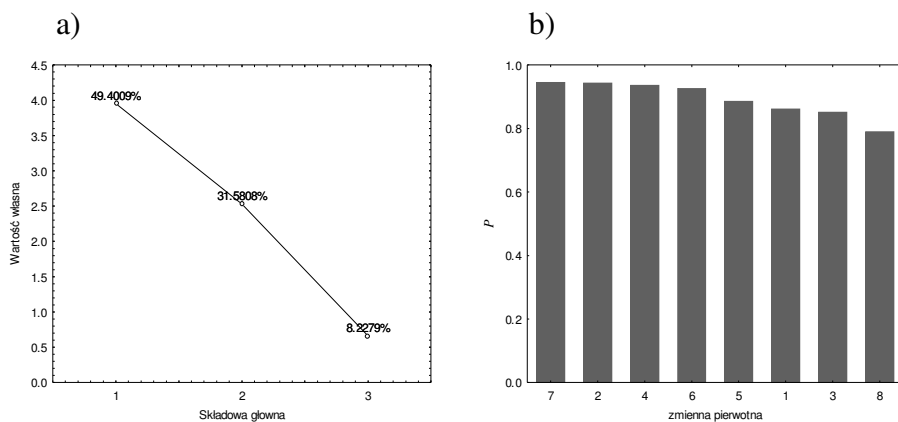
Rys. 5.2. Rozmieszczenie badanych obszarów płomienia w zależności od usytuowania głowicy pomiarowej względem komory spalania: a) pionowe (widok z boku), b) poziome (widok z góry)

5.1 Wyniki badań dla płomienia pyłowego w warunkach przemysłowych

Analiza składowych głównych została przeprowadzona dla 8 sygnałów przy pionowym (rys. 5.2. a)) oraz 4 sygnałów przy poziomym ustawieniu głowicy (rys. 5.2. b)).

W pierwszym przypadku liczbę wymiarów zmiennych może zostać zredukowana z 8 do 2 składowych głównych, według kryterium Keisera. Procent wariancji wyjaśnionej dla pierwszej składowej głównej wyniósł 46,4%, a dla drugiej i trzeciej odpowiednio 31,58% i 8,23%. Wykres osypiskowy dla rozpatrywanego przypadku przedstawiono na rysunku 5.3 a), natomiast wartości wskaźnika P dla poszczególnych zmiennych początkowych w utworzonym modelu PCA – na rysunku 5.3 b).

Wartości wskaźnika P , obliczone dla poszczególnych zmiennych pierwotnych wskazują na ich udział w tworzonym modelu PCA. Na tej podstawie możliwe jest wskazanie obszarów płomienia, które są najbardziej wrażliwe na zmiany punktu pracy palnika. Z rysunku 5.3 a) wynika, że najbardziej wrażliwą strefą jest strefa oznaczona na rysunku 5.2 a) numerem 7, zaś najmniej – strefa 8.



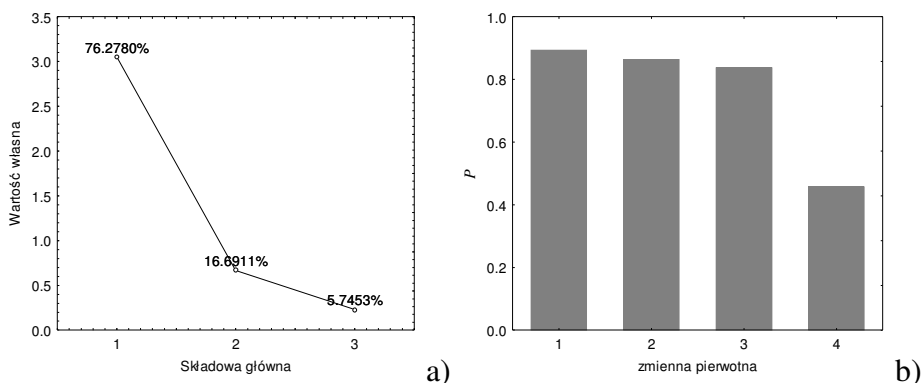
Rys. 5.3 Wyniki analizy PCA dla danych uzyskanych przy pionowym rozmieszczeniu obszarów płomienia: a) wykres osypiskowy dla trzech pierwszych składowych głównych; b) istotność zmiennych pierwotnych w modelu PCA, mierzona wskaźnikiem P

Trudno jest, przy rozpatrywanym położeniu sondy, wyróżnić miejsce w płomieniu, którego znaczenie byłoby szczególne, biorąc pod uwagę zmienności analizowanych sygnałów optycznych. Istotność tych sygnałów, mierzona wskaźnikiem P wskazuje, że strefy położone powyżej (7), poniżej (2) oraz w osi sondy światłowodowej (4) są w przybliżeniu jednakowo reprezentowane w stworzonym modelu PCA.

Podobną analizę przeprowadzono dla drugiego ustawienia sondy, w którym strefy płomienia były rozmieszczone poziomo, jak przedstawia rysunek 5.2 b). Wykres osypiska z zaznaczonymi procentami wariancji wyjaśnionej dla trzech największych składowych głównych pokazany jest na rysunku 5.4 a). Procent wariancji wyjaśnionej dla pierwszej składowej głównej wyniósł 76,3%, a dla drugiej – 16,69%. Kryterium Keisera wskazuje, że do wyznaczanego modelu PCA wystarcza tylko pierwsza składowa główna.

Parametr P wyznaczony dla rozpatrywanych zmiennych pierwotnych, przedstawiony został na rysunku 5.4 b). Wynika stąd, że najbardziej wrażliwą zmienną pierwotną, jest zmienna 1. Wskazuje to, w rozpatrywanym położeniu sondy, na strefę położoną najbliżej palnika. Strefa 4

położona najdalej, nie wnosi istotnej informacji, na co wskazuje odbiegająca od pozostałych, niska wartość P dla tej zmiennej.



Rys. 5.4. Wyniki analizy PCA dla danych uzyskanych przy poziomym rozmieszczeniu obszarów płomienia: a) wykres osypiskowy dla trzech pierwszych składowych głównych; b) istotność zmiennych pierwotnych w modelu PCA, mierzona wskaźnikiem P

Wyniki przedstawionych analiz pozwalają stwierdzić, że sygnały optyczne pochodzące z obszarów umieszczonych w pobliżu wylotu palnika dostarczają najwięcej informacji o zmianach stanu zachodzącego procesu spalania. Wspomniane rezultaty zostały wykorzystane podczas testów spalania pyłu węglowego na stanowisku laboratoryjnym.

6 Badanie diagnostyczne procesu spalania pyłu węglowego na stanowisku laboratoryjnym z wykorzystaniem metod optycznych

Wykorzystanie cech kształtu płomienia do celów diagnostyki procesu spalania, zostało zbadane podczas testów laboratoryjnych, z pomocą dedykowanego stanowiska. Może ono pracować również w warunkach przemysłowych, o ile zapewnione zostaną warunki właściwego chłodzenia oraz eliminacja zapylenia części optycznych.

W dalszej części niniejszego rozdziału zaprezentowane będą przykładowe rezultaty przeprowadzonych analiz. Oceniano dwa warianty

ustawienia kamery, dla których wyznaczono parametry geometryczne kształt płomienia, jak również deskryptory Fouriera.

6.1 Stanowisko laboratoryjne

Testy spalania pyłu węglowego zostały przeprowadzone na stanowisku pomiarowym w Instytucie Energetyki. Głównym elementem stanowiska jest cylindryczna komora spalania o długości 2,5m i średnicy ok. 0,7m. Wewnątrz komory znajduje się wykonany w skali 1:10 model wirowego palnika pyłowego, wraz z palnikiem olejowym oraz zapalarką gazową. Stanowisko wyposażone jest w instalacje powierza pierwotnego, wtórnego oraz olejową.



Rys. 6.1. Widok stanowiska pomiarowego z zaznaczonym miejscem usytuowania kamery, prostopadle do osi palnika (na rys. 6.2 oznaczone jako położenie 1)

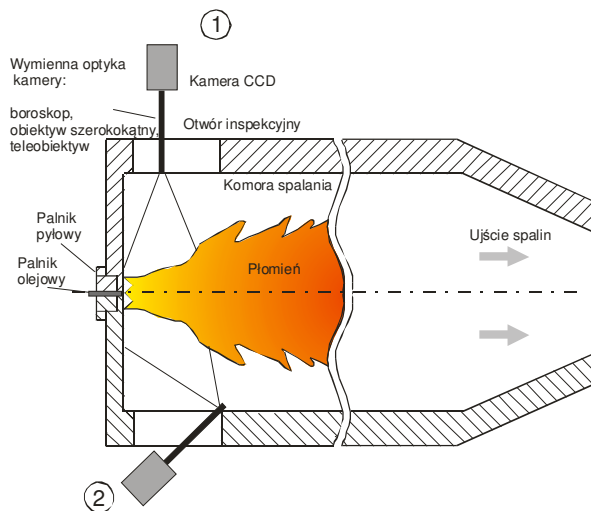
Mieszanka paliwowa wraz z powietrzem pierwotnym dostarczana jest do palnika pyłoprzewodem. Podczas pracy stanowiska dane z czujników pomiarowych mierzące wielkości zadane: wydatki paliwa, powietrza pierwotnego, powietrza wtórnych oraz ich temperatury rejestrowane są przez komputerowy system akwizycji danych.

Komora spalania zaopatrzona jest w dwa podłużne otwory rozmieszczone po obu jej stronach, które umożliwiają obserwację płomienia. Widok komory spalania został przedstawiony na rys. 6.1.

Badania przeprowadzone były w różnym czasie dla różnych paliw i różnych konfiguracjach ustawieniach kamery (wyposażonej w obiektyw lub opcjonalnie – boroskop wysokotemperaturowy) względem płomienia, które pokazano na rys. 6.2:

położenie 1 – prostopadłe do osi płomienia, w pobliżu wylotu palnika, z użyciem kamery analogowej,

położenie 2 – pod kątem ok. 45° do osi palnika, przy wzierniku umieszczonym prostopadłe do osi kamery cyfrowej, wyposażonej w boroskop wysokotemperaturowy.



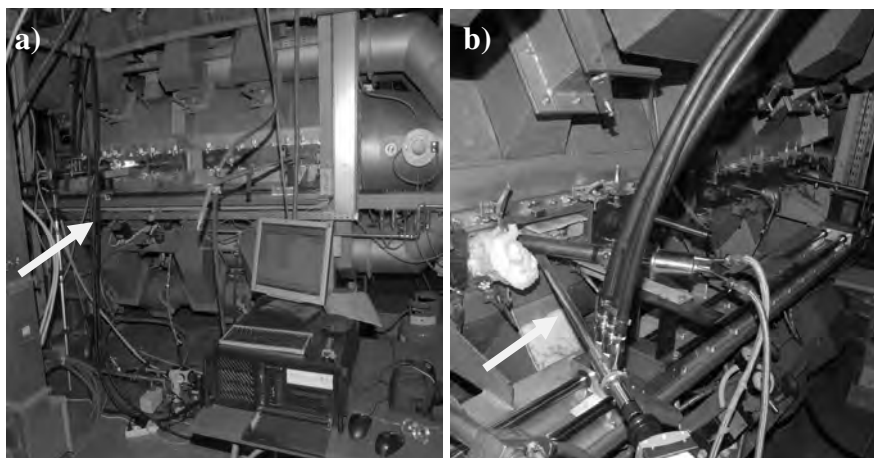
Rys. 6.2 Schemat stanowiska diagnostycznego do badania procesu spalania metodami optycznymi

Stanowiska diagnostyczne do badania procesu spalania składało się z następujących elementów:

- kamera analogowa, pracująca w standardzie PAL (625 linii, 25 klatek/s), pracująca w położeniu 1,

- kamera cyfrowa z matrycą z pełnym przenoszeniem ramki, o rozdzielczości maksymalnej 1280×1024 pikseli, umożliwiającej przechwytywanie do 500 ramek/s przy pełnej rozdzielczości i wyposażonej w interfejs CameraLink (położenie 2),
- wymienna optyka kamery cyfrowej – obiektywy o różnych ogniskowych (standardowy, szerokokątny, teleobiektyw) oraz boroskop wysokotemperaturowy chłodzony wodą z kurtyną powietrzną chroniącą część optyczną przed zabrudzeniem.
- cyfrowy rejestrator obrazów, w skład którego wchodzi frame grabber, umożliwiający przechwycenie strumienia danych dostarczanych przez kamery oraz kontroler macierzowy pracujący w konfiguracji RAID-0 wraz z dyskami twardymi, który umożliwia długotrwałą rejestrację strumienia danych o przepływności 200 MB/s.

Umieszczenie kamery został zaprezentowany na rys. 6.3 a), natomiast przy ustawieniu kamery pod kątem ok. 45° do osi palnika – na rys. 6.3 b).



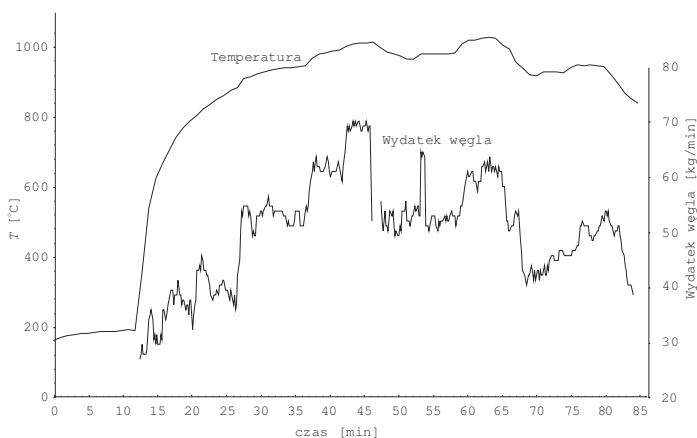
Rys. 6.3 a, b) Sposób zamocowania kamery pod kątem ok. 45° do osi palnika (położenie 2), umiejscowienie boroskopu wskazano strzałką

6.2 Cechy geometryczne obszaru płomienia przy prostopadłym usytuowaniu kamery (położenie 1)

Testy spalania paliw pyłowych (węgla, mieszaniny węgla i biomasy) przeprowadzano na stanowisku laboratoryjnym w określonej kolejności, która przypomina tę stosowaną podczas rozpalania kotła energetycznego.

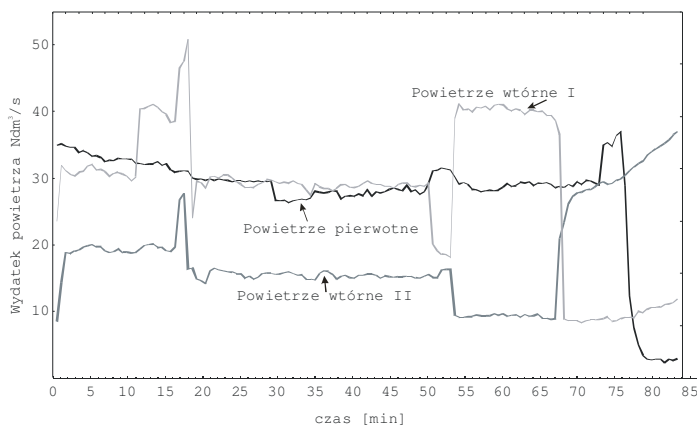
Przykładowy przebieg takiego procesu został przedstawiony poniżej. Ze względu na zbyt niską temperaturę do zainicjowania wydzielania części lotnych z węgla, na początku testu włączany jest tylko pomocniczy palnik olejowy. W chwili, gdy temperatura wewnątrz komory spalania osiąga poziom ok. 200 °C co ma miejsce w ok. 10. minucie od momentu rozpoczęcia testu, włączany jest podajnik z węglem, którego prędkość obrotowa początkowo jest na poziomie 80 obr/min. Dostarczany do palnika pył węglowy ulega zapłonowi od pracującego palnika olejowego. W ok. 26. minucie testu wyłączano palnik olejowy – od tego momentu pracował tylko palnik pyłowy. Obroty podajnika, które wynosiły początkowo 80 obr/min zwiększano 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 ilość węgla znajdującego się na podajniku. Zmiany wydatku węgla oraz temperatury wewnątrz komory spalania w funkcji czasu zostały przedstawione na rys. 6.4.

Zmiany wydatku powietrza pierwotnego i wtórnego w czasie eksperymentu przedstawione zostały na rys. 6.5. Wydatek powietrza pierwotnego, pomijając fazę wygaszania, ulegał jedynie niewielkim zmianom. W dalszej części testu zmieniano wydatki powietrza wtórnego.



Rys. 6.4. Zmiany wydatku węgla oraz temperatury wewnątrz komory spalania podczas testu spalania

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 trwania testu spalania wynosił ok. 80 minut.

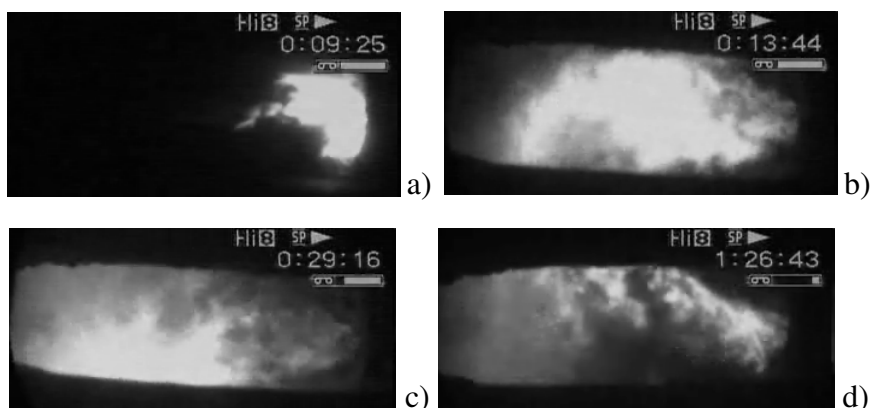


Rys. 6.5. Zmiany wydatku powietrza pierwotnego oraz wtórnego (składowe powietrze wtórne I, powietrze wtórne II)

Zmiany składu spalanego paliwa w istotny sposób wpływały na kształt płomienia rejestrowanego przez system wizyjny. Zmiany te, w sposób szczególnie widoczny były przy prostopadłym usytuowaniu kamery względem palnika, zaznaczone na rys. 6.2 jako położenie 1.

Podczas przeprowadzanych testów spalania przy prostopadłym usytuowaniu kamery, 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. 6.6 a),
- płomień występujący przy jednoczesnej pracy palnika olejowego i pyłowego, przy temperaturze wewnątrz komory spalania przekraczającej $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, charakteryzujący się dużą jasnością i stabilnością, widoczny na rys. 6.6 b),



Rys. 6.6. 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

- płomień towarzyszący spalaniu wyłącznie pyłu węglowego, charakterystyczny dla środkowej fazy testu, przedstawiony na rys. 6.6 c), gdzie podczas zmian wydatku pyłu węglowego

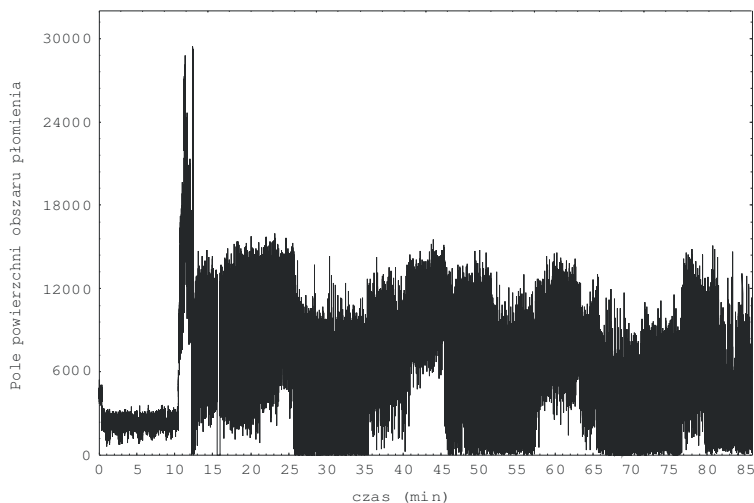
- zaobserwowano występowanie przejściowej niestabilności, charakteryzującej się odsunięciem punktu zapłonu od czoła palnika,
- płomień występujący w czasie wygaszaniu stanowiska, występujący podczas spadku wydatku pyłu węglowego przy dużym wydatku powietrza, uwidoczniony został na rys. 6.6 d).

6.3 Parametry geometryczne obszaru płomienia

W dalszej kolejności przedstawione zostaną wyniki analizy parametrów geometrycznych obszarów płomienia, który został wyodrębnione przy dla takiej samej wartości progowej jasności a^{thr} , według procedury przedstawionej w rozdziale 4.2.

Pole powierzchni płomienia

Zmiany pola powierzchni płomienia zarejestrowane w czasie testu spalania zostały przedstawione na rys. 6.7.



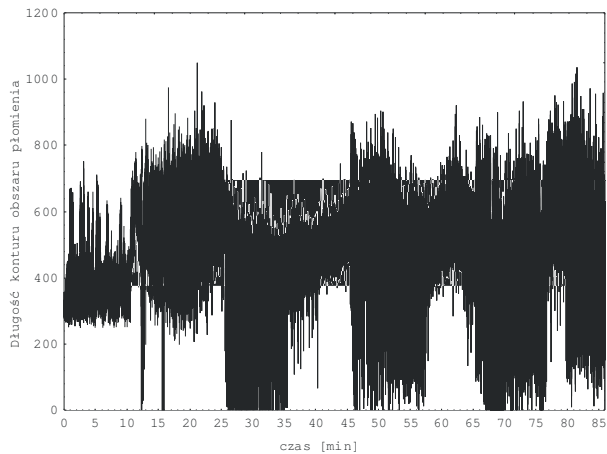
Rys. 6.7. Zmiany powierzchni obszaru płomienia podczas przykładowego testu spalania

Analizując zmiany pola powierzchni obszaru płomienia można zauważyć, że ma on stosunkowo niewielką wartość dla pracującego palnika

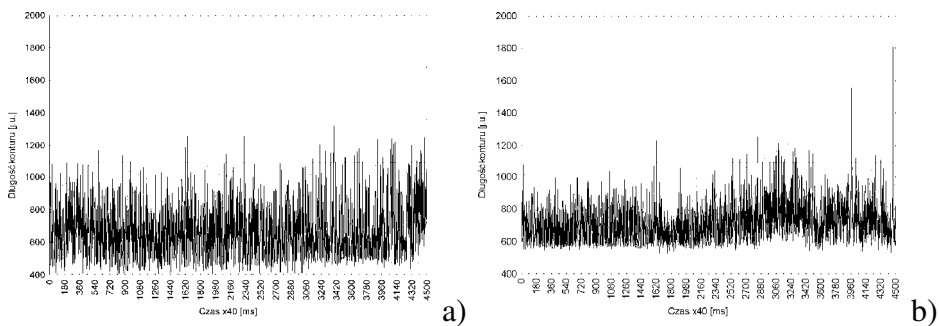
olejowego. Włączenie palnika pyłowego skutkuje nagłym wzrostem pola powierzchni płomienia przy jednoczesnym wzroście zmienności tego parametru. Wyłączenie palnika olejowego, skutkuje spadkiem pola powierzchni A. Wzrost lub spadek wydatku węgla powoduje odpowiednie zmiany pola powierzchni płomienia. Trudno natomiast wskazać na wyraźny wpływ zmiany wydatków powietrza na wielkość tego parametru.

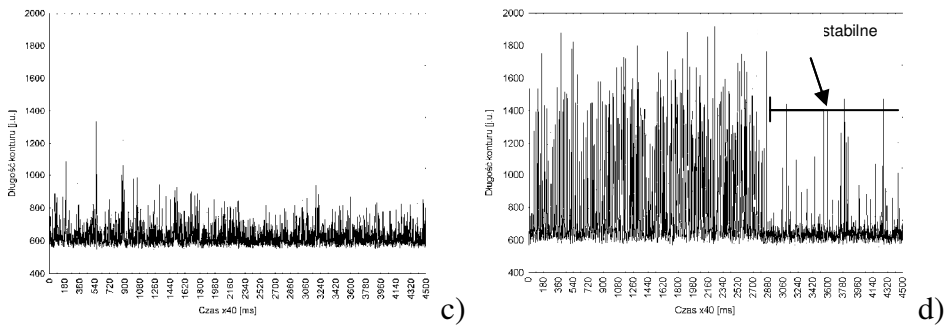
Długość konturu płomienia

Przykładowy przebieg zmienności w czasie długości konturów płomienia, uzyskany podczas testu spalania na stanowisku laboratoryjnym przedstawiono na rys. 6.8.



Rys. 6.8. Zmiany długości konturu obszaru płomienia podczas testu spalania



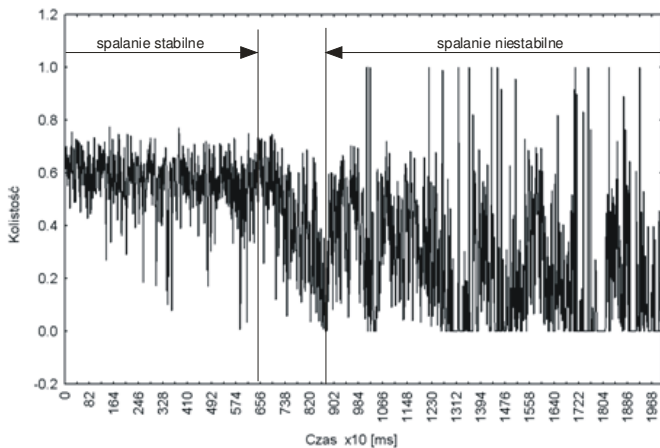


Rys. 6.9. Zmiany długości konturów płomieni wyznaczonych dla różnych warunków przebiegu procesu spalania odpowiednio: stabilnego – a), niestabilnego – b), stabilnego przy zapłonie blisko wieńca palnika – c), niestabilnego przy przejściu do stanu stabilnego przy zmniejszonym wydatku paliwa – d)

W czasie przeprowadzonych badań stwierdzono wyraźniejszy wpływ zmian wydatku paliwa na długość konturu obszaru płomienia. Warto również zauważyć podobieństwo zmian pola powierzchni i długości konturu płomienia w czasie przeprowadzonych testów.

Kolistość

Zmiany kolistości konturu wyznaczone w warunkach utraty stabilności płomienia przedstawione zostały na rys. 6.10.



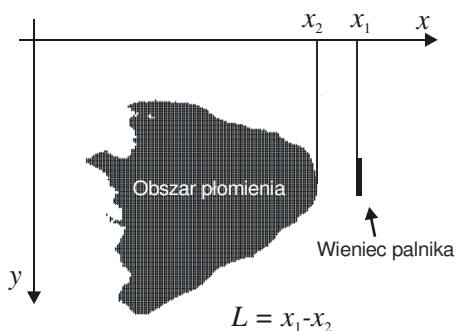
Rys. 6.10. Zmiany kolistości konturu płomienia przy przechodzenia ze spalania stabilnego do niestabilnego

Parametr sferyczności konturu jest w przybliżeniu na stałym poziomie przy stabilnym spalaniu, natomiast utrata stabilności wiąże się z gwałtownym spadkiem wielkości tego parametru.

Zmiany odległości czoła płomienia od wieńca palnika pyłowego

Kolejnym analizowanym parametrem obrazu płomienia była odległość czoła płomienia od wieńca palnika pyłowego. Spalanie niestabilne było wymuszane poprzez dodanie do referencyjnej mieszanki węgla dodatków w postaci osadów papierniczych (zmiana składu paliwa).

Przyjmując, że przesuwanie się płomienia występuje tylko wzdłuż osi palnika, odległość czoła płomienia od wieńca palnika pyłowego L , zdefiniowano na jako różnica współrzędnych poziomych wieńca palnika, x_1 i tego pikselu obszaru płomienia, którego współrzędna pozioma – x_2 , przyjmuje największą wartość, jak pokazano na rys. 6.11 [143].



Rys. 6.11. Sposób w jaki zdefiniowano odległość czoła płomienia od wieńca palnika pyłowego

Na podstawie przeprowadzonych testów stwierdzono występowanie dwóch przypadków:

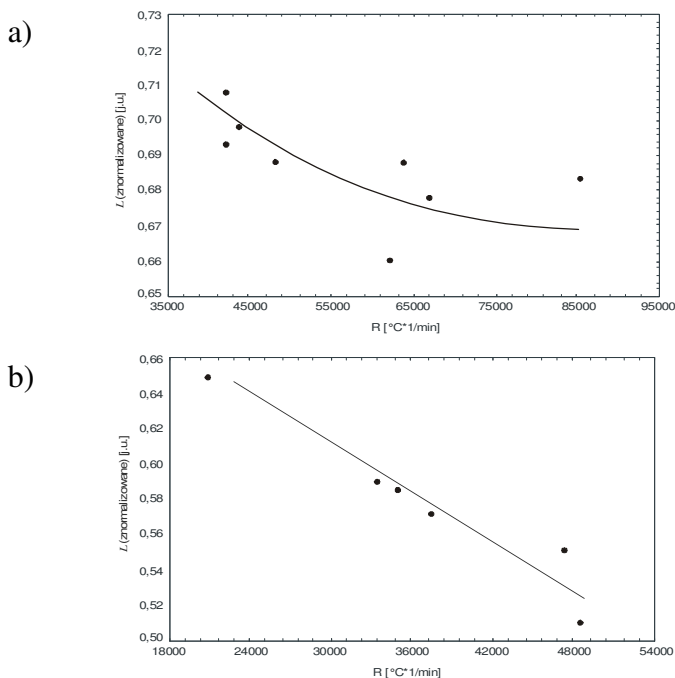
- płomienia, dla którego zapłon następuje tuż przy wylocie palnika – spalanie stabilne,

- płomienia, dla którego zapłon występuje w pewnym oddaleniu od wylotu palnika, przy czym odległość ta jest zmienna – spalanie niestabilne.

Zbadano wpływ parametrów procesu spalania na wskaźnik L . Najważniejsze parametry to: ilość paliwa stałego podawanego przez podajnik w jednostce czasu, wyrażona jako prędkość obrotowa podajnika V_{pod} , oraz temperatura spalin T_s . Wielkości te zostały sprowadzone do syntetycznego wskaźnika R , zdefiniowanego następująco:

$$R = V_{pod} \cdot T_s \quad (6.1)$$

Wpływ parametrów procesu spalania na wielkość odsunięcia płomienia od wieńca palnika, przeprowadzoną dla pyłu węglowego oraz pyłu węglowego zawierającego dodatek w postaci osadów papierniczych przedstawiono odpowiednio na rys. 6.12 a), b).

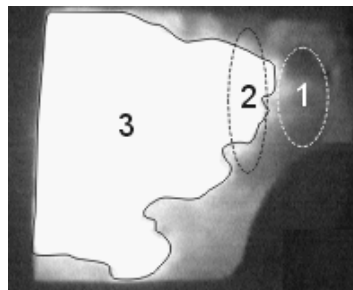


Rys. 6.12. Znormalizowane odsunięcie płomienia od końca palnika – L w funkcji parametru R dla: a) paliwa referencyjnego (węgiel kamienny), b) mieszaniny z udziałem osadów papierniczych

Spalanie stabilne występuje zarówno w przypadku paliwa referencyjnego jak i mieszaniny zawierającej osady papiernicze. Zdefiniowana wcześniej miara odsunięcia się płomienia od wylotu palnika, w mniejszym stopniu zależy od parametrów procesu spalania w przypadku paliwa referencyjnego – 6.12 a), niż w przypadku mieszaniny węgla i osadów papierniczych – 6.12 b). Mniejsza szybkość zmian charakterystyki z 6.12 a) wskazuje na mniejszą zależność znormalizowanego parametru L od zmian warunków spalania, a przez to na większą stabilność płomienia.

Położenie czoła płomienia względem obszaru przypalnikowego

Położenie czoła płomienia względem obszaru przypalnikowego jest miarą odsunięcia płomienia od palnika. W odróżnieniu do odległości czoła płomienia od wieńca palnika, omawiany parametr wskazuje na to, jak duży płomień występuje w jego pobliżu. Zdefiniowany on został jako powierzchnia, będącą częścią wspólną przyjętego arbitralnie obszaru w pobliżu palnika i płomienia. W analizowanym przypadku, wyodrębniono dwa obszary przypalnikowe o kształcie eliptycznym, z których pierwszy odpowiadał wylotowi palnika, a drugi strefie umieszczonej bezpośrednio przed palnikiem. Obszar płomienia, na rys. 6.13 oznaczony schematycznie cyfrą 3, zdefiniowany został jako zbiór pikseli o maksymalnej amplitudzie.

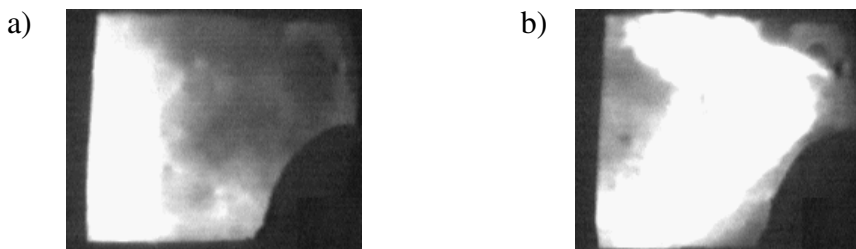


Rys. 6.13. Położenie strefy palnika (1), strefy położonej przy palniku (2) względem obszaru płomienia (3)

Wylot palnika został określony na podstawie detekcji krawędzi w obrazie uzyskanym z kamery, który zaznaczono na rysunku 6.13 białą linią kreskową i oznaczono cyfrą 1.

Obszar oznaczony na rys. 6.13 czarną linią kreskową odpowiada strefie położonej w bezpośrednim sąsiedztwie wylotu palnika, w której powinien następować zapłon mieszanki paliwowej. Kształt i wielkość tego obszaru zostały wybrane arbitralnie, ale podobnie jak w przypadku obszaru palnika, położony jest on symetrycznie względem osi palnika.

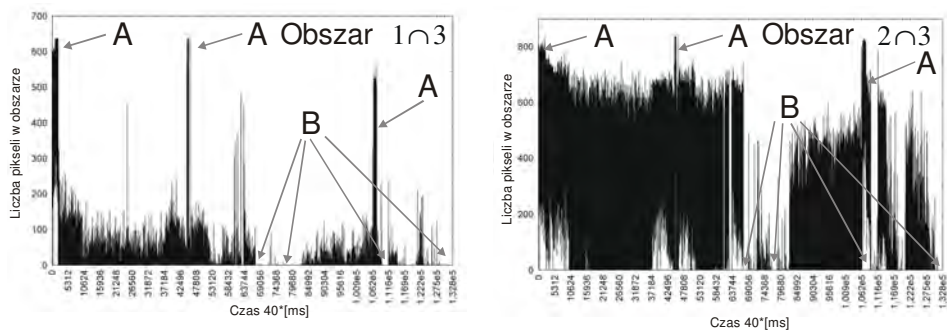
W czasie testów, oprócz płomienia stabilnego, zaobserwowano także płomień niestabilny (rys. 6.14 a)), jak również zapłon wewnątrz palnika (rys. 6.14 b)). W pierwszym przypadku punkt, w którym następuje zapłon paliwa odsuwa się od palnika, co może doprowadzić do zaniku płomienia. W drugim przypadku może nastąpić uszkodzenie palnika.



Rys. 6.14. Obraz spalania niestabilnego – a), oraz zapłonu paliwa wewnątrz palnika – b)

Detekcja przedstawionej na rys. 6.14 sytuacji awaryjnej polega na sprawdzeniu występowania płomienia w obszarach 1 i 2, a ściślej – określeniu ilości pikseli przynależnych do części wspólnej obszaru 1 i 3 oraz 2 i 3.

Duża ilość pikseli w pierwszym przypadku wskazuje na obecność płomienia wewnątrz palnika, natomiast bardzo mała ilość pikseli łącznie z brakiem części wspólnej obszarów 1-3 i 2-3, wskazuje na znaczne odsunięcie się płomienia od palnika. Brak obecności płomienia można wykryć analizując ilość pikseli przynależną do obszaru 3. Przedstawione sytuacje zostały oznaczone na rys. 6.15 odpowiednio jako A oraz B.



Rys. 6.15. Zmiana ilości pikseli w czasie pełnego testu spalania należących do części wspólnej obszarów 1-3 i 2-3

Tylko wybrane części obrazu poddawane są analizie i obszary te mogą być ustalone w sposób programowy po uprzednim zamontowaniu boroskopu wraz z kamerą w otworze wziernikowym. Pozwala to na bardziej swobodne i szybsze zainstalowanie układu na badanym obiekcie. Z przeprowadzonych testów wynika, że analiza położenia czoła płomienia pomiarów (obrazów) jest możliwa w czasie rzeczywistym nawet przy szybkości akwizycji przekraczającej 100 klatek /s i rozdzielczości obrazu wynoszącej 640×480 pikseli.

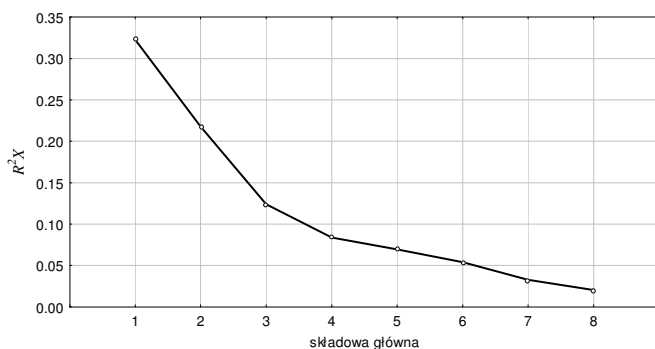
6.4 Redukcja parametrów geometrycznych obrazu płomienia (położenie 1) za pomocą analizy składowych głównych

Duża ilość rozpatrywanych parametrów geometrycznych płomienia skłoniła do zastosowania analizy składowych głównych, pozwalającej na zredukowanie ich liczby, przy zachowaniu informacji o występujących zmianach stanu procesu spalania. Dodatkowo możliwe jest wskazanie tych parametrów geometrycznych, które są najsilniej reprezentowane w stworzonym modelu PCA.

Brano pod uwagę ogółem 21 parametrów opisujących kształt płomienia, których definicje zostały przedstawione w rozdziale 4.3. Parametry te zostały wyznaczone przez dedykowane oprogramowanie

w czasie rzeczywistym. Składowe główne zostały wyznaczone na podstawie ogółem 77600 obserwacji.

Uzyskany model składał się z 8 składowych głównych, których łączny procent wariancji wyjaśnionej (R^2X) wyniósł ponad 92%. Wartości wariancji wyjaśnionej, uzyskane dla poszczególnych składowych głównych przedstawiony został na rys. 6.16.

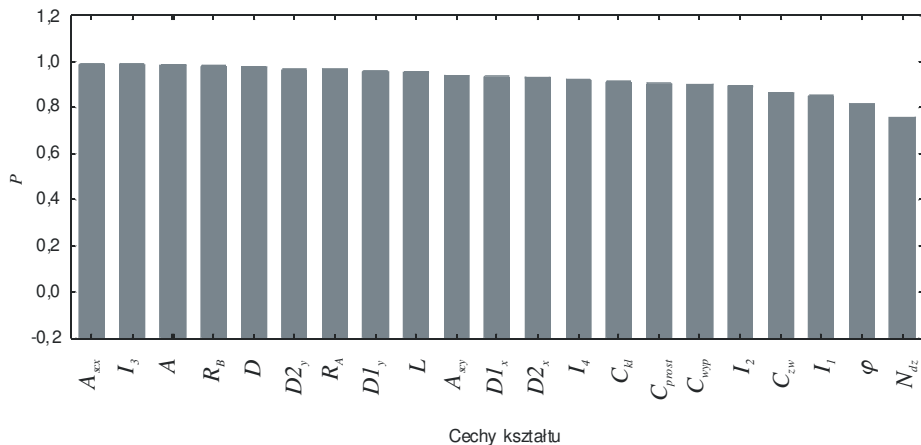


Rys. 6.16 Wartości wariancji wyjaśnionej uzyskane dla poszczególnych wartości własnych w wyznaczonym modelu PCA

W celu zbadania wagi jaką wnoszą przedstawione wcześniej parametry geometryczne płomienia w utworzonym modelu składowych głównych, określono dla nich wskaźnik P , na podstawie zależności (4.14). Przedstawia to rys. 6.17.

Przedstawione wyniki wskazują, że trudno jest wskazać jeden dominujący parametr geometryczny płomienia w utworzonym modelu PCA. Przeprowadzona analiza wskazuje, że można wskazać grupę istotniejszych pod tym względem parametrów, to której należy m.in. współrzędna pozioma środka ciężkości (A_{scx}), pole powierzchni płomienia (A) i moment geometryczny (I_3). Do mniej ważnych parametrów zaliczyć należy jeden ze wskaźników jednorodności obszaru jakim jest ilość dziur obszaru płomienia (N_{dz}). Jednak nawet w tym przypadku, duża wartość wskaźnika P , wynosząca około 0,8 wskazuje, że nie powinien być on pomijany w tworzonym modelu składowych głównych, a rozpatrywany

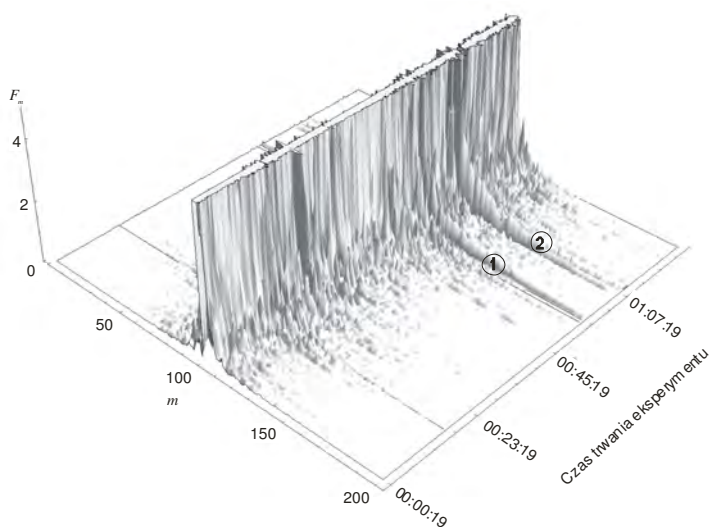
zbiór parametrów geometrycznych płomienia reprezentuje jego zmiany z niewielką redundancją.



Rys. 6.17 Wartości wskaźnika P dla poszczególnych parametrów geometrycznych płomienia w wyznaczonym modelu PCA

6.5 Deskrytory Fouriera obszaru płomienia przy prostym usytuowaniu kamery (położenie 1)

Dla obszaru płomienia, określonego na podstawie jasności pikseli w zarejestrowanych obrazach, wyznaczona została krawędź, przy czym wartość progową a^{thr} wynosiła 50% wartości maksymalnej, tj. 128. Jeżeli obszar płomienia składał się z więcej niż jednej części, wówczas pod uwagę brana była tylko ta o najdłuższej krawędzi. Dla każdej krawędzi wyznaczono maksymalnie 200 deskryptorów Fouriera, zgodnie z zależnością (4.6). Jeżeli zbiór pikseli, składających się na obszar płomienia był zbiorem pustym, wówczas przyjmowano zerowe wartości wszystkich opisujących go deskryptorów [144]. Zmiany wartości modułu deskryptorów Fouriera w czasie trwania testu spalania, zostały zaprezentowane na rys. 6.18.



Rys. 6.18. Zmiany modułu deskryptorów Fouriera w funkcji czasu podczas typowego testu spalania. Zaznaczono chwile, w którym nastąpiła zmiana wydatku węgla powodujące niestabilność płomienia

Z przeprowadzonych badań wynika, że największe wartości amplitud deskryptorów Fouriera odpowiadają składowym wolnozmiennym, w całym zakresie zmian przepływów powietrza i węgla. Zmiany składu mieszanki paliwowo-powietrznej wpływają na kształt płomienia, co skutkuje zmianą amplitud deskryptorów Fouriera. Wspomniane zmiany składu spalanego paliwa, będące źródłem przejściowej niestabilności płomienia, w silniejszym stopniu wpływają na amplitudy deskryptorów Fouriera odpowiadające składowym szybkozmiennym. W trakcie przeprowadzonych testów można to zaobserwować podczas zmian wartości przepływu pyłu węglowego, które skutkują krótkotrwałą utratą stabilności płomienia w 54. oraz 67. min. testu (rys. 6.18).

Wyniki przeprowadzonej analizy pozwalają stwierdzić, że użycie deskryptorów Fouriera krawędzi obrazu płomienia jest przydatne w jakościowej ocenie procesu spalania paliw stałych. W przypadku obrazów zarejestrowanych przy prostopadłym usytuowaniu kamery

(położenie 1), obecność deskryptorów odpowiadających wyższym częstotliwościom, świadczy o występowaniu niestabilności procesu spalania.

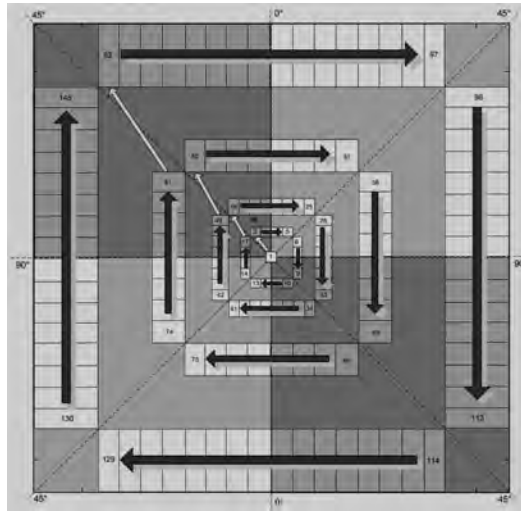
6.6 Zastosowanie transformaty curvelet w analizie obrazu płomienia przy prostopadłym usytuowaniu kamery (położenie 1)

Transformata curvelet została zastosowana do analizy obrazów płomienia, zarejestrowanych podczas stabilnego i niestabilnego spalania. Przykłady tych obrazów przedstawiono, odpowiednio na rys. 6.19, a) i b).



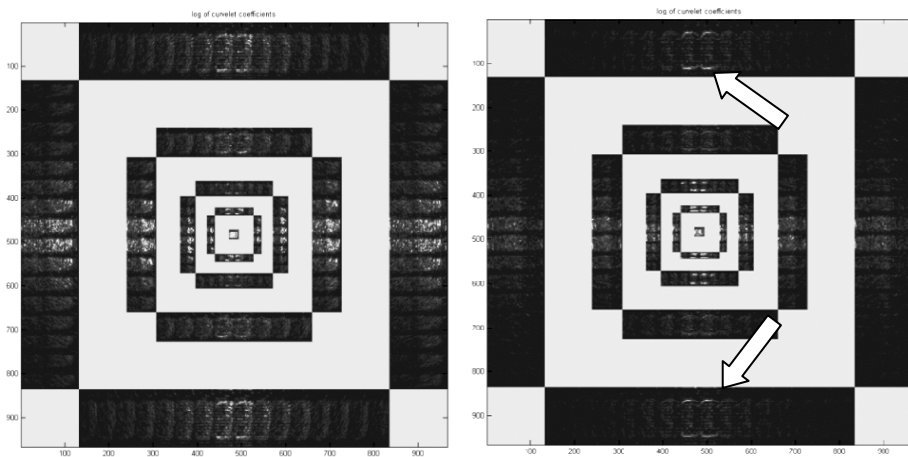
Rys. 6.19. Obrazy zarejestrowany podczas: s) stabilnego, b) niestabilnego spalania pyłu węglowego analizowane za pomocą transformaty curvelet.

W przypadku analizowanych obrazów płomienia (512×512 pikseli) współczynniki transformaty mają strukturę, na którą składa się 146 macierzy opisujących rozwinięcia transformaty na poszczególnych poziomach rozdzielczości (skali) i orientacji. Macierze 2-145 zawierają współczynniki uwzględniające parametr orientacji, gdzie detale poziome opisane są macierzami w bezpośrednim sąsiedztwie linii 0° , a detale pionowe wokół linii 90° (rysunek 3). Pomiędzy liniami wyznaczających kąt 0° oraz 90° znajdują się macierze opisujące detale, posiadające niezerowy kąt w stosunku do detali poziomych i pionowych (nazwane dalej składowymi mieszanymi). Macierz 1 zawiera współczynniki na najniższym, zaś macierz 146 na najwyższym stopniu rozdzielczości, bez uwzględniania parametru orientacji. Przedstawiony sposób prezentacji współczynników transformaty, który zaimplementowany jest w bibliotece CurveLab przedstawiono na rys. 6.20.



Rys. 6.20 Rozmieszczenie współczynników transformaty curvelet stosowany w bibliotece CurveLab.

Rysunek 6.21 a, b) przedstawia rozkład współczynników transformaty uzyskanych odpowiednio dla obrazów płomienia z rys. 6.19 a) i b) [145].



Rys. 6.21 Rozkład współczynników transformaty curvelet dla obrazów z rys 6.17.

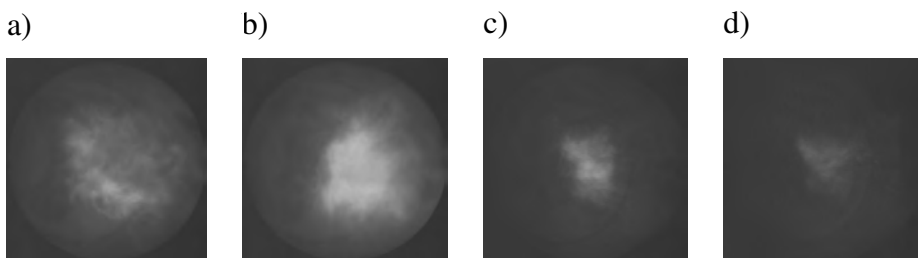
Współczynniki omawianego przekształcenia tworzą skomplikowaną strukturę, która odzwierciedla zarówno skalę (jak np. transformata falkowa) jak i orientację. Wartości poszczególnych współczynników wskazują jaki jest rozkład kierunków analizowanego kształtu dla każdej

skali z osobna. Wartości współczynników transformaty curvelet wyznaczonych dla obrazów zarejestrowanych w warunkach spalania stabilnego i niestabilnego wyraźnie różnią się od siebie. W przypadku spalania niestabilnego, współczynniki transformaty curvelet odpowiadające składowym poziomym kształtu, mają większe amplitudy. Na rysunku 6.21 zostały one wskazane strzałką.

Porównywanie kształtu płomienia z wykorzystaniem wszystkich współczynników transformaty curvelet jest złożone obliczeniowo [145], [146]. Nie jest jednak to wymagane, gdyż operacja porównywania kształtu może odbyć się na ich wybranej reprezentacji [145].

6.7 Cechy obszaru płomienia przy usytuowaniu kamery pod kątem 45 stopni (położenie 2)

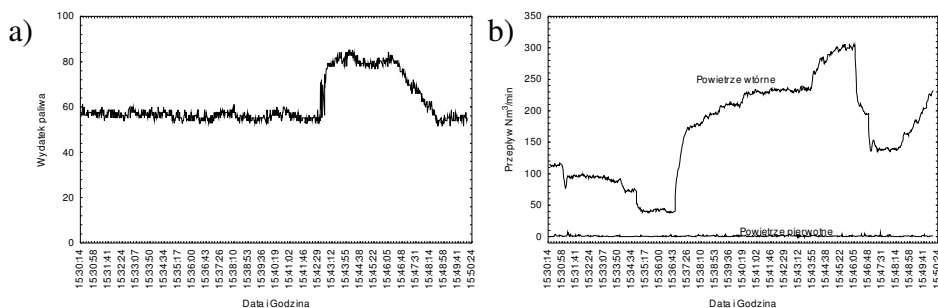
Kolejne próby spalania przeprowadzane były z przeniesieniem obrazu płomienia jak zaznaczono na rys. 6.2 w położeniu oznaczonym cyfrą 2. Zarejestrowany obraz płomienia obejmował strefę w pobliżu wylotu palnika. Przykładowe obrazy płomienia, zarejestrowane przy omawianym położeniu podczas próby spalania pyłu węglowego, zostały pokazane na rys. 6.22.



Rys. 6.22. Przykładowe obrazy płomienia pyłowego, zarejestrowane pod kątem 45° do osi palnika podczas testu spalania przy jednakowych parametrach ekspozycji obrazu, dla spalania: a) i b) – stabilnego, c) i d) – niestabilnego

Podczas testów przeprowadzono próbę stabilności płomienia polegającą na zmianie wydatku powietrza wtórnego. W ten sposób zwię-

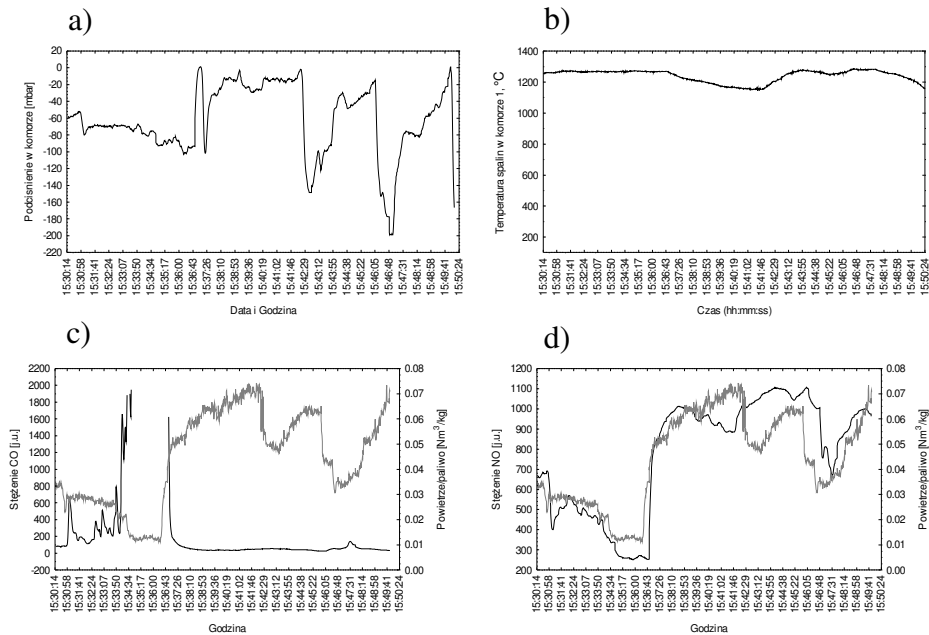
kszożo prędkość wylotu mieszanki pyłowo-powietrznej doprowadzając do stanu bliskiego zanikowi płomienia. Zmiany parametrów wejściowych stanowiska przedstawiono na rys. 6.23 a) i b).



Rys. 6.23. Zmiany parametrów wejściowych stanowiska do spalania paliw pyłowych w czasie testu stabilności: a) wydatek paliwa, b) wydatek powietrza pierwotnego i wtórnego

W czasie trwania testu, wydatek powietrza pierwotnego praktycznie nie ulegał zmianom, jak wskazuje rysunek 6.23 b). Wydatek paliwa w pierwszej fazie testu (do około 16. minuty) był na takim samym poziomie. Wydatek powietrza wtórnego ulegał stopniowemu zmniejszaniu do poziomu około 48 Nm³/min, po czym o 15:36:43 nastąpiło jego szybkie zwiększenie do poziomu ok 180 Nm³/min (15:34:26). Następnie wzrost ten był wolniejszy aż do 15:46:05, kiedy wydatek powietrza osiągnął największy poziom, powyżej 300 Nm³/min, jak pokazano na rys. 6.23 b).

Zmiany stosunku powietrze-paliwo, skutkują pojawieniem się stanu niestabilnego spalania, któremu odpowiada prawie zerowa wartość podciśnienia w komorze spalania, widoczna na rys. 6.24 a) i towarzyszy widoczny spadek temperatury – 6.24 b). Zmieniające się w czasie proporcje paliwa i utleniacza powodują zmiany składu spalin. Zarejestrowane w czasie testu stabilności stężenia CO i NO w spalinach zostały przedstawione odpowiednio na rys. 6.24 c) i 6.24 d).



Rys. 6.24. Zmiany wybranych parametrów stanowiska do spalania paliw pyłowych w czasie testu stabilności: a) podciśnienie w komorze spalania, b) temperatura wewnątrz komory, c) stężenie CO w spalinach, d) stężenie NO w spalinach

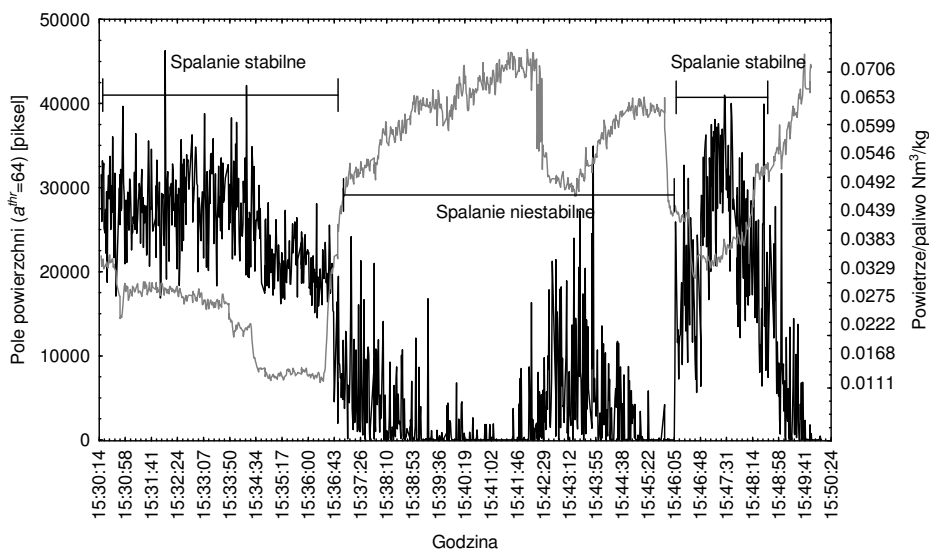
Zmniejszenie wydatku powietrza wtórnego obserwowane od ok. 15:35 do 15:37 powoduje wielokrotne zwiększenie stężenia CO, widoczne na rys. 6.24 c) i jednocześnie zmniejszenie zawartości NO w spalinach. Zwiększenie wydatku powietrza wtórnego, któremu towarzyszył stan spalania niestabilnego spowodował wzrost zawartości NO.

W czasie próby stabilności rejestrowano obrazy o rozdzielczości 384×384 przy prędkości 100 klatek/s. Testy przeprowadzono przy ustawieniu kamery w położeniu 2, szczegółowo opisanym w rozdziale 6.1. Przedstawione poniżej geometryczne parametry obszaru płomienia zostały wyznaczone dla takiej samej wartości a^{thr} . Przyjęto, że wartość progowa jest równa połowie maksymalnej jasności dla wartości średniej obrazów zarejestrowanych podczas testu, $a^{thr} = 64$. Zmiany w czasie

wybranych parametrów płomienia zostały przedstawione na rys. 6.25 – 6.30.

Pole powierzchni płomienia

Zmiany pola powierzchni płomienia zarejestrowane podczas opisanego wcześniej testu spalania zostały przedstawione na rys. 6.25, gdzie szarą linią zaznaczono zmiany stosunku powietrze-paliwo.



Rys. 6.25. Zmiany pola powierzchni obszaru płomienia podczas przykładowego testu spalania

W pierwszej fazie testu, kiedy spalanie miało charakter stabilny, od ok. 15:30:14 do 15:34:34, pole powierzchni płomienia ulegało wahaniom wokół wartości średniej, która przy założonej wartości progowej obszaru i warunkach akwizycji obrazu, wynosiła ok. 30000 pikseli. Zmniejszenie stosunku powietrze-paliwo występujące ok. godz. 15:34:34 powoduje zmniejszenie wartości średniej pola powierzchni płomienia. W drugiej fazie testu, zwiększenie wydatku powietrza wtórnego o godz. 15:36:43 powoduje pojawienie się stanu spalania niestabilnego, objawiającego się spadkiem jasności płomienia i wzrostem jego pulsacji. Towarzyszy temu spadek średniej wartości pola powierzchni płomienia, nawet do zera

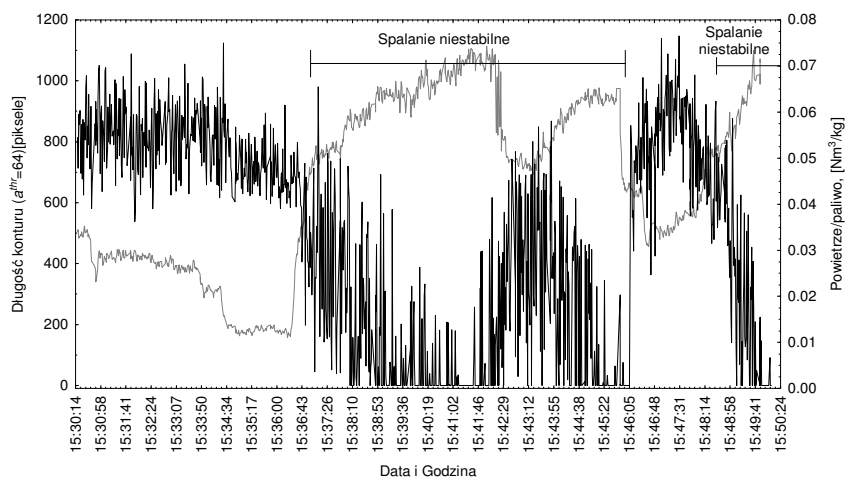
(obszar płomienia nie istnieje). Jednocześnie można stwierdzić zwiększenie rozrzutu pola płomienia wokół jej wartości średniej. Przejściowe zmniejszenie stosunku powietrze-paliwo przywraca stan spalania stabilnego od ok. 15:46:05 do 15:48:30, czemu odpowiada wzrost pola powierzchni płomienia do wartości jak w pierwszej fazie testu. Następnie, tj. po 15:48:30 spalanie znowu przebiega w sposób niestabilny.

Przedstawione zmiany pola powierzchni płomienia zależą od zmian stosunku powietrze-paliwo, przy czym korelacja między nimi wynosi $-0,803$. W pierwszej fazie testu, kiedy spalanie miało charakter stabilny, zmniejszenie wydatku powietrza wtórnego skutkuje zmniejszaniem pola powierzchni płomienia. W następnych fazach testu (spalanie niestabilne), zależność ta jest odwrotna – wzrost wydatku powietrza odpowiada spadkowi pola powierzchni.

Podobne rezultaty otrzymano dla innych wartości progowej obszaru płomienia a^{thr} . Wartości korelacji pomiędzy stosunkiem powietrze-paliwo a polem powierzchni płomienia wyznaczonym dla $a^{thr} = 32, 96$ i 120 wynosiły odpowiednio: $-0,791, -0,798, -0,688$. Wynika stąd, że przyjęcie a^{thr} równej połowie maksymalnej jasności dla wartości średniej obrazów, daje w rezultacie pole powierzchni płomienia, które jest najlepiej skorelowane ze zmianami stosunku powietrze-paliwo.

Długość konturu płomienia

Zmiany długości konturu płomienia, uzyskane podczas testu spalania przedstawiono na rys. 6.26, na którym zaznaczono również zmiany stosunku powietrze-paliwo podczas trwania testu. Charakter zmian tego parametru jest bardzo podobny jak w przypadku dyskutowanego wcześniej pola powierzchni płomienia. Wzrost stosunku powietrze-paliwo wiąże się ze spadkiem długości konturu płomienia.



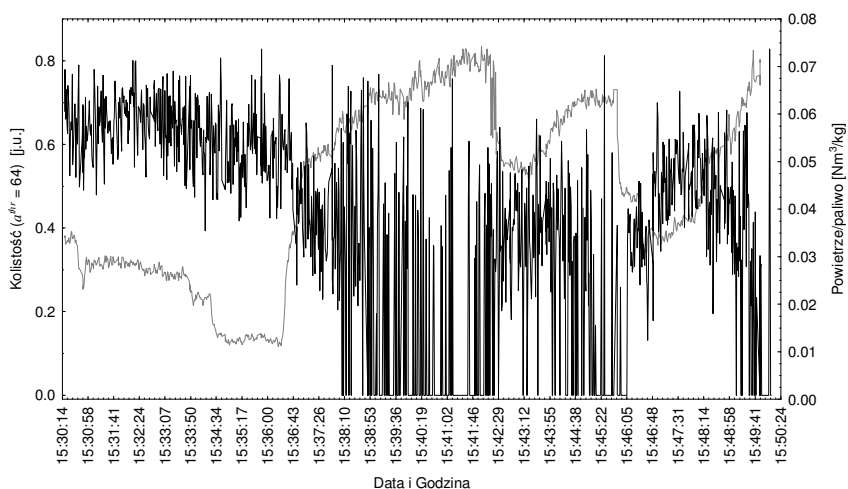
Rys. 6.26. Zmiany długości konturu obszaru płomienia podczas testu spalania

Podobnie jak w przypadku pola powierzchni, obliczone zostały korelacje pomiędzy długością konturu płomienia a stosunkiem powietrze-paliwo dla różnych wartości a^{thr} : 32, 64, 96, 120. Wspomniane korelacje wyniosły odpowiednio: $-0,693$, $-0,796$, $-0,815$, $-0,782$. Wynika stąd, że przyjęcie skrajnych wartości a^{thr} jest mniej korzystne.

Kolistość

Zmiany kolistości konturu wyznaczone w warunkach utraty stabilności płomienia przedstawione zostały na rys. 6.27.

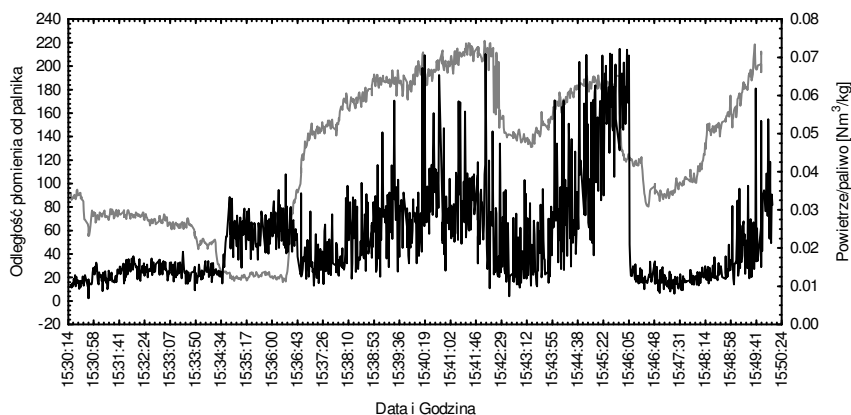
Parametr sferyczności konturu jest w przybliżeniu na stałym poziomie przy stabilnym spalaniu, natomiast utrata stabilności wiąże się z gwałtownym spadkiem wielkości tego parametru. Podobnie jak w przypadku pola powierzchni i długości konturu płomienia, korelacja kolistości i stosunku powietrze-paliwo jest ujemna i wynosi $-0,646$. Wielkość korelacji jest mniejsza, niż dla poprzednio wyznaczonych parametrów geometrycznych.



Rys. 6.27. Zmiany kolistości konturu płomienia przy przechodzenia ze spalania stabilnego do niestabilnego

Odległość czoła płomienia od wieńca palnika pyłowego

Odsunięcie czoła płomienia od palnika jest parametrem bezpośrednio wskazującym na stabilność płomienia. Problem ten bliżej został przedstawiony w rozdziale 2.5. Zmiany odległości czoła płomienia od wieńca palnika zostały przedstawione na rys. 6.28, przy czym wartość progowa $a^{thr} = 64$.



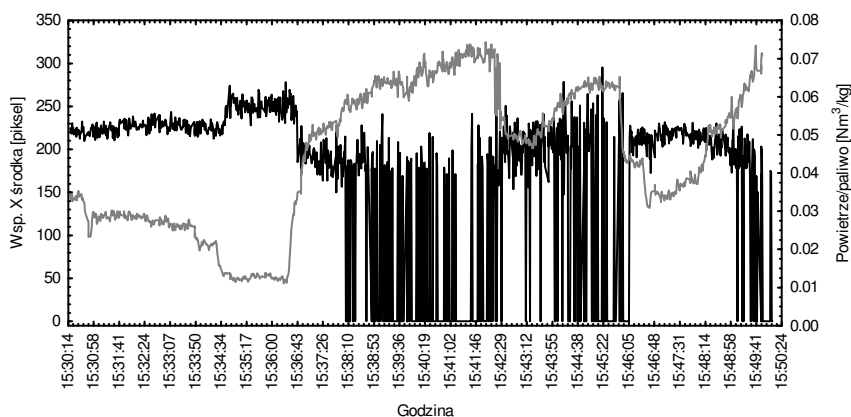
Rys. 6.28. Zmiany odległości czoła płomienia od wieńca palnika przy przechodzenia ze spalania stabilnego do niestabilnego

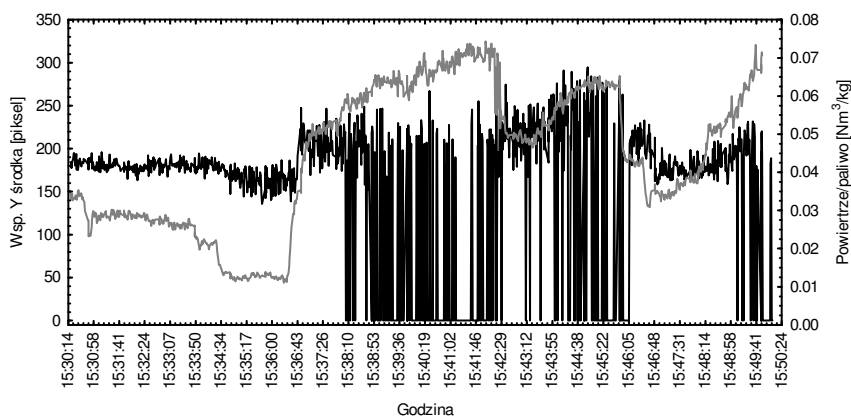
Parametr ten charakteryzuje się stosunkowo małymi fluktuacjami przy spalaniu stabilnym, co świadczy o tym, że czoła płomienia jest nieruchome względem palnika. Utrata stabilności objawia się większym odsunięciem płomienia od palnika, a przede wszystkim, z jego dużą zmiennością w dziedzinie czasu.

W odróżnieniu od wcześniej omawianych, odległość czoła palnika od palnika jest dodatnio skorelowana ze stosunkiem powietrze-paliwo. Korelacje dla $a^{thr} = 32, 64, 96, 120$ wynosiły odpowiednio: 0,356, 0,428, 0,482, 0,424. Przyjęcie skrajnych wartości a^{thr} jest mniej korzystne, podobnie jak w przypadku wcześniej przedstawionych parametrów geometrycznych płomienia.

Środek obszaru płomienia

Kolejnym analizowanym parametrem są współrzędne środka płomienia, których zmiany podczas testu spalania zostały pokazane na rys. 6.29. Charakterystyczne jest tu występowanie dużych fluktuacji położenia środka płomienia w przypadku spalania niestabilnego. Natomiast w warunkach spalania stabilnego, współrzędne środka płomienia wykazują niewielką zmienność.





Rys. 6.29. Zmiany położenia współrzędnych środka płomienia podczas testu spalania, $a^{thr} = 64$

Wartości korelacji pomiędzy odpowiednimi współrzędnymi środka płomienia a stosunkiem powietrze-paliwo dla różnych wartości a^{thr} zostały przedstawione w tabeli 6.1.

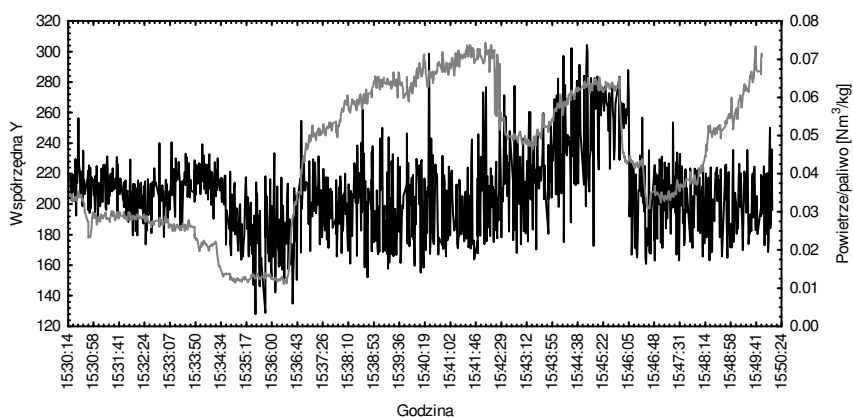
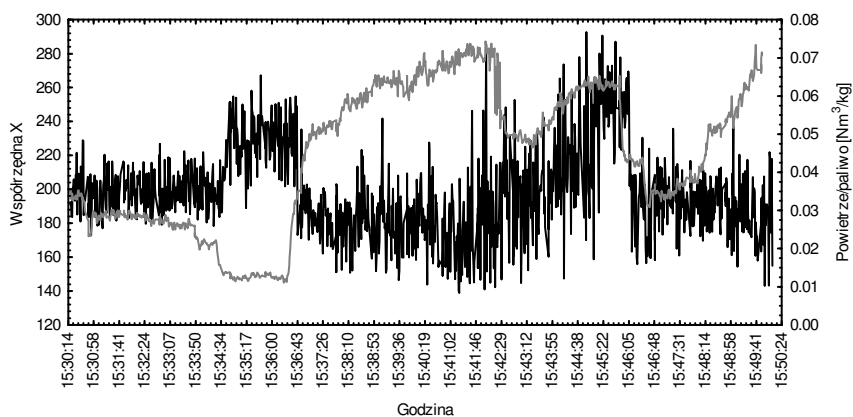
Tabela 6.1 Korelacje współrzędnych środka płomienia i stosunku powietrze-paliwo

	Współrzędna X	Współrzędna Y
$a^{thr} = 32$	-0,517	0,194
$a^{thr} = 64$	-0,665	-0,364
$a^{thr} = 96$	-0,733	-0,573
$a^{thr} = 120$	-0,820	-0,753

Przedstawione wyniki wskazują, że im wartość a^{thr} rośnie, tym współrzędne środka obszaru płomienia są silniej skorelowane ze zmianami proporcji powietrza i paliwa. Korelacje, z jednym wyjątkiem, mają znaki ujemne oraz są one większe dla współrzędnej poziomej (X).

Środek obszaru o największej jasności

Obszar o największej jasności składa się z pikseli o maksymalnych amplitudach. Dla takiego obszaru wyznaczono środek obszaru, którego współrzędne środka zostały zaprezentowane na rys. 6.30.

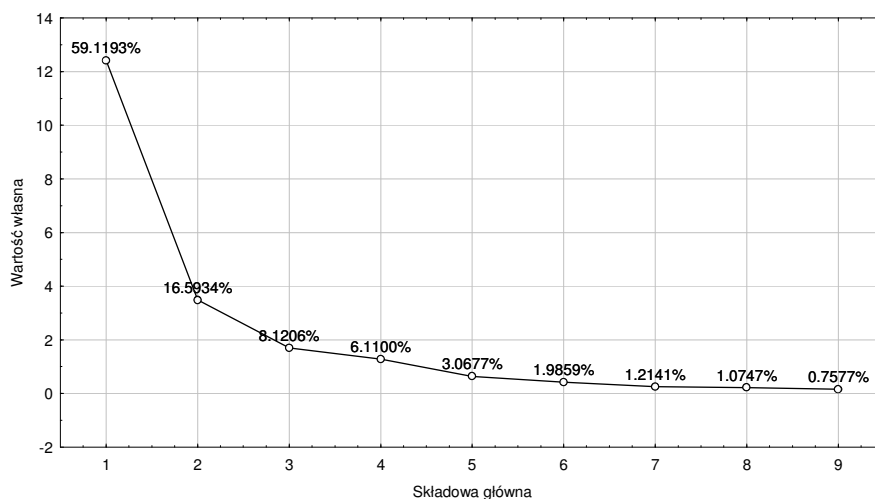


Rys. 6.30. Zmiany położenia współrzędnych środka płomienia przy przechodzenia ze spalania stabilnego do niestabilnego

Jasność płomienia, jak dyskutowano w rozdziale 4.2, jest powiązana z temperaturą płomienia. Położenie środka obszaru o największej jasności związane jest z miejscem w przestrzeni o największej temperaturze. Jest to parametr, który nie zależy od przyjętej wartości a^{thr} .

6.8 Redukcja parametrów geometrycznych obrazu płomienia (położenie 2) za pomocą analizy składowych głównych

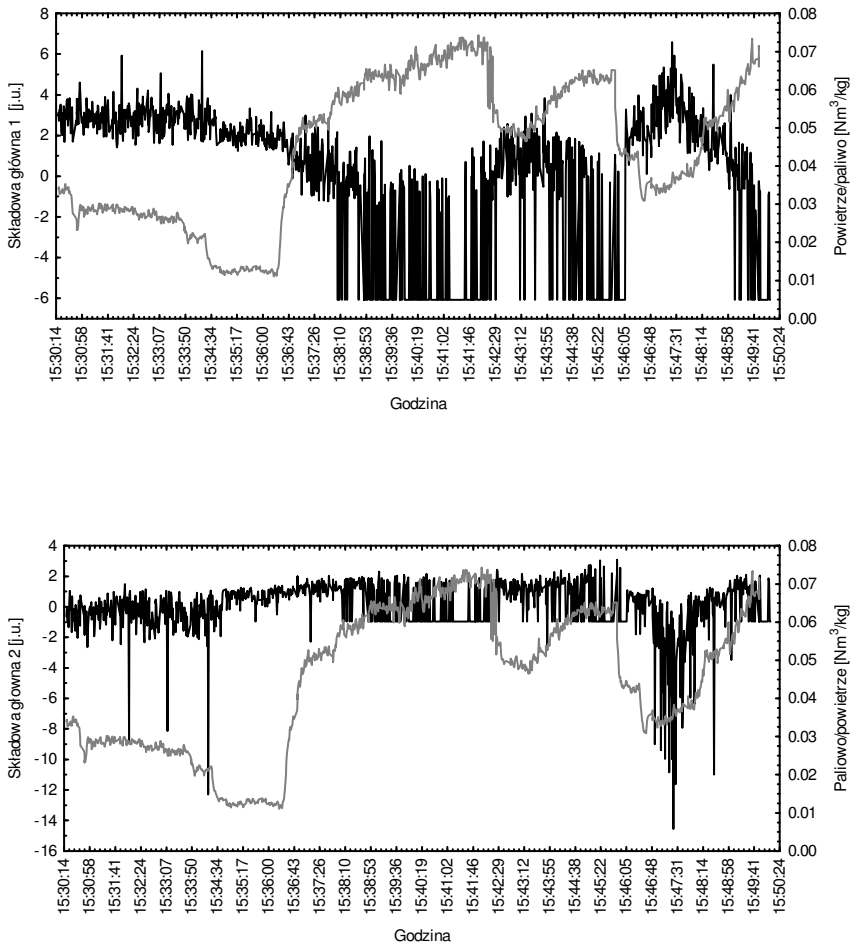
Podobnie jak w badanym wcześniej położeniu 1, także w położeniu 2 analizowano analogiczne parametry geometryczne wyznaczonych dla obszaru płomienia. Składowe główne zostały wyznaczone na podstawie ogółem 117857 obserwacji obrazów płomienia. W początkowej fazie poszukiwano model, którego skumulowany procent wariacji wyjaśnionej będzie większy od 98%. Znaleziony model składał się z 9 składowych głównych, dla którego wykres osypiskowy przedstawiony został na rysunku 6.31.



Rys. 6.31. Wykres osypiska dla modelu PCA, z zaznaczonymi procentami wariacji wyjaśnionej (R^2X) dla poszczególnych składowych głównych

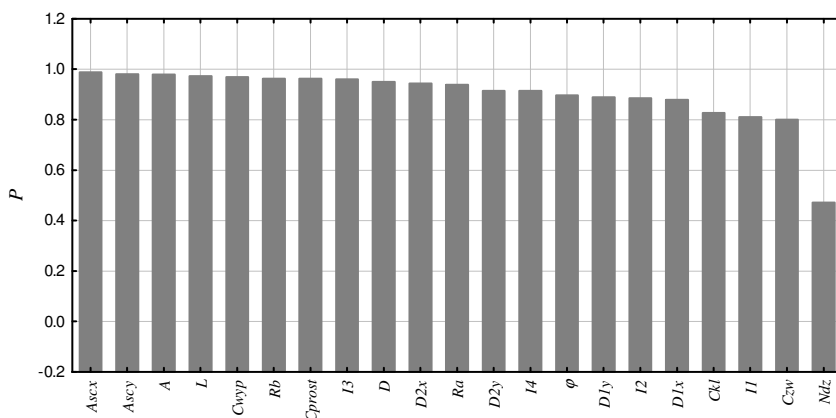
Uzyskany model może być jeszcze uproszony, przyjmując mniejszą liczbę składowych głównych na podstawie wykresu osypiska, bądź kryterium Keisera. Wartość własna przekracza wartość 1 dla czterech pierwszych składowych głównych. Kryterium Keisera pozwala przyjąć model PCA, składający się z czterech składowych głównych. Wartość skumulowanej wariacji wyjaśnionej wynosi w tym przypadku 89,94%.

Przebieg pierwszej i drugiej składowej głównej przedstawiono na rysunku, odpowiednio 6.32 a) i b).



Rys. 6.32. Zmiany pierwszej składowej głównej – a) drugiej składowej głównej dla modelu PCA uzyskanego na podstawie parametrów geometrycznych płomienia

Udział rozpatrywanych parametrów geometrycznych płomienia w modelu zawierającym cztery składowe główne, wyrażony w postaci zależności 4.14, przedstawia rys. 6.33.



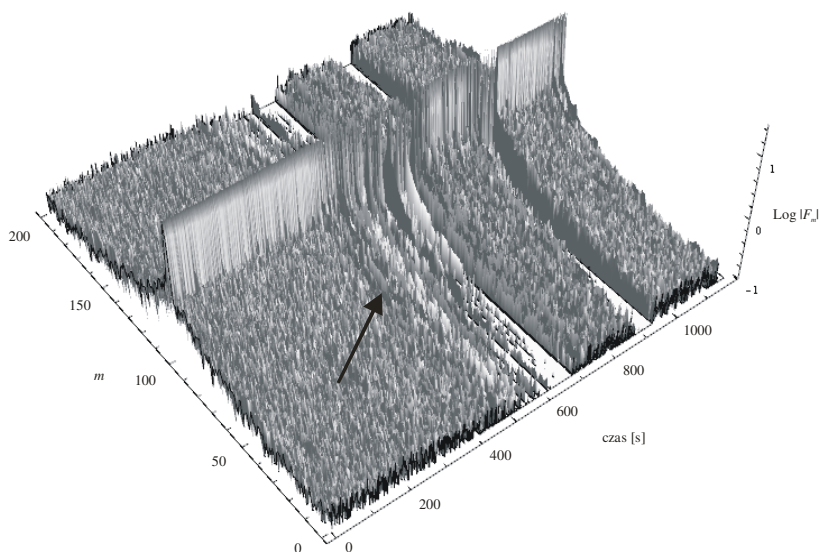
Rys. 6.33. Wartości wskaźnika P dla poszczególnych parametrów geometrycznych płomienia w wyznaczonym modelu PCA

Przedstawione wyniki wskazują, że dominujące parametry geometryczne płomienia w utworzonym modelu PCA to m.in. współrzędne środka płomienia, pole jego powierzchni i długość. Do mniej ważnych parametrów zaliczyć należy jeden ze wskaźników jednorodności obszaru jakim jest ilość dziur obszaru płomienia (N_{dz}), dla którego wartość wskaźnika P jest mniejsza od 0,5.

6.9 Analiza kształtu płomienia wykorzystująca deskryptory Fouriera (położenie 2)

Podobnie jak w przypadku prostopadłego położenia kamery względem osi palnika, także w położeniu 2 wyznaczono deskryptory Fouriera dla krawędzi obszarów płomienia. Dla każdego obrazu w zarejestrowanej sekwencji, krawędź obszaru płomienia określono przyjmując wartość progową a^{thr} równą 50% wartości maksymalnej, tj. 64. Gdy obszar płomienia składał się z więcej niż jednej części, pod uwagę brana była tylko ta o najdłuższej krawędzi. Dla każdej krawędzi wyznaczono maksymalnie 200 deskryptorów Fouriera, zgodnie z zależnością (4.6). Zmiany wartości modułu deskryptorów Fouriera w czasie trwania

testu spalania, przedstawionego na początku rozdziału 6.5 zostały zaprezentowane na rys. 6.34.

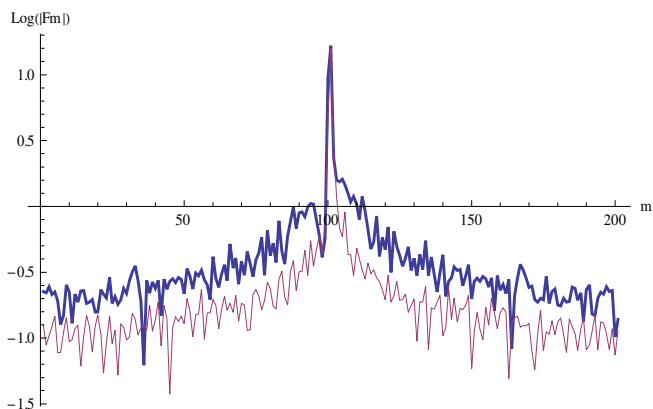


Rys. 6.34. Zmiany deskryptorów Fouriera konturów płomienia wyznaczonych dla $a^{thr} = 64$

Kształt płomienia jest zmienny w czasie trwania testu stabilności, na co wskazuje zmieniający się w czasie rozkład $|F_m|$. Początkowo, gdy proces spalania przebiegał w sposób stabilny, kształt płomienia jest regularny. Wskazuje na to stosunkowo niewielki udział deskryptorów odpowiadających wyższym częstotliwościom. Utrata stabilności wiąże się ze zmianą kształtu płomienia, który staje się przez to mniej regularny. Wskazują na to inne niż w początkowej fazie testu, wartości deskryptorów, co na rys. 6.34 zaznaczono strzałką. Rysunek 6.35 przedstawia deskryptory Fouriera konturów uzyskanych w warunkach spalania stabilnego i niestabilnego. Ich poziomy, zarówno w przypadku niskich, jak i wysokich częstotliwości są zdecydowanie różne.

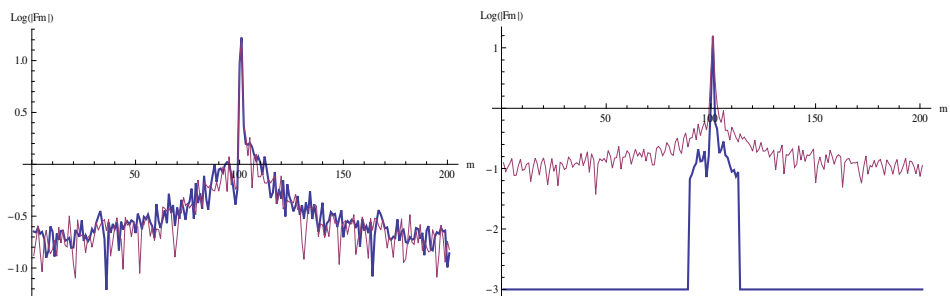
Charakterystyczne dla niestabilnego płomienia jest zmienność jego kształtu, co odzwierciedlają wartości deskryptorów. Rysunek 6.36

przedstawia ich zmiany w odstępie czasu wynoszącym 10ms, odpowiednio dla płomienia stabilnego (rys. 6.36 a) i niestabilnego (rys. 6.36 b).



Rys. 6.35. Amplitudy deskryptorów Fouriera wyznaczone dla dwóch przykładowych konturów, odpowiadających spalaniu stabilnemu (linia cienka) i spalaniu niestabilnemu (linia pogrubiona)

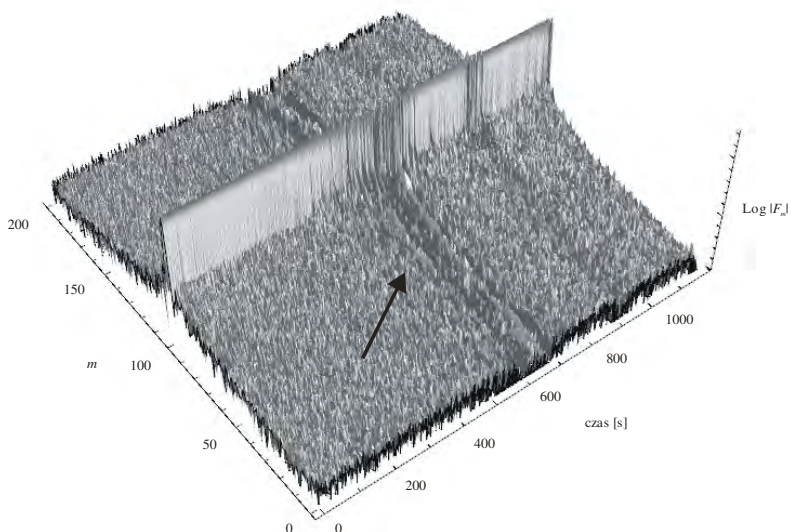
W pierwszym przypadku, amplitudy deskryptorów mają zbliżone wartości. W drugim, można zaobserwować znaczna różnicę ich poziomów. Co więcej kontur, dla którego deskryptory oznaczone są na rys. 6.36 b) linią pogrubioną reprezentowany jest przez mniejszą ich liczbę. Jest to spowodowane liczbą pikseli konturu, których jest mniejsza niż założona liczba deskryptorów (w rozpatrywanym przypadku – 200).



Rys. 6.36. Amplitudy deskryptorów Fouriera wyznaczone dla dwóch konturów płomienia w odstępie wynoszącym 10ms dla spalania stabilnego – a) i niestabilnego – b)

Pogłębiający się stan braku stabilności płomienia może doprowadzić do sytuacji w której deskryptory nie mogą być w ogóle obliczone, ponieważ dla przyjętej wartości a^{thr} kontur obszaru płomienia ma zerową długość, co jest równoznaczne z brakiem płomienia.

Przeprowadzenie analogicznej analizy dla innej wartości progowej a^{thr} , prowadzi do podobnych wniosków. Zmiany wartości modułu deskryptorów Fouriera w czasie trwania testu spalania dla $a^{thr} = 32$ pokazano na rys. 6.37.



Rys. 6.37. Zmiany deskryptorów Fouriera konturów płomienia wyznaczonych dla $a^{th} = 32$

6.10 Badanie częstotliwości migotania płomienia przy pomocy kamery cyfrowej

Wykorzystanie w zaprezentowanym stanowisku diagnostycznym, nowoczesnej kamery, której szybkości akwizycji obrazu przekracza ok. 100 klatek/s, pozwala na jego dodatkowe wykorzystanie do badania pulsacji płomienia. Wyniki szeregu prac badawczych przeprowadzonych z użyciem wielokanałowej, światłowodowej sondy pomiarowej wskazują,

że w przypadku turbulentnego spalania pyłu węglowego, migotanie płomienia jest istotnym sygnałem diagnostycznym zachodzącego procesu [11], [12], [17], [27], [147].

Stwierdzono ponadto, że wrażliwość poszczególnych stref płomienia na zmiany parametrów wejściowych palnika (np. stosunek powietrze-paliwo, parametry pyłu węglowego) nie jest jednakowa, a najbardziej wrażliwy obszar płomienia znajduje się w pobliżu palnika. Celowym jest zatem określenie położenia tego obszaru w przestrzeni, które zależy jest m.in. od konstrukcji palnika, komory spalania oraz konstrukcji i miejsca zainstalowania sondy optycznej.

Zastosowanie w torze wizyjnym kamery, działającej w trybie bez przeplotu, prowadzi do wygenerowania w tym samym odstępie czasu sygnałów elektrycznych, których poziom jest uzależniony od mocy promieniowania optycznego, padającego na elementy światłoczułe przetwornika obrazowego. Działanie takiego toru wizyjnego podobne jest do działania wielokanałowej, światłowodowej głowicy pomiarowej. Jednak ilość kanałów jest w takim przypadku nieporównanie większa. Liczba pikseli wchodzących a skład przetwornika obrazowego wynosi przeciętnie od kilkuset tysięcy do kilku milionów.

Badanie częstotliwości migotania płomienia na podstawie sygnału uzyskanego niezależnie z każdego piksela wymagałoby ogromnej mocy obliczeniowej. Z drugiej strony, ograniczenia takiej analizy wynikają z faktu, że amplituda sygnału ma tylko 8-bitową rozdzielczość. Wspomniane ograniczenia można jednak częściowo wyeliminować, jeżeli piksele zostaną zgrupowane w bloki, które mogłyby posiadać dowolny kształt i różną wielkość. Amplituda sygnału skojarzonego z takim blokiem zależy od amplitud sygnałów wszystkich pikseli wchodzących w skład takiej grupy.

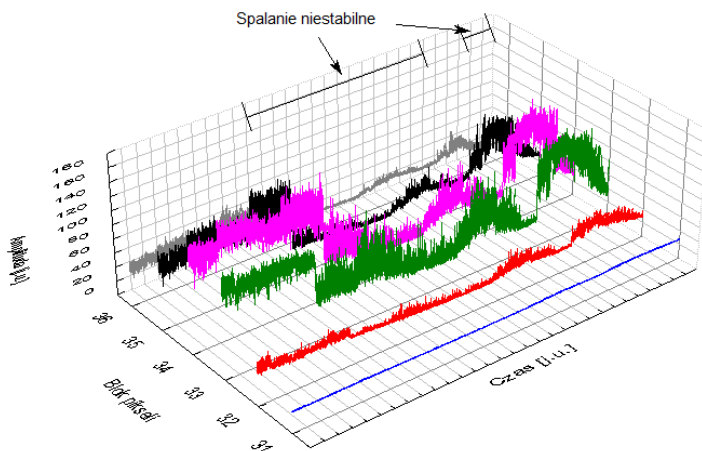
Rys. 6.38 przedstawia prostą możliwość realizacji wspomnianej idei. Obraz o rozmiarach 384×384 pikseli został podzielony na jednakowe, prostokątne obszary o rozmiarze 64×64 pikseli. W ten sposób został on

podzielony na 36 jednakowych części. Przyjęto, że wypadkowa amplituda, wyznaczona dla każdego bloku jest średnią z amplitud wszystkich tworzących go pikseli.

1 1	1 2	1 3	1 4	1 5	1 6
2 1	2 2	2 3	2 4	2 5	2 6
3 1	3 2	3 3	3 4	3 5	3 6
4 1	4 2	4 3	4 4	4 5	4 6
5 1	5 2	5 3	5 4	5 5	5 6
6 1	6 2	6 3	6 4	6 5	6 6

Rys. 6.38. Podział ramki obrazu na 36 równe obszary o rozmiarach 64×64 pikseli. Zaznaczono bloki pikseli, dla których przebiegi czasowe zostały pokazane na rys. 6.39 i 6.40

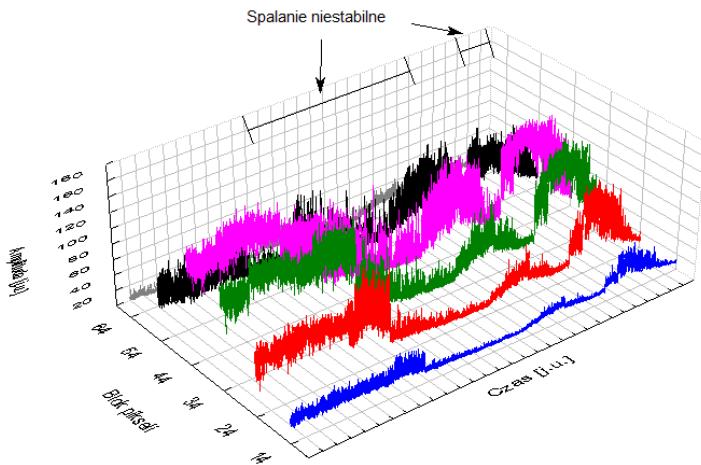
Dla szybkości akwizycji wynoszącej 100 obrazów/s, uzyskano 36 szeregów czasowych, których amplitudy zależą od ilości energii promienistej, padającej na każdy blok pikseli. Z twierdzenia o próbkowaniu wynika, że w analizowanym przypadku, przy próbkowaniu sygnału z częstotliwością 100 Hz, można wyznaczyć częstotliwości migotania płomienia o wartościach nie większych niż 50 Hz. Z szeregu badań pulsacji płomieni pyłowych przeprowadzonych zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych przy pomocy układu monitorowania płomienia wynika, że dominują częstotliwości z zakresu od ok. kilku do kilkudziesięciu Hz. Przebiegi wybranych sygnałów, uzyskanych w czasie testu stabilności, którego przebieg opisano w rozdziale 6.5, zostały przedstawione na rysunkach 6.39 i 6.40.



Rys. 6.39. Sygnały uzyskane z 6 bloków pikseli rozmieszczonych poziomo. Oznaczenie bloków pikseli jest zgodne z rys. 6.38

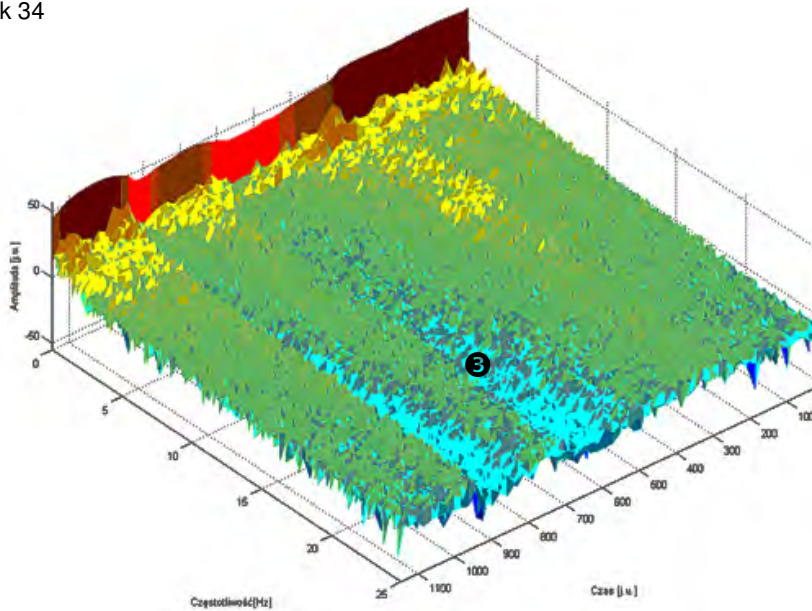
Zmiany stabilności płomienia wpływają na poziomy amplitud sygnałów jak przedstawiają to rys. 6.39 i 6.40, przy czym są one największe dla bloków pikseli położonych na środku analizowanego obrazu (rys. 6.38).

Z uwagi na niestacjonarny charakter przedstawionych sygnałów, ich analiza w dziedzinie częstotliwości wymaga użycia metod, które przedstawione zostały w rozdziale 4.6. Na rysunkach 6.41 i 6.42 przedstawione zostały spektrogramy sygnałów przedstawionych odpowiednio na rys. 6.39 i 6.40, wyznaczone przy wykorzystaniu okna Hanninga o długości 4096 punktów, w zakresie $0 \div 30\text{Hz}$.

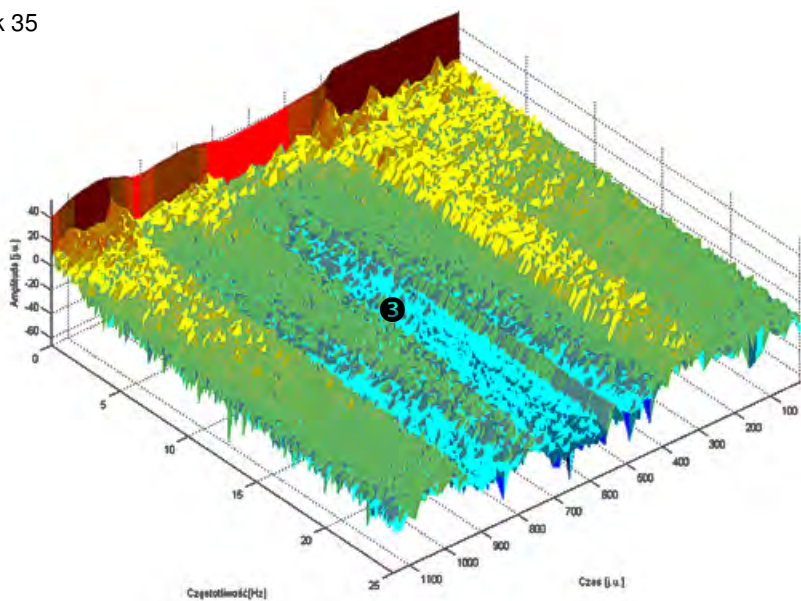


Rys. 6.40. Sygnały uzyskane z 6 bloków pikseli rozmieszczonych pionowo. Oznaczenie bloków pikseli jest zgodne z rys. 6.38

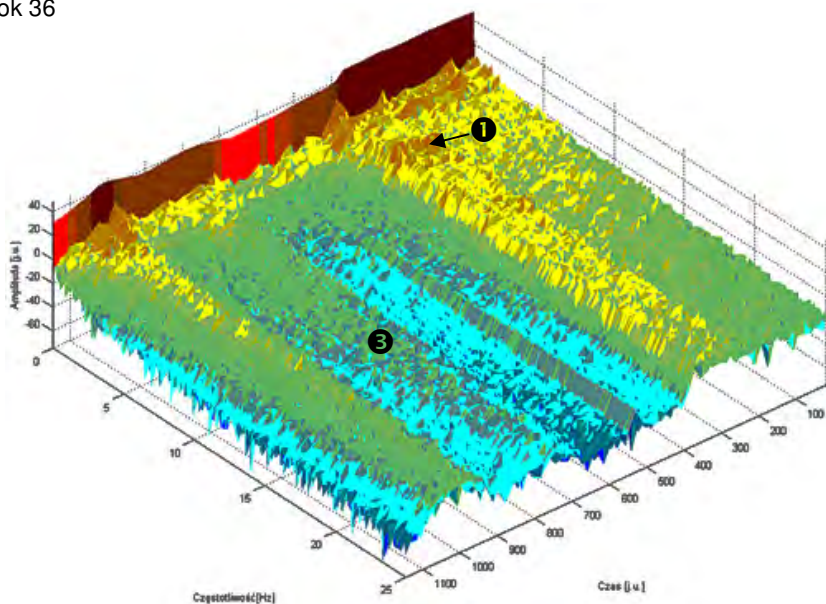
blok 34



blok 35

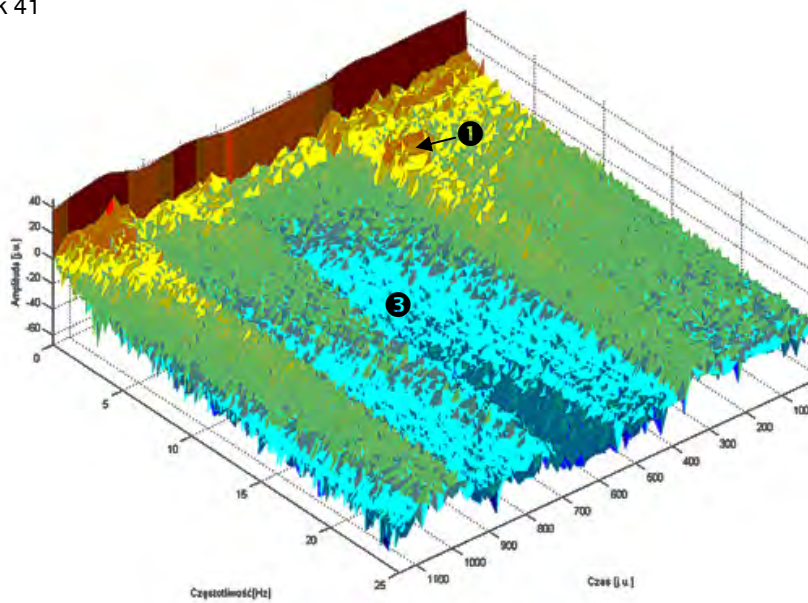


blok 36

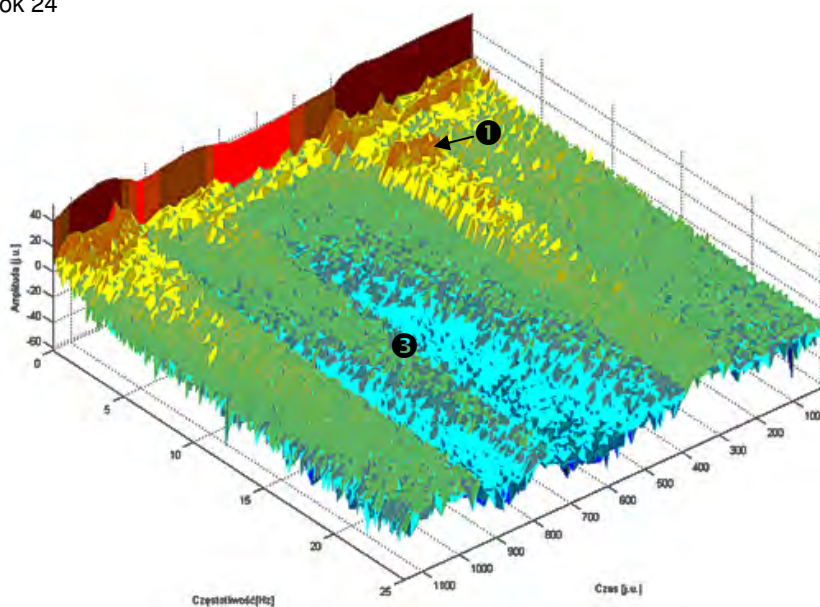


Rys. 6.41. Spektrogramy wyznaczone dla bloków pikseli, rozmieszczonych w kierunku poziomym. Oznaczenia bloków są przedstawione na rys. 6.38

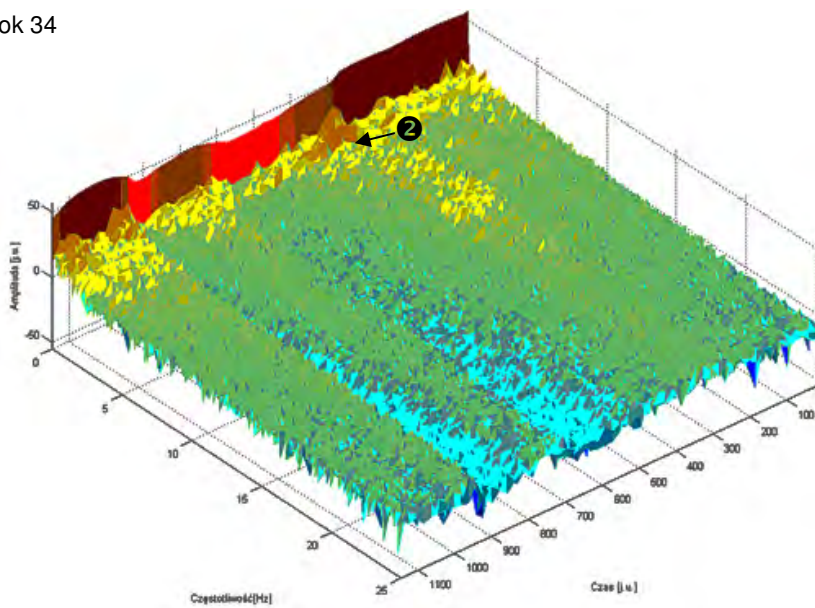
blok 41



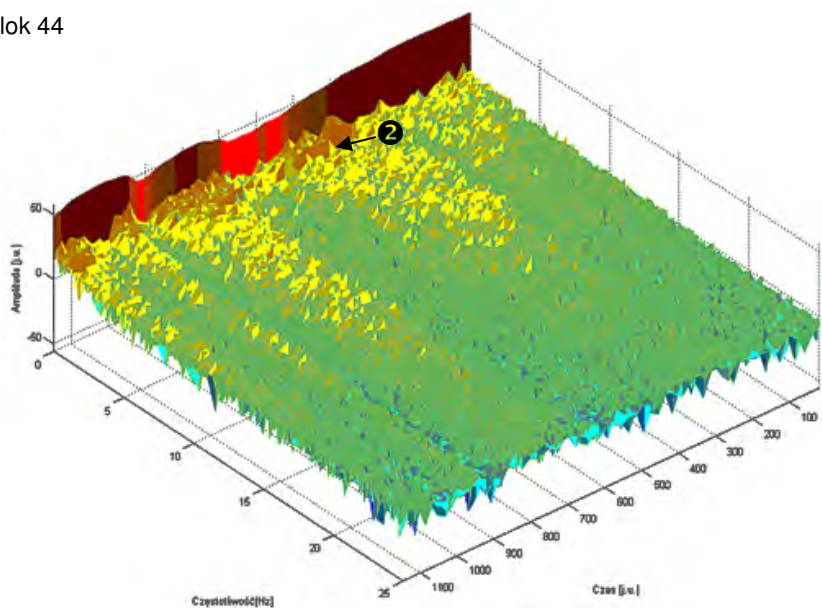
blok 24

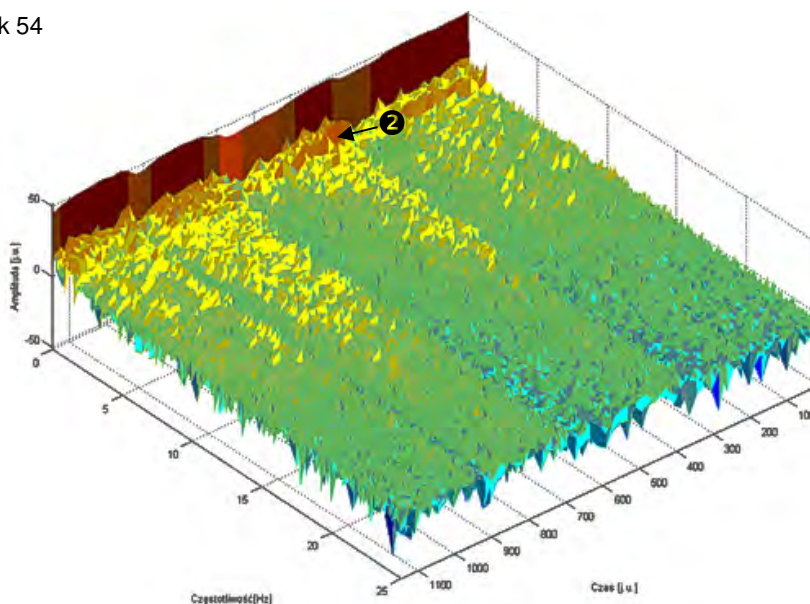


blok 34



blok 44





Rys. 6.42. Spektrogramy wyznaczone dla bloków pikseli, rozmieszczonych w kierunku pionowym. Oznaczenia bloków są przedstawione na rys. 6.38

Z przytoczonych spektrogramów wynika, że migotania płomienia najbardziej reprezentowane są przez niskie częstotliwości – od 0 do ok. 3 Hz, co widoczne jest w spektrogramach wszystkich sygnałów. Zmiany warunków prowadzenia procesu spalania, uwidaczniają się w chwilowych zmianach kształtu widma. Są one odmienne dla sygnałów odpowiadającym różnym blokom pikseli. Na przykład zmniejszenie wydatku powietrza wtórnego występujące od godziny ok. 15:35:00 do 15:36:50 (rys. 6.24 d)) powoduje pojawienie się częstotliwości ok 4 Hz dla bloków pikseli oznaczonych jako 36, 41, 24, co na rys. 6.41 i 6.42 zostało oznaczone jako ❶. Szybkie zwiększenie wydatku powietrza pierwotnego i związana z tym utrata stabilności płomienia, uwydatnia się przejściowym pojawieniem się częstotliwości ok. 1Hz (oznaczenie – ❷), w przypadku bloków 34, 44, 54, 64, oraz zmniejszeniem udziału częstotliwości z zakresu powyżej 5 Hz (oznaczenie – ❸), szczególnie widoczne dla bloków 35, 36, 41, 24.

Zaprezentowana analiza przykładowych spektrogramów wskazuje, że wykorzystanie sekwencji obrazów do określania częstotliwości pulsacji płomienia jest możliwe. Częstotliwość migotania płomienia pozwala na wskazanie stanu niestabilnego spalania i można ją traktować jako sygnał diagnostyczny.

Strefowa analiza pulsacji płomienia, jak zostało to wykazane w [27], [12], jest również możliwa za pomocą wielokanałowej sondy optycznej, będącą częścią światłowodowego układu monitorowania płomienia. Wykorzystanie do tego celu toru wizyjnego z przetwarzaniem obrazu jest rozwiązaniem bardziej skomplikowanym, a przez to droższym w porównaniu z układem monitorowania płomienia. Przedstawiona analiza wskazuje, że tor wizyjny można także zastosować w diagnostyce procesu spalania, wykorzystując do tego celu informację zawartą w częstotliwości migotania płomienia. Należy podkreślić, że stanowi to istotne poszerzenie możliwości układu przetwarzania obrazu, który w diagnostyce procesu spalania bazowałby tylko na analizie geometrycznych cech płomienia.

7 Wybór sygnałów diagnostycznych

Ze względu na nieinwazyjność, oraz pomijalne opóźnienia, wykorzystano optyczny nośnik informacji o diagnozowanym procesie, którym były przedstawione w rozdziale 6, geometryczne cechy kształtu płomienia oraz jego deskryptory Fouriera.

Zaprezentowana diagnostyka procesu spalania pyłu węglowego przebiegała według schematu bez modelu procesu (rys. 1.1 a)) i obejmowała rozpoznanie stanu spalania niestabilnego. Bardzo duża złożoność zjawisk składających się na ten proces praktycznie uniemożliwia zastosowanie schematu jego diagnostyki wykorzystującego model procesu.

Testy na stanowisku laboratoryjnym przeprowadzono, wymuszając stan niestabilnego spalania głównie poprzez zmianę stosunku powietrze-paliwo.

Diagnostyka procesu spalania z wykorzystaniem metod przetwarzania obrazu może być oparta o schemat rozumiany jako rozpoznanie wzorców. Stan spalania niestabilnego nie jest jednak pojęciem jednoznacznym. Dlatego takie podejście wymagałoby przeprowadzenie badań wstępnych, w danych warunkach (rodzaj palnika, komora spalania) dla każdych możliwych wartości parametrów wejściowych, jak: właściwości fizykochemiczne węgla, jego przemiał, wydatek, rozdział i wydatki powietrza, itp.). Takie badania, przeprowadzone dla danego palnika i komory spalania i co bardzo istotne, przy określonym ustawieniu kamery, pozwoliłyby na określenie wzorcowych wartości sygnałów diagnostycznych, które odpowiadały stanowi spalania stabilnego.

Przeprowadzone badania stabilności procesu spalania dla dwóch różnych ustawień kamery względem płomienia, pozwoliły na ocenę przydatności geometrycznych parametrów kształtu płomienia jako sygnałów diagnostycznych. Wyniki tych badań wskazują, że sygnałami najbardziej wrażliwymi (w sensie wariancji) na zmiany parametrów wejściowych (stosunek powietrze-paliwo) jest pole powierzchni płomienia (rys. 6.7, 6.25) oraz długość obszaru płomienia (rys. 6.8, 6.26). Potwierdza to analiza składowych głównych, przeprowadzona dla zaproponowanych w pracy parametrów geometrycznych płomienia. Wspomniane parametry są miarami objętości, jaką płomień zajmuje w przestrzeni. Dla stanu spalania niestabilnego zaobserwowano zmniejszenie pola powierzchni płomienia i długości jego konturu, jak również zwiększenie rozrzutu omawianych parametrów.

Innymi wskaźnikami, które należy wziąć pod uwagę są miary, zmian położenia płomienia w przestrzeni, którymi są położenie środka ciężkości obszaru płomienia oraz odległość pomiędzy krawędzią płomienia a wieńcem palnika pyłowego. Należy podkreślić, że stwierdzenie stanu

nieprawidłowego spalania na podstawie wymienionych wskaźników wymaga analizy zmian ich wartości w czasie. Stwierdzenie zatem stanu, w jakim znajduje się proces spalania może nastąpić nie na podstawie analizy pojedynczego obrazu płomienia, ale na podstawie analizy ich sekwencji.

8 Podsumowanie i wnioski

Proces spalania pyłu węglowego, a szczególnie prowadzony w warunkach przemysłowych, należy do grupy procesów technologicznych, o dużym stopniu złożoności. Wynika to zarówno z charakteru zjawisk, które towarzyszą temu procesowi, jak i trudnych warunków pracy aparatury diagnostycznej, narażonej na wysoką temperaturę, zapylenie i wibracje. Problem ten nabiera szczególnego znaczenia, gdy diagnostyka procesu odbywa się za pośrednictwem optycznego nośnika informacji.

Przedstawiona w niniejszej pracy diagnostyka procesu spalania, miała swój początek w badaniach prowadzonych od szeregu lat w Katedrze Elektroniki Politechniki Lubelskiej, związanych z wykorzystaniem w tym zakresie metod optycznych. W ich rezultacie został zaprojektowany i wykonany wielokanałowy, światłowodowy układ monitorowania płomienia przeznaczony do pracy w warunkach przemysłowych.

Zwiększanie ilości kanałów optycznych pozwalających na niezależną analizę sygnałów optycznych, pochodzących z różnych obszarów płomienia, prowadzi do jakościowej zmiany, jaką jest przetwarzanie obrazu.

Konsekwencje tej zmiany są wielorakie. Z jednej strony, możliwości analizy danych poszerzają się o algorytmy przetwarzania obrazu, ale z drugiej pojawia się problem przetwarzania w czasie rzeczywistym bardzo dużej ilości informacji. Skłoniło to do wykorzystania geometrycznych parametrów kształtu płomienia jako sygnałów diagnostycznych procesu spalania, które mogą być wyznaczone w czasie rzeczywistym,

przez co rozumie się czas rzędu 1/50s. W tym celu, stworzono oprogramowanie wykorzystujące biblioteki Halcon firmy MVTec Software.

W pracy przedstawiono tylko niektóre z możliwych do wyznaczenia parametrów geometrycznych płomienia. Ocenie podlegała ich przydatność do detekcji nieprawidłowego stanu procesu spalania, jakim jest spalanie niestabilne. Duża ilość zmiennych, na podstawie których dokonywano oceny procesu nie jest korzystna, ze względu na bardziej złożoną interpretację. W celu redukcji ilości zmiennych, jak również wskazania, które z zaproponowanych wskaźników są bardziej wrażliwe na zmiany stechiometrii spalania, zastosowano analizę składowych głównych.

Zbadano również możliwość wykorzystania kształtu płomienia jako sygnału diagnostycznego, wyrażonego w postaci deskryptorów Fouriera. Wskazano również możliwość wykorzystania transformaty curvelet.

W pracy wykazano, że tor wizyjny z przetwarzaniem obrazu pozwala, w pewnym zakresie, na diagnostykę procesu spalania wykorzystując w tym celu również informację zawartą w częstotliwości migotania płomienia. Wartości, jakie przybierają omówione wskaźniki zależą od wzajemnego położenia kamery i badanego płomienia. Z tego też względu sprawdzane były dwa różne warianty ustawienia kamery.

Wydaje się, że połączenie analizy kształtu płomienia z analizą częstotliwościową pulsacji płomienia powinny dać jeszcze lepsze rezultaty. Przetwarzanie bardzo dużej ilości informacji, która z natury procesu spalania jest niepewna i nieprecyzyjna, wymaga zastosowania algorytmów sztucznej inteligencji [94]. Z drugiej strony, przetwarzanie informacji jako sekwencji obrazów stawia duże wymagania sprzętowe. Dlatego ważnym zagadnieniem jest optymalizacja algorytmów, które mają działać w czasie rzeczywistym a szczególnie wykorzystania możliwości jakie daje przetwarzanie równoległe. Dotyczy to zwłaszcza złożonych obliczeniowo algorytmów, jak np. transformata curvelet.

Kolejny aspekt, który należałoby wziąć pod uwagę w prezentowanym podejściu do diagnostyki spalania jest wykorzystanie barwy płomienia. Kamery kolorowe pracujące w zakresie światła widzialnego, mogą być stosowane do pomiaru temperatury płomienia [82], [95], [113].

Wykorzystanie przekształcania obrazu dostarcza informacji, które można wykorzystać do sterowania pracą kotła energetycznego. Zagadnienie to staje się szczególnie ważne przy współspalaniu biomasy. Konieczne jest jednak przeprowadzenie dalszych badań, szczególnie w warunkach przemysłowych.

Literatura

- [1] Wilk R., Energetyka a ochrona środowiska, Materiały konferencyjne „Spalanie węgla '99”, s. 77-89, Wrocław, 1999
- [2] Romero C., Li X., Keyvan S., Rossow R., Spectrometer-based combustion monitoring for flame stoichiometry and temperature control, Applied Thermal Engineering, no. 25, p. 659–676, 2005
- [3] Wójcik W., Gromaszek K., Kotyra A., Jagiełło Z., Opracowanie modeli dla kompleksowego systemu sterowania procesem spalania w kotle energetycznym, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10, s. 136-139, 2010
- [4] Golec T., Współspalanie biomasy w kotłach energetycznych, Energetyka, nr 7/8, s. 437-445, 2004
- [5] Williams A., Pourkashanian M., Jones J.M., Combustion of pulverised combustion and biomass, Progress in Energy and Combustion Science, no. 27, pp. 587-610, 2001
- [6] Heinzl T., Siegle V., Spliethoff H., Hein K.H.G., Investigation of slagging pulverized fuel co-combustion of biomass and coal at a pilot-scale test facility, Fuel Processing Technology, vol. 54, no. 1-3, pp. 109-125, 1998
- [7] Pronobis M., The influence of biomass co-combustion on boiler fouling and efficiency, Fuel, vol. 85, no. 4, pp. 474-480, 2006
- [8] Liszka M., Majchrzak H., Analiza efektów ekologicznych na proces współspalania węgla i biomasy na przykładzie Elektrowni Opole, Energetyka, nr 3, s. 133-140, 2003.
- [9] Wójcik W., Kotyra A., Komada P., Biomass combustion monitoring using fibre-optic probe, IV International Conference New Electrical and Electronic Technologies and Their Application, pp. 254-257, Zakopane, 2005
- [10] Wójcik W., Kotyra A., Golec T., Combustion assesment of coal and biomass mixtures using image processing, Symposium on Photonics Technologies for Framework Programme 7 OPERA, Wrocław, 2006
- [11] Sanz A., Ballester J., Hernández R., Cerecedo L.M., Advanced monitoring of industrial burners based on fluctating flame signals, Fuel, no. 87, pp. 1063-1075, 2008
- [12] Wójcik W., The utilisation of flame flicker in the fiber-optic system for combustion quality, EUROSENSORS IX, Warsaw, 1997, pp. 997-1000.
- [13] Jones A.R., Flame failure detection and modern boilers, Journal of Physics E: Scientific Instruments, vol. 21, pp. 921-928, 1988
- [14] Adamson E.J., Cumming R.G., Boiler flame monitoring system for low NO_x applications - an update, Proceedings of the American Power Conference, pp. 340-344, Chicago, 1997
- [15] Martin P., Actual state of technology of flame monitoring and validation, International Conference of Exhibition & Training Program Part 2, pp. 751-772, Chicago, USA, 1993

- [16] Wójcik W., Smolarz A., Kotyra A., Wojciechowski C., Komada P., Optimisation of optical fibre probe for flame monitoring by application of finite elements method, Proceedings on 2nd International Symposium on Microelectronics Technologies and Microsystems, pp. 102-108, Lviv, 1998
- [17] Wójcik W., Kotyra A., Smolarz A., Wojciechowski C., Optymalizacja sondy światłowodowej do pomiarów parametrów płomienia, Materiały konferencyjne VII Konferencji Światłowodowy i ich zastosowania, s. 402-408, Krasnobród, 1999
- [18] Wójcik W., Kotyra A., Smolarz A., Wojciechowski C., Application of wavelet transformation for analysis of measurements in fibre optic flame monitoring system, Proceedings of SPIE, vol. 4239, pp. 96-101, 2000
- [19] Wójcik W., Biegański T., Kotyra A., Smolarz A., Forecasting of changes of flame flickering in coal flame burner, Proceeding of SPIE, vol. 3189, pp. 100-109, 1997
- [20] Hii N.C., Tan C.K., Chong A.Z.S., Wilcox S.J., Ward J., The Use of Flame Imaging Techniques to Monitor Pulverised Coal Flames Using Artificial Intelligence Techniques, Proceedings of IMECE2005, pp. 5-11, Orlando, 2005
- [21] Ward J. et. al, The Application of Artificial Intelligence Techniques in Combustion Systems, Artificial Intelligence in Energy and Renewable Energy Systems. Nova publishers, 2006, pp. 363-394.
- [22] Arabas J., Białobrzeski L., Domański P., Świrski K., Chomiak T., Optymalizacja kotła pyłowego i obniżenie emisji NO_x przy wykorzystaniu sieci neuronowych - metody soft computing, Energetyka, Problemy energetyki i Gospodarki Paliwowo-Energetycznej, nr 1, s. 21-23, 1998
- [23] Kalogirou S.A., Artificial intelligence for the modeling and control of combustion process: a review, Progress in Energy and Combustion Science, vol. 29, no. 6, pp. 515-566, 2003
- [24] Matsuzaki A., et al., New products for boiler safety operation, Proceedings on International Power Conference, pp. 1-7, San Diego, 1991
- [25] Chong H.S., et al., Development of an intelligent flame monitoring system for gas-fired steel reheating furnances, 2008
- [26] Michel J.B., Chételat O., Weber N., Sari O., Flame signature as a low-cost flame control method, Proceedings on Fifth International conference on technologies and combustion for a clean environment, pp. 1251-1253, Lisbon, 1999
- [27] Wójcik W. Kotyra A., Strefowa diagnostyka procesu spalania, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Kontrola, Sterowanie i Automatyzacja Procesu Spalania w Kotłach Energetycznych, s. 168-177, Zakopane, 2005
- [28] Wójcik W., Gotra Z., Kotyra A., Smolarz A., Sposób wykrywania oderwania się płomienia od wieńca niskoemisyjnego palnika wirowego i czujnika do tego sposobu, Patent A1 (21) 330937, 31.07.2000
- [29] Marques J.S., Jorge P.M., Visual inspection of a combustion process in a thermoelectric plant, Signal Processing, no. 80, pp. 1577-1589, 2000
- [30] Chimenti M., et al., An IR image processing approach for characterising combustion instability, nfrared Physics and Technology, vol. 46, pp. 41-47, 2006
- [31] Kurihara N., Nishikawa M., Watanabe A., et. al., A combustion diagnostics method for pulverized coal boilers using flame image recognition technology,

- IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. EC-1, no. 2, pp. 99-103, 1986
- [32] Gibbins J., Lin Y.M., Bowden S., Cameron S., Video observations of full-size pulverised coal flames, *Combustion Science and Technology*, no. 162, pp. 263-280, 2001.
- [33] Wójcik W., Kotyra A., Golec T., Gromaszek K., Monitorowanie procesu spalania za pomocą kamery, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 3, s. 241-243, 2008
- [34] Smart J., Lu G., Yan Y., Riley G., Characterisation of an oxy-coal flame through digital imaging, *Combustion and Flame*, vol. 157, no. 6, pp. 1132-1139, 2010
- [35] Baek W.B., Lee S.J., Cho C.H., Flame image processing & analysis for optimal firing of thermal power plant, *IEEE International Symposium on Industrial Electronic*, vol. vol.2, pp. 928-931, 2001
- [36] Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W., Diagnostyka procesów, metody sztucznej inteligencji, zastosowania, J. Korbicz, et al., Eds. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2002
- [37] Rodriguez F., Tova E., Cortes V., Cañadas L., OPTICOM: Advanced automatic monitoring system of local combustion conditions for improving boiler performance in PC power plants, *Fuel*, no. 81, pp. 637-645, 2002
- [38] Demayo T.N., McDonnell V.G., Samuelsen G.S., Robust active control of combustion stability and emissions performance in a fuel-staged natural gas fired industrial burner, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 29, no. 1, pp. 131-138, 2002
- [39] Isermann R., Ballé P., Terminology in the field of supervision, fault detection and diagnosis, *IFAC Komitet SAFEPROCESS*, 1996
- [40] Ściążko M., Węgiel kamienny - podstawowy surowiec dla energetyki, „Spalanie węgla ‘99””, s. 7-18, Ustroń-Zawodzie, 1999
- [41] Jaroński J., Techniki czystego spalania, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1996
- [42] Fristrom R.M., *Flame structure and processes*. London, Oxford University Press, 1995
- [43] Kordylewski W. (red.), *Niskoemisyjne techniki spalania w energetyce*, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2000.
- [44] Ściążko M., Węgiel kamienny - podstawowy surowiec dla energetyki, *Materiały konferencyjne „Spalanie węgla ‘99”*, s. 7-18, Wrocław, 1996
- [45] Miller B.G., *Coal Energy Systems*, London, Academic Press, 2005.
- [46] Speight J.G., *Handbook of coal analysis*. New Jersey, J. Wiley & Sons, 2005.
- [47] Tatsch J.H., *Coal deposits: Origin, evolution, and present characteristics*. Sudburgh, Tatsch Associates, 1980
- [48] Elliott M.A. (ed.), *Chemistry of Coal Technology*, vol. Second Suppl., New York, J. Wiley & Sons, 1981
- [49] Berkowitz N., *An Introduction to Coal Technology*, New York, Academic Press, 1979
- [50] Van Krevelen D.W., *Coal: Typology–Physics–Chemistry–Constitution*, Third Ed., Amsterdam, Elsevier Science, 1993

- [51] Glassman I., *Combustion*, London, Academic Press, 1987
- [52] Smoot L.D. (ed.), *Fundamentals of Coal Combustion. For clean and efficient use*. Amsterdam, New York, Elsevier, 1993
- [53] Kordylewski W. (red.), *Spalanie i paliwa*, wyd. 5, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2008
- [54] Agarwal P.K., A single particle model for the evolution and combustion of coal volatiles, *Fuel*, vol. 65, no. 6, pp. 803-810, 1986
- [55] Juan Y., Ming-chuan Z., Jian Z., Experimental and numerical investigations on the interactions of volatile flame and char combustion of a coal particle, *Proceedings of the Combustion Institute*, no. 32, pp. 2037-2042, 2009
- [56] Carpenter A.M., *Coal blending for power stations*, IEA Coal Research IEA/81, 1995
- [57] Karcz H., Kordylewski W., Rybak W., *Charakterystyki spalania węgla*, *Archiwum termodynamiki*, t.4, 1983
- [58] Karcz H., Jodkowski W., *Proces spalania pyłu węglowego*, *Materiały konferencyjne „Spalanie węgla ‘99”*, s. 47-53, Ustroń-Zawodzie, 1999
- [59] Žajdlík R., Jelemenský L., Remiarová B., Markoš J., Experimental and modelling investigations of single coal particle combustion, *Chemical Engineering Science*, no. 56, pp. 1355-1361, 2001
- [60] Xu C.R. Fu W.B., Study on the burning rate of carbon particles under forced convection conditions, *Combustion Science and Technology*, no. 124, pp. 167-182, 1997
- [61] Fu W.B. Zheng S.M., A simple method for calculating burning rate of char/carbon particles under oxygen concentration change, *Combustion Science and Technology*, no. 118, pp. 397-408, 1996
- [62] Sundaresan S. Amundson N.R., Diffusion and reaction in a stagnant boundary layer about a carbon particle. Pseudosteady-state structure and parameter sensitivity, *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, no. 19, pp. 344-351.
- [63] Sotirchos S.V. Amundson N.R., Diffusion and reaction in a char particle and in the surrounding gas phase. Two limiting models, *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, no. 23, 1984
- [64] Mon E. Amundson N.R., Diffusion and reaction in a stagnant boundary layer about a carbon particle. 2. An extension., *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, no. 17, pp. 313-321, 1978
- [65] Wang S., et al., Numerical study of coal particle cluster combustion under quiescent conditions, *Chemical Engineering Science*, vol. 62, pp. 4336-4347, 2007
- [66] Zhang D.K., Wall T.F., Analysis of the ignition of coal dust cloud, *Combustion and Flame*, vol. 92, pp. 475-480, 1992
- [67] Du X., Gopalakrishnan C., Annamalai K., Ignition and combustion of coal particle streams, *Fuel*, vol. 74, no. 4, pp. 487-494, 1995
- [68] Baukal C.E., *Industrial Combustion Pollution and Control*. New York: Marcel Dekker, 2004
- [69] Savolainen K., Heinolainen E., Dernjatin P., *Metody pierwotne redukcji NO_x w*

- kotłach energetycznych, Zaawansowane technologie spalania pozwalające zredukować emisję NO_x poniżej $200\text{mg}/\text{Nm}^3$ metodami pierwotnymi, TECH-EXPO, s. 45-52, 2009
- [70] Turns S.R., An introduction to combustion, concepts and applications. Singapore: McGraw-Hill, 1996
- [71] Taniguchi M., Yamamoto K., Kobayashi H., A reduced NO_x reaction model for pulverized coal combustion under fuel-rich conditions, Fuel, vol. 81, no. 3, pp. 363-371, 2002
- [72] Yamamoto K., A reduced NO_x reaction model for pulverized coal combustion under fuel-rich conditions, Fuel, vol. 81, no. 3, pp. 363-371, 2002
- [73] Kruczek H., Przydatność pomiaru warstwy przyściennej do oceny stopnia zagrożenia korozją wysokotemperaturową (niskotlenową), Energetyka, nr 6, s. 419-427, 2002
- [74] Su S., Pohl J.H., Holcombe D., Hart J.A., Techniques to determine ignition, flame stability and burnout of blended coals in p.f. power station boilers, Progress in Energy and Combustion Science, no. 27, pp. 79-98, 2001
- [75] Ballester J., Sanz A., González M.A., Investigation on the characteristics and stability of air-staged flames, Experimental Thermal and Fluid Science, no. 32, pp. 776-790, 2008
- [76] Kotyra A., Wójcik W., Diagnostyka procesu spalania pyłu węglowego wykorzystująca analizę obrazu, Automatyka, vol. 12, s. 521-529, 2008
- [77] Kotyra A., Wójcik W., Golec T., Komada P., Assesment of flame stability based on its image features, Proceeding of SPIE, Lightguides and Their Applications, vol. 6608, pp. 283-287, 2007
- [78] Wójcik W., Kotyra A., Golec T., Gromaszek K., Vision based monitoring of coal flames, Przegląd Elektrotechniczny, no. 3, pp. 241-243, 2008
- [79] Yan Y., Lu G., Colechin M., Monitoring and characterisation of pulverised coal flames using digital imaging techniques, Fuel, vol. 81, no. 5, pp. 647-655, 2002
- [80] Wójcik W., Kotyra A., Ławicki T., Zastosowanie obrazowowodu do oceny stabilności pracy palnika, Elektronika, nr 6, s. 130-134, 2008
- [81] Docquier N., Candel S., Combustion control and sensors: a review, Progress in Energy and Combustion Science, no. 28, pp. 107-150, 2002
- [82] Lu G., Yan Y., Cornwell S., Riley G., Temperature Profiling of Pulverised Coal Flames Using Multi-Colour Pyrometric and Digital Umaging Techniques, IMTC 2005 - Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, 2005, pp. 1658-1662
- [83] Huang Y.P. Yan Y., Transient two-dimensional temperature measurement of open flames by dual spectral image analysis, Transactions of the Institute of Measurement and Control, vol. 22, no. 5, pp. 371-384, 2000
- [84] Kauranen P., Anderson-Engels S., Svanberg S., Spatial mapping of flame radical emission using a spectroscopic multi-colour imaging system, Applied Physics, vol. 53, no. 4, pp. 260-264, 1991
- [85] Teichert H., Fernholz T., Ebert V., Simultaneous in situ measurement of CO , H_2O and gas temperatures in a full-sized coal-fired power plant by near-infrared diode

- lasers, *Applied Optics*, vol. 42, no. 12, pp. 2043-2051, 2003
- [86] Pinto A., Gollahalli M., Experimental Studies on the structure of pulverized coal flames, *Proceedings of the Oklahoma Academy of Science*, vol. 59, pp. 64-69, 1979
- [87] Strahle W.C., Combustion noise, *Progress in Energy and Combustion Science*, no. 4, pp. 157-176, 1978
- [88] Vaezi V., Aldredge R.C., Influences of acoustic instabilities on turbulent-flame propagation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, no. 20, pp. 162-169, 2000.
- [89] Wach J., Zastosowanie tomografii akustycznej do wyznaczania rozkładu temperatury w kotle, *Materiały konferencyjne Diagnostyka jakości spalania w energetyce*, s. 283-290, Ustroń-Zawodzie, 1998
- [90] Hii N.C., Tan C.K., Alex Z., S. Chong, Wilcox J., The Measurement Of Pulverised Fuel Flows by High Frequency Acoustic Emission Techniques, 7th INFUB, pp. 326-338, Porto, 2006
- [91] Dowling A.P., Stow S.R., Acoustic analysis of gas turbine combustors, *Journal of Propulsion and Power*, vol. 19, no. 5, p. 751-763, 2003
- [92] Patela G., Patela R., Diagnostics possibilities on the basis of premixed flame noise levels, *Combustion and Flame*, no. 52, pp. 137-147, 1983
- [93] Wójcik W., Światłowodowy układ do monitorowania procesu spalania, *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 53, nr 11, s. 24-28, 2007
- [94] Wójcik W., Golec T., Kalita M., Zastosowanie algorytmów genetycznych do analizy pomiarów ze światłowodowego systemu moinitorowania płomienia, *Materiały IX Konferencji Światłowodowy i Ich Zastosowania*, s. 872-880, Krasnobród, 2003
- [95] Jiang Z., Luo Z., Zhou H., A simple measurement metod of temperature and emissivity of coal-fired flames from visible radiation image and its application In CFB boiler furmance, *Fuel*, no. 88, pp. 980-987, 2009
- [96] Obertacke R., Wintrich H., Wintrich F., Leipertz A., A new sensor system for industrial combustion monitoring and control using UV emission spectroscopy and tomography, *Combustion Science and Technology*, no. 121, pp. 133-151, 1996
- [97] Hendricks A.G., Vandsburger U., Saunders W.R., Baumann W.T., The use of tunable diode laser absorption spectroscopy for the measurements of flame dynamics, *Measurement Science and Technology*, no. 17, pp. 139-144, 2006
- [98] Tabanfar S., Modest M., Combined Radiation and Convection in Absorbing, Emitting, Nongray Gas-Particulate Tube Flow, *Journal of Heat Transfer*, vol. 109, no. 2, pp. 478-485, 1987
- [99] Kojima J., Ikeda Y., Nakajima T., Spatially resolved measurement of OH*, CH*, and C₂* chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane-air premixed flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 28, no. 2, pp. 1757-1764, 2000
- [100] Gaydon A.G., *The spectroscopy of flames*, London, Chapman and Hall, 1974
- [101] Lou C., Zhou H., Yu P., Z., Measurements of the flame emissivity and radiative properties of particulate medium in pulverized-coal-fired boiler furnaces by image processing of visible radiation, *Proceedings of the Combustion Institute*, no. 31, p. 2771-2778, 2007

- [102] Nori V.N., J Seitzman.M., CH* chemiluminescence modeling for combustion diagnostics, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 32, no. 1, pp. 895-903, 2009
- [103] Cessou A., Meier U., Stepowski D., Applications of planar laser induced fluorescence in turbulent reacting flows, *Measurement Science and Technology*, no. 11, pp. 887-901, 2000
- [104] Gutmark E., Parr T.P., Hanson-Parr D.M., K.C. Schadow, Use of chemiluminescence and neural networks in active combustion control, *Twenty-Third Symposium on Combustion*, pp. 1101-1106, 1991
- [105] Wójcik W., Kotyra A., Popiel P., Wykorzystanie spektrofotometru światłowodowego do pomiaru widm emisyjnych płomienia, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 7, s. 264-266, 2010
- [106] Kerker M., *The Scattering of Light*, New York, Academic Press, 1969
- [107] Modest M.F., *Radiative Heat Transfer*, New York, McGraw-Hill, 1993
- [108] Kim C., Lior N., Easily computable good approximations for spectral radiative properties of particle-gas components and mixture in pulverized coal combustors, *Fuel*, vol. 74, no. 12, pp. 1891-1902, 1995
- [109] Sarofim A., Howard J., Padia A., *The Physical Transformation of the Mineral Matter in Pulverized Coal Under Simulated Combustion Conditions*, *Combustion Science and Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 187-204, 1977
- [110] Sarofim A. Hottel H., *Radiative Transfer in Combustion Chambers: Influence of Alternative Fuels*, *Proceedings of the Sixth International Heat Transfer Conference*, vol. 6, pp. 199-217, Hemisphere, Washington, 1978
- [111] Pirga M., Kujawińska M., Modified procedure for automatic surface tomography, *Measurement*, vol. 13, pp. 191-197, 1994
- [112] Woźnicki J., *Podstawowe techniki przetwarzania obrazu*, Warszawa, WKiŁ, 1996
- [113] Bayer B.E., *Color Imaging Array*, USA Patent No 3971065, Jul. 20, 1976
- [114] Magnan P., *Detection of visible photons in CCD and CMOS: A comparative view*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 504, no. 1-3, pp. 199-212, 2003
- [115] Bigas M., Cabruja E., Forest J., Salvi J., *Review of CMOS image sensors*, *Microelectronics Journal*, vol. 37, no. 5, pp. 433-451, 2006
- [116] Gonzalez R.C., Woods R.E., *Digital Image Processing*, 2nd ed., New Jersey, Prentice Hall, 2002
- [117] Canny J., *A Computational Approach to Edge Detection*, *IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, vol. PAMI-8(6), pp. 679-698, 1986
- [118] Zhang D. Lu G., *Review of shape representation and description techniques*, *Pattern Recognition*, vol. 37, pp. 1-19, 2004
- [119] Rosin P.L., *Measuring rectangularity*, *Machine Vision and Applications*, vol. 11, pp. 191-196, 1999.
- [120] Liu H.C., M. Srinath, *Corner detection from chain code*, *Pattern Recognition*, no. 23, pp. 51-68, 1990

- [121] Dubois S.R., Glanz F.H., An autoregressive model approach to two-dimensional shape classification, *IEEE Trans Pattern Anal. Machine Intell.*, no. 8, pp. 55-65, 1986
- [122] Chang G., Kuo C., Wavelet descriptor of planer curves: theory and applications, *IEEE Transaction on Image Processing*, no. 5, p. 56–70, 1996
- [123] Kunttu I., Lepistö L., Rauhamaa J., Visa A., Multiscale Fourier descriptors for defect image retrieval, *Pattern Recognition Letters*, vol. 27, pp. 123-132, 2006
- [124] Yadav R.B., Nishchal N.K., Gupta A.K., Rastogi V.K., Retrieval and classification of shape-based objects using Fourier, generic Fourier, and wavelet-Fourier descriptors technique:A comparative study, *Optics and Lasers in Engineering*, no. 45, pp. 695-708, 2007
- [125] Ghosh P.K., Deguchi K., Shape description. A Morphological Approach to Image Processing and Computer Graphics, Singapore, John Wiley & Sons, 2008
- [126] Loncaric S., A survey od shape analysis techniques, *Pattern Recognition*, vol. 31, no. 8, pp. 983-1001, 1998
- [127] Koronacki J. Ćwik J., Statystyczne systemy uczące się, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2005
- [128] Jolliffe I.T., *Principal Component Analysis*, Second ed. ed. New York, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2002
- [129] Krzanowski W.J., *Principles of Multivariate Analysis: A User's Perspective*. London, Oxford, University Press, 2000
- [130] Duda R., Hart P., Stork D., *Pattern Classification*, 2nd ed., New York, J.Wiley & Sons, 2000
- [131] McLachlan G.J., *Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition*, New York, Wiley, 2004
- [132] Webb A., *Statistical Pattern Recognition*, New York, J.Wiley & Sons, 2005.
- [133] Mallat S., *A Wavelet Tour of Signal Processing, The Sparse Way*, Amsterdam, Boston, Heidelberg, Academic Press, 2009
- [134] Chui C.K., *An Introduction to Wavelets*, San Diego, Academic Press, 1998
- [135] Daubechies I., *The Wavelets Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis*, *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. 36, no. 5, pp. 961-1004, 1990
- [136] Zieliński T.P., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*, Warszawa, WKiŁ, 2005
- [137] Candès E.J., Donoho D.L., Continuous curvelet transform: Resolution of the wavefront set, *Appl. Comput. Harmon. Anal.*, no. 19, pp. 162-197, 2003
- [138] Candès E.J., Demanet L., Donoho D.L., Ying L., Fast discrete curvelet transforms, *Multiscale Model. Simul.*, no. 5, pp. 861-899, 2005
- [139] Candès E.J., Donoho D.J., Continuous curvelet transfor: II Discretization and frames, *Appl. Comput. Harmon. Anal.*, no. 19, 2003
- [140] Candès E.J., Donoho D.L., New tight frames of curvelets and optimal representations of objects with picewise-C2 singularities, *Comm. Pure Appl. Math.*, no. 57, pp. 219-266, 2002
- [141] Candès E.J., Demanet L., Donoho D.L., Ying L., Fast discrete curvelet transforms,

Multiscale Model. Simul., no. 5, pp. 861-899, 2005

- [142] Kotyra A., Analiza składowych głównych sygnałów wielokanałowego układu monitorowania płomienia, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 10, s. 57-60, 2010
- [143] Wójcik W., Kotyra A., Wykorzystanie obrazu płomienia do oceny stabilności spalania mieszanin pyłu węglowego i biomasy, *Pomiary Automatyka Kontrola*, no. 3, s. 34-36, 2005
- [144] Kotyra A., Wójcik W., Wykorzystanie deskryptorów Fouriera w diagnostyce procesu spalania, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 10, s. 730-736, 2008
- [145] Wójcik W., Kotyra A., Ławicki T., Pilek B., Zastosowanie transformaty curvelet do analizy procesu spalania, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 86, nr 10, s. 131-135, 2010
- [146] Lech W., et al., Analysis of two dimensional signals via Curvelet Transform, *Proceedings of SPIE, Lightguides and their applications*, vol. 6608, 2007
- [147] Broadbent J.A., Fundamental flame flicker monitoring for power plant boilers, *IEEE Seminar for Advanced Sensors and Instrumentation Systems for Comustion Processes*, pp. 155-169, Birmingham, 2000